

周斌. 华南地区地震预测指标体系建设现状与展望[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 1-6. [ZHOU Bin. Current Situation and Prospect of Earthquake Prediction Index System in South China [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 1-6]

# 华南地区地震预测指标体系建设现状与展望

周 斌

(广西壮族自治区地震局, 南宁 530022)

**摘要:** 地震预测指标体系是经验预报阶段最有效的预测方法之一。经过几十年的地震预测探索实践和震例总结研究, 华南地区初步建立了分学科、分构造区的地震预测指标体系, 并在震情跟踪工作实践中取得初步的应用效果。通过总结华南地区预测指标体系取得的进展, 剖析了存在的不足, 建议充分发挥地震科技的支撑引领作用, 以地球动力学为主线, 以中强地震活动主体地区研究为重点, 遵循“场源结合, 以场求源”指导思路, 进一步优化和完善华南地区地震预测指标体系, 支撑地震预测实践。

**关键词:** 华南地区; 地震预测; 指标体系; 现状; 展望

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0001-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.01

## Current Situation and Prospect of Earthquake Prediction Index System in South China

ZHOU Bin

(Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China)

**Abstract:** Earthquake prediction index system is one of the most effective prediction methods in the empirical prediction stage. After decades of exploration and practice of earthquake prediction and earthquake cases study, earthquake prediction index system with different discipline and tectonic region has been preliminarily established in South China, and have achieved preliminary application effect in the practice of earthquake situation tracking. This paper summarizes the progress of the earthquake prediction index system in South China, and analyzes the existing shortcomings. It is suggested to give full play to the supporting and leading role of seismic science and technology, take the geodynamic as main line, focus on the main areas of moderate-strong seismicity, follow the guiding ideology of combining field with source and seeking source from field, further optimize and strengthen the construction of the earthquake prediction index system in South China and support the earthquake prediction practice.

**Keywords:** South China; Earthquake prediction; Index system; Current situation; Prospect

收稿日期: 2022-09-20

基金项目: 2021年度震情跟踪定向工作任务(2021020504); 地震预测开放基金(2021EF0F02); 广西科技攻关计划(1298005-2、1377002)项目联合资助。

作者简介: 周斌(1972-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地震监测预报、构造地质和构造流体动力学方面的研究。

E-mail: dtzlb@163.com

## 0 引言

经过 50 多年的地震监测预报实践和科技攻关, 华南地区积累了丰富的地球物理观测资料, 不断开展地震预测方法探索和震例总结, 取得了较丰硕的地震预测研究成果。测震学方面, 沈繁銓等<sup>[1]</sup>提出增强与平静特征可作为华南地区短期预测指标; 吕坚等<sup>[2]</sup>发现华南沿海地震带震级结构异常的地震密集事件具备前兆震群的多数参数特征, 具有中短期预测意义; 李涛等<sup>[3]</sup>指出 1994 年台湾海峡南部 7.3 级地震和 1994—1995 年北部湾 6.1 级、6.2 级双震具有成组和准同步的活动特征; 汤兰荣等<sup>[4-5]</sup>研究结果显示,  $A(b)$  值、应力调制法分别对华南沿海地区 4.6 级、5 级以上地震发震地点具有较好的中期预报效能; 叶秀薇等<sup>[6]</sup>研究了阳江地震窗、华南沿海地震带  $M_L$  4 地震长时间平静的震兆意义; 陈大庆等<sup>[7]</sup>提出华南沿海地震带中强地震具有时空丛集特征; 曾新福等<sup>[8]</sup>认为, 华东南地区 1970 年以来 5.5 级以上地震前普遍存在不同程度的地震条带、空区或增强异常; 郭培兰等<sup>[9-10]</sup>提出了桂北弱震区、平果窗预测指标; 此外, 阎春恒等<sup>[11]</sup>、李盛等<sup>[12]</sup>还尝试将 AI 值、AMR 矩加速释放等方法应用于华南地区地震预测。对地球物理观测资料异常的分析也取得很多定性或定量化的认识。如吴时平等<sup>[13]</sup>研究认为, 邕宁台和灵山台地应力对台站周边 4.5 级以上地震具有一定的预报能力; 叶秀薇等<sup>[14]</sup>研究发现, 粤闽交界及近海地区的中等地震与强震的水化学前兆异常在数量上有着显著的差异, 中等地震前以中短期及短临异常变化为主; 廖丽霞等<sup>[15-16]</sup>分析了华南地区中强地震前地下流体异常特征, 建立了流体学科预测指标; 文翔等<sup>[17-18]</sup>分析了 1998 年广西环江 4.9 级、2013 年广西平果 4.5 级地震前卫星热红外资料异常特征; 周斌等<sup>[19]</sup>研究了苍梧地震前流动重力变化特征, 陈兆辉等<sup>[20]</sup>进一步分析了苍梧震源区及华南块体不同尺度重力场的横向和纵向分布特征, 并探讨深部物质密度变化及可能的动力学意义; 倪晓寅等<sup>[21]</sup>研究了华南地区加卸载响应比异常特征和震例, 提出了适用于华南地区的异常指标和预测规则; 阎春恒等<sup>[22]</sup>基于近年显著震例的地磁异常特征, 探讨了华南地区地磁预测指标体系在广西地区的适用性。

基于几十年的地震预测实践成果和 20 多份地震震例总结资料, 2017—2019 年华南 6 省区分析预报人员开展了华南地区地震预测指标体系清理和建

设, 编撰了《华南地区地震预测指标体系》<sup>[23]</sup>; 以全国测震、电磁、地下流体和形变分析预测技术方法工作手册<sup>[24-27]</sup>和《震情会商技术方法业务应用推荐清单(2020 年)》为指导, 构建了华南各省(区)中短期震情跟踪预测指标和会商研判策略<sup>[28-33]</sup>。总体而言, 华南地区已经初步形成了学科较完善、覆盖华南沿海地震带和右江地震带、不同时间尺度的地震预测指标, 但预测指标体系在实践中的表现与预期仍存在差距, 特别是中短期指标的预测效能偏低。为展示近年来华南地区地震预测指标体系建设取得的相关成果, 本专辑收录了 19 篇论文, 内容涉及华南地区流动重力和定点形变, 华南沿海地震带地震调制比和地震活动显著增强, 华南西南部震群活动和  $b$  值, 台湾地区地壳形变场、震源机制一致性参数和库仑破裂应力, 华南地区形变、流体、电磁以及综合学科预测指标体系; 同时还包括川滇、新疆和华北地区的指标体系建设成果, 供华南地区指标体系建设借鉴。本文初步总结了华南地区预测指标体系的现状, 剖析了存在的主要问题, 并提出进一步优化预测指标和构建综合预测指标体系的建议, 供地震预测预报工作参考。

## 1 华南地区预测指标现状

### 1.1 测震学科预测指标

测震学科预测指标可归结为图像类(地震空区、地震条带、地震窗、震群、地震活动显著增强、地震平静)、参数类( $b$  值、调制比)和数字地震学新参数类(地震视应力、震源机制一致性), 其中多数方法指标近年在华南地区得到了较好的应用; 同时, 陆续开展了外围大震对华南地区中等地震活动影响的研究, 总结提炼了相应的预测指标。而以往在震情跟踪中较常用的参数类指标, 如  $P(b)$  值、 $A(b)$  值等, 由于其计算公式主要由  $b$  值推演得到, 因此逐渐不再作为单独指标进行总结和应用。以上预测指标构成了华南地区测震学科不同时空尺度的预测指标体系。从空间上看, 充分考虑地震活动的地域和构造差异, 按照华南沿海地震带东段和西段、右江地震带和台湾地震带四个次级构造区来构建测震学科预测指标。华南沿海地震带西段和东段观测资料和震例均较丰富, 因此获得的指标也较多, 涵盖了图像类和参数类, 但数字地震学新参数类还未得到有效应用。右江地震带只获得外围大震影响、平果窗和  $b$  值 3 项指标, 其他指标参照华南

沿海地震带西段。台湾地震带提炼了平静、调制比、地震视应力和震源机制一致性4项指标。从预测时间来看,以3个月至3年为主,部分指标时间跨度大,可应用于1年尺度和短临(3个月内)预测的指标偏少。从预测效果来看,地震空区对发震地点的预测最好,前兆性震群、地震活动显著增强—平静<sup>[1]</sup>、调制比对发震地点和发生时间有较好效果,均通过了 $R$ 值检验,适合作为中短期震情跟踪的核心指标。

## 1.2 地下流体学科预测指标

华南地区地下流体观测始于1987年,目前共有75个台站,160个测项,其中水位64台项、水温62台项,水氡7台项,气氡6台项、气汞3台项、水质及流量等18台项。福建和广东两省台站较多,均为21个,且测项比较丰富,除水位和水温外,还包括水氡、气氡等地球化学测项。其他省份(广西、海南、湖南、江西)的台站数均为8个左右,以水位和水温测项为主<sup>[23]</sup>。基于1987年以来的观测资料和 $M_L 4.5$ 以上震例,总结提炼了地下流体学科的预测指标。预测指标类型主要为水位和地球化学测项,水温测项的指标很少。水位和地球化学的预测指标基本都能通过 $R$ 值检验,其中水位异常的形态表现为多井水位同震阶升、快速上升、上升—转折、破年变,地球化学异常的形态为超均方差。预测范围为台站周边300 km的区域。异常不遵循震级越大异常数量越多、震级越大震中距越远的常规;异常出现后半年内发震的比例占多数,是优势发震时段<sup>[15]</sup>。

## 1.3 形变学科预测指标

华南地区形变学科观测手段分为定点形变、连续重力、流动重力、流动跨断层和GNSS观测5类,其中定点形变与连续重力属于单点形变观测,其余形成观测网络,绝大部分测点/测网为2000年以后开始观测,与其他学科相比,数据积累时间较短。定点形变类预测指标的异常形态表现为潮汐畸变、速率改变、大幅波动、破年变、趋势转折等;预测范围为台站周边200~300 km;预测时间为1年以内,部分预测指标具有短期预测意义;基本能通过 $R$ 值检验,但虚报率较高。总体而言,由于观测时间短、震例少,预报效能偏低。流动重力异常形态

为等值线的高梯度带或四象限分布,异常范围、持续时间以及幅值与预测震级成正比;华南地区流动重力的复测周期为半年,依据目前震例分析得到的预测时间为1~3年;预测地点为梯度带零值线附近或四象限分布中心;2016年以来广西地区的几次中等地震前均出现不同幅度的流动重力异常<sup>[19, 34-35]</sup>。目前,GPS和流动跨断层资料未能提取到预测指标。

## 1.4 电磁学科预测指标

华南地区共有17个地磁台站和1个地电阻率台站,大部分为2008年以后开始观测。基于2008年以来华南地区 $M_L 4.5$ 以上震例开展了系统的分析研究,结合全国电磁学科预测指标建设经验<sup>[36]</sup>,提炼得到华南地区电磁学科预测指标,包括地磁加卸载响应比法、地磁逐日比法、地磁垂直分量空间相关法和地磁低点位移法4项多台预测指标以及谐波振幅比和地电阻率转折2项单台预测指标。多台预测指标的异常形态均为阈值线,其中地磁垂直分量空间相关法预测地点为阈值线两侧300 km(若出现多次异常,为异常重叠区中心点为圆心半径300 km的圆范围),预测时间为18个月;地磁加卸载响应比法和地磁逐日比法预测地点为阈值线高曲率段附近或2个异常区之间,预测时间为9个月;地磁低点位移法预测地点为阈值线两侧300 km范围内,预测时间为2个月。谐波振幅比法异常形态为曲线趋势下降—转折—回升过程中不同周期出现不同步且持续时间超过1年,预测地点为台站周边200 km范围,预测时间为1年左右。地电阻率转折异常形态为快速上升或下降、幅度超过3%,预测地点为台站周边50 km,预测时间为6个月内。虽然部分指标通过了 $R$ 值检验,但虚报率和漏报率均较高。将地震对应率较好的加卸载响应比法、地磁逐日比法和地磁低点位移法进行组合形成地磁日变化异常综合预测指标,可有效降低虚报率,提高预报效能<sup>[23]</sup>。此外,2016年以来华南地区开展复测周期为1年的流动地磁,借鉴中国西部地区流磁预测指标经验<sup>[37-38]</sup>,重点关注 $H$ 分量出现局部异常变化与弱化区域、 $dF/F$ 卸载或加卸载转换边缘,预测时间通常为1年。2021年6月提出的广西田阳地区流磁异常,较好对应了2021年8月4日广西德保县4.8级地震。



## 2 存在的主要问题

### 2.1 预测效能偏低

基于几十年的实践经验和资料积累,通过震例回溯检验研究,获得了华南地区各学科预测指标,包含异常判定规则、预测规则和预测效能 $R$ 值评分等。但现实情况是,震情跟踪过程中几乎找不出“话语权”较重的指标,即这些指标出现异常时,能够明确指示地震发生的三要素(发震时间、地点和强度)或者某些要素,或者无异常时,能够较肯定的“报平安”。预测指标的预测规则分辨率普遍不高,如预测时间跨度较长(地震显著增强预测时间为0.5~32个月)、预测地点范围太大(地球物理台站预测范围普遍为台站周边300 km)、预测震级跨度较大(恩平窗开窗预测震级为 $\geq M_L 4.5$ )。预测指标与震情研判的需求之间仍存在较大差距,需进一步总结凝练、优化完善。

### 2.2 指标体系不完善

当前我国地震预报处于基于物理统计的经验性预报阶段,形成了长期(10年内)、中期(1~2年内)、短期(3个月内)、临震(10天内)和震后(显著地震发生后几天至1个月内)渐进式预报工作模式。从预测时间来看,华南地区预测指标主要以中期指标为主,其它阶段的预测指标偏少,未能梳理出临震预测指标,关于震后趋势预测指标的研究偏少,系统归纳和总结不够。部分 $R$ 值评分较高的指标,预测时间跨度为长期和中期,或者中期和短期,有的甚至跨越短期、中期和长期三个阶段,导致预测指标在实践应用中“高分低能”。基于多学科的综合分析预测是提高预测效能的一条可行途径。华南各省局已初步构建了中短期综合研判策略,部分学者开展了综合预测指标体系的研究,但主要以异常的统计分析和简单叠加为主,缺乏物理方法、动力过程分析、物理机制分析以及定量的综合过程,亟需构建更科学的综合研判策略以及更严谨的决策流程。

### 2.3 基础性研究不够

近年来,华南地区地震监测站网和地球物理场观测网络不断加密和优化,为认识地震孕育、成核和发生过程提供了更丰富、更精细的资料,

但这些观测资料的深加工和信息挖掘还不够。如,目前尚未建立华南地区主要构造带动力学模型,以致场上动态资料如何反应区域构造调整过程并不清楚,这需要利用不断加密的GNSS网络观测数据及地质学和地球物理学研究成果,建立区域主要构造带的动力学模型,深入分析动态观测资料变化所反映的区域应力应变调整过程,分析这种调整过程对区域主要断裂带中强地震孕育的影响,不断提高震源区辨别的可靠性;再如,华南沿海地震带地震活动强度和水平从沿海往内陆由强变弱,在地域上主要集中在东段的闽粤赣交界及近海地区和西段的粤桂琼交界及近海地区,是何深部构造环境造成这一地震分布的格局?这需要利用密集分布的宽频带地震监测站网资料反演获得地下三维速度结构和介质属性,为揭示这一现象提供深部构造的支撑等。这些研究可为科学认识华南地区地震孕育机理、有效建立地震预测指标体系和开展数值地震预测探索奠定基础。

## 3 讨论和展望

### 3.1 抓住指标这个点

预测指标是开展震情跟踪和综合研判的基础,指标建设和评价过程应当做到科学严谨。对于全国学科组推荐的清单方法,应按照其推荐的预报程式开展预测指标构建,并参照相关流程开展测试评价;对于其他新资料或新方法,应当确保资料和预测判据有明确的物理意义,制定合理的预报程式和测试评价方法。用于分析的数据,其质量和可靠性必须有保证,如基于地震目录类的指标要考虑地震目录的完备性,地球物理类观测数据质量要求为B类及以上。指标建设过程中,空间统计范围要结合华南地区地质构造和地震活动分区,在此基础上根据 $R$ 值评分结果来动态调整异常判定标准和预测规则之间的协调性和合理性。参与统计的震例是否属于同一地震构造区带、是否同处活跃幕或平静幕,地震对应率、地震漏报率、地震虚报率3个参数的统计是否准确,这些因素都可能影响预测指标建设的合理性以及 $R$ 值评分结果的可靠性。在此基础上,根据 $R$ 值评分、地震对应率和地震虚报率来综合评价预测指标的预测效能,科学严谨的建立预测指标,有效规避预测指标“高分低能”的问题。

### 3.2 抓住动力学这条线

目前,测震学科方法大多是基于震例的归纳、类比,缺少结合物理过程的定量分析。定点学科更多侧重相对于背景的正常持续时间、空间分布、幅度或异常测项比,对异常反映的构造活动的物理机制分析不足。地球物理场观测的物理机制相对清楚,但缺少不同手段解释观测变化物理机制的相互印证与综合。因此,指标体系建设过程中,需要进一步梳理典型震例前不同阶段测震、定点和流动物理场观测异常,探讨动态观测资料变化可能的物理机制,如反映的是地壳变形加速还是减速、区域应力增强还是减弱、断层运动增强还是减弱,结合区域地质构造模型,用动力学这条主线,将测震、定点和流动地球物理场观测有效结合起来,置于统一的力学框架和协调的变形体系进行分析,增强不同学科间的相互印证。

### 3.3 抓住主体区这个面

云南作为中国大陆西部多震省份,基于多年的实践经验,提出了实操性较强的6.5级地震跟踪分析的思路,即:首先从判别强震活动主体区开始,研究可能的发震地点,再针对危险区探寻强震孕育阶段、震前1~2年的异常共性特征,在此基础上追踪短临阶段的异常,对强震的危险性进行跟踪判别。地震主体区分析是强震跟踪研判的基础。无论是中国大陆西部的天山地区、川滇地区,还是东部的华北地区、东南沿海地区,强震在时间上起伏波动的期-幕分布规律及一段时间内在空间上相对稳定的丛集分布特征,既是观测客观事实,也是强震跟踪分析的基础。过去我们习惯于利用异常指标的空间叠加来判定危险区,问题是多数定点地球物理异常指标的预测空间范围存在不确定性,加之观测台站空间分布不均匀,致使危险区判定变得十分困难。开展预测指标体系建设,应该将主体区分析和地球物理异常有效结合起来,利用主体区分析“谋大势、抓全局”,利用地球物理场异常和定点地球物理异常“跟过程、把局部”。应该注意的是,对强震地点的把握,要更加注重主体区分析和地球物理场异常的结合,对时间进程的把握,要更加强调定点地球物理异常演化过程的跟踪。

### 3.4 做到“场”“源”结合

中国老一辈地震工作者基于对大陆型强震机

理持续的研究和预测实践,不断探索场兆、源兆以及两者的关系,逐渐形成了“场源结合,以场求源”的综合思路,其具体科学问题可以归结为“从板块到断层的动力加载过程(由动力源到震源)”,具体内容包括周边板块动力边界加载、主要地质块体运动调整、典型构造带变形机制、具体断裂带应力加载<sup>[40-41]</sup>。虽然该思路尚处于初步探索之中,但对于预测指标体系建设仍具有积极的指导意义。源兆是地震孕育的直接信息,指震源体(孕震震源体积)中及附近区域其介质内的各种各样被人们在震前直观观测到的信息,主要包括物理前兆信息(力学、热学、电磁、地震波等)和化学前兆信息(如Rn、H<sub>2</sub>、He等携带深部信息的元素、气体和离子)两类,空间上主要出现在震源附近,时间上更逼近发震时刻。场兆是地震孕育的间接信息,指震源体外广大区域观测到的前兆观测方法、地震活动性方法提供的信息(如地球自转、固体潮、构造应力场、地震大形势分析等),与源兆相比,范围较广,出现的时间距发震时刻相对较早。场兆和源兆两者是相辅相成、互相作用、共同孕震、互为因果关系<sup>[42]</sup>。预测指标梳理过程中,场兆和源兆有助于预测规则的科学制定,如果判定为源兆相关的预测指标,那么预测时间应当相对的短、预测范围应当相对的小。预测指标体系构建过程中,对比不同震例的源兆和场兆,以场求源,以源观场,可能有助于寻找共性特征以及理解个性差异;根据预测指标的场兆和源兆属性特征,在不同阶段预测策略中赋予不同的权重方案,有助于提高综合预测指标体系的合理性和科学性。

### 3.5 依靠地震科技支撑

地震的孕育和发生是一个非常复杂的过程。由于地球内部的“不可入性”、大地震的“非频发性”、地震物理过程的复杂性,地震预测是公认的科学难题<sup>[43]</sup>。地震预测的进步,强烈依赖地震科技的进步和支撑,如地震监测技术革新、地震分析方法和理论进步、地球内部结构和震源物理模型不断精细、震源物理过程认识不断深化等等。综合考虑华南地区地震活动的时空演化、前兆异常类型和分布特征,建设密度更高的GNSS观测网,在地震活动主体地区加密地球物理站点,开展密集台阵探测,有针对性地在华南沿海地区开展定点地球化学观测等,实现对场的全方位动态跟踪和对源的高精度密切监测,加强断层运动状态、



断层应力状态和震源异常等方面的研究,将有助于增进对地震的了解、提高预测指标体系的效能、促进地震预测预报技术的进步。

### 参考文献

- [1] 沈繁奎,符干,袁锡文,等. 华南中强震前区域地震活动增强平静特征[J]. 华南地震, 2003, 23(3): 11-15.
- [2] 吕坚,张福平,高建华,等. 华南沿海地震带的地震丛集窗及震级结构特征分析[J]. 地震, 2003, 23(1): 83-89.
- [3] 李涛,胡翠娥,吕坚,等. 华南沿海地震带一组主导强震的准同步活动特征[J]. 华南地震, 2005, 25(1): 59-66.
- [4] 汤兰荣,李涛,吕坚,等. 东南沿海地区应力调制预报应用研究[J]. 华南地震, 2004, 24(3): 65-69.
- [5] 汤兰荣,吕坚,李涛,等. A(b值在东南沿海地区地震预测中的应用[J]. 华南地震, 2005, 25(2): 88-92.
- [6] 叶秀薇,杨马陵,黄元敏. 华南沿海地震带 20 世纪第 IV 活跃幕的两个特征[J]. 地震研究, 2013, 36(1): 9-14+141.
- [7] 陈大庆,邵叶,谭争光,等. 华南沿海地震带  $M \geq 5$  级中强地震活动的时空丛集特征[J]. 华南地震, 2020, 40(4): 10-17.
- [8] 曾新福,吕坚. 华东南地区 5.5 级以上地震前的地震活动图像异常研究[J]. 地震, 2016, 36(3): 116-124.
- [9] 郭培兰,陆丽娟,阎春恒. 桂北弱震区地震活动特征分析[J]. 华南地震, 2012, 32(3): 21-30.
- [10] 郭培兰,谢夜玉. 平果地震窗异常与地震的关系研究[J]. 高原地震, 2018, 30(4): 1-5.
- [11] 阎春恒,周斌,陆丽娟,等. AI 算法用于广西中强地震的回溯性震例研究[J]. 地震研究, 2014, 37(1): 16-23+171.
- [12] 李盛,张慧,李志雄,等. 东南沿海地区中强地震震前地震矩释放研究[J]. 华南地震, 2018, 38(1): 31-38.
- [13] 吴时平,王锋,陆炳情,等. 利用广西邕宁、灵山地应力资料预报周边地区中强震发震时间的初步探讨[J]. 华南地震, 2003, 23(3): 1-10.
- [14] 叶秀薇,杨马陵,贾庆华. 粤闽地区水化学地震前兆异常特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, 25(6): 17-23.
- [15] 廖丽霞,解小静,洪旭瑜. 基于中国震例的华南地区中强地震前流体异常特征分析[J]. 内陆地震, 2019, 33(1): 1-7.
- [16] 廖丽霞,秦双龙,洪旭瑜. 华南地区流体地震预测指标建立、应用和反思[J]. 地震研究, 2020, 43(2): 310-319.
- [17] 文翔,周斌,阎春恒,等. 1998 年广西环江  $M_s 4.9$  地震前卫星热红外异常分析[J]. 地震研究, 2015, 38(4): 584-590+697.
- [18] 文翔,周斌,阎春恒,等. 平果 4.5 级地震前 MODIS 卫星热红外异常分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(6): 1078-1083.
- [19] 周斌,文翔,原永东. 2016 年苍梧  $M_s 5.4$  地震前后重力变化[J]. 地震地质, 2018, 40(3): 539-551.
- [20] 陈兆辉,刘金钊,张双喜,等. 苍梧  $M_s 5.4$  地震孕震环境的多尺度重力场分析及动力学意义[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(2): 175-181.
- [21] 倪晓寅,郭雨帆,谢小玲,等. 华南地区地磁加卸载响应比异常指标[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 22-28.
- [22] 阎春恒,李莎,倪晓寅. 广西及邻区地磁异常与显著地震关系探讨[J]. 华北地震科学, 2022, 40(1): 84-91+98.
- [23] 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.
- [24] 中国地震局监测预报司. 测震分析预测技术方法工作手册[M]. 北京:地震出版社, 2020.
- [25] 中国地震局监测预报司. 地震电磁分析预测技术方法工作手册[M]. 北京:地震出版社, 2020.
- [26] 中国地震局监测预报司. 地下流体分析预测技术方法工作手册[M]. 北京:地震出版社, 2020.
- [27] 中国地震局监测预报司. 形变分析预测技术方法工作手册[M]. 北京:地震出版社, 2020.
- [28] 福建省地震局. 2021 年度震情短临跟踪和会商研判技术方案[R]. 福州:福建省地震局, 2021.
- [29] 江西省地震局. 2021 年度震情短临跟踪和会商研判技术方案[R]. 南昌:江西省地震局, 2021.
- [30] 湖南省地震局. 2021 年度震情短临跟踪和会商研判技术方案[R]. 长沙:湖南省地震局, 2021.
- [31] 广东省地震局. 2021 年度震情短临跟踪和会商研判技术方案[R]. 广州:广东省地震局, 2021.
- [32] 广西壮族自治区地震局. 2021 年度震情短临跟踪和会商研判技术方案[R]. 南宁:广西壮族自治区地震局, 2021.
- [33] 海南省地震局. 2021 年度震情短临跟踪和会商研判技术方案[R]. 海口:海南省地震局, 2021.
- [34] 文翔,毕熙荣,覃坚,等. 2017 年南丹  $M_s 4.0$  地震前后重力变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(4): 344-350.
- [35] 文翔,罗远鹏,梁飞,等. 广西北流  $M_s 5.2$  地震区域重力场变化[J]. 华北地震科学, 2019, 37(S1): 62-66.
- [36] 冯志生,倪晓寅,戴苗,等. 地震地磁日变化预测指标体系建设进展[J]. 国际地震动态, 2019(8): 11-12.
- [37] 倪喆,袁洁浩,王粲,等. 2014 年云南鲁甸 6.5 级、永善 5.0 级地震前岩石圈磁场局部异常特征分析[J]. 地震研究, 2014, 37(4): 537-541.
- [38] 倪喆. 基于岩石圈磁场异常特征演化的地震预测[C]// 2018 年中国地球科学联合学术年会论文集(四十一)——专题 89: 地球磁场与局部异常现象. 北京:中国地球科学联合学术年会, 2018.
- [39] 付虹. 云南  $M \geq 6.5$  地震跟踪研究和预报决策指标和方案的建立[R]. 昆明:云南省地震局, 2021.
- [40] 邵志刚,武艳强,江在森,等. 中国大陆强震中期综合预测工作简介[J]. 国际地震动态, 2017(7): 14-23.
- [41] 邵志刚,王芑. 2008 年汶川 8.0 级地震对地震预测研究的启示思考[J]. 地震, 2018, 38(2): 1-10.
- [42] 张晓东,庞希华. 地震前兆场源关系复杂性初探[J]. 高原地震, 1994, 6(4): 27-32.
- [43] 陈运泰. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 39(12): 1633-1658.