

袁丽文. 华南地区地震危险性判定综合指标的分析与应用 [J]. 华南地震, 2022, 42(4): 78-85. [YUAN Liwen. Analysis and Application of Comprehensive Indicators for Seismic Hazard Determination in South China [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 78-85]

华南地区地震危险性判定综合指标的分析与应用

袁丽文

(福建省地震局, 福州 350000)

摘要: 利用华南地区地震预测指标, 分析其时、空、强预测特征显示: 地震活动性指标均为中、长期预测指标, 一般指示较大空间范围5级以上中强地震的发震危险性; 地球物理观测指标以中、短期预测指标为主, 一般指示异常台项周边、异常测值空间分布区或异常阈值线附近的4~5级左右地震的发震危险性。利用预测指标的上述特征, 梳理出时间上不断逼近发震时间、空间上不断逼近发震危险区的预测思路流程。

关键词: 华南; 预测指标; 预测思路流程

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0078-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.11

Analysis and Application of Comprehensive Indicators for Seismic Hazard Determination in South China

YUAN Liwen

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350000, China)

Abstract: Using the seismic prediction indicators in South China, the analysis of its time, space and strong prediction characteristics shows that the seismicity indicators are all medium and long-term prediction indicators, generally indicating the seismic risk of moderate and strong earthquakes with $M \geq 5$ in a large spatial range; geophysical observation indicators are mainly medium and short-term prediction indicators, which generally indicate the seismic risk of earthquakes with magnitude of 4-5 near the abnormal station, the spatial distribution area of abnormal measurement values, or near the abnormal threshold line. Using the above mentioned characteristics of the prediction indicators, the prediction process of continuously approaching the earthquake occurrence time in time and the earthquake risk area in space is sorted out.

Keywords: South China; Prediction index; Prediction process

0 引言

在2016年中国地震局监测预报司开展的新一轮地震预测指标体系清理和建设工作的统筹下安

排下, 华南6省区(福建、江西、广东、海南、广西、湖南)开展了华南地区地震预测指标体系清理和建设的工作。通过对本区历史中强震活动规律梳理、1970年以来地震活动性异常和近20余年以来前兆观测异常提取, 综合利用华南地区历史震例

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 袁丽文(1982-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事地震活动性及数字地震学研究工作。

E-mail: lwysz@126.com

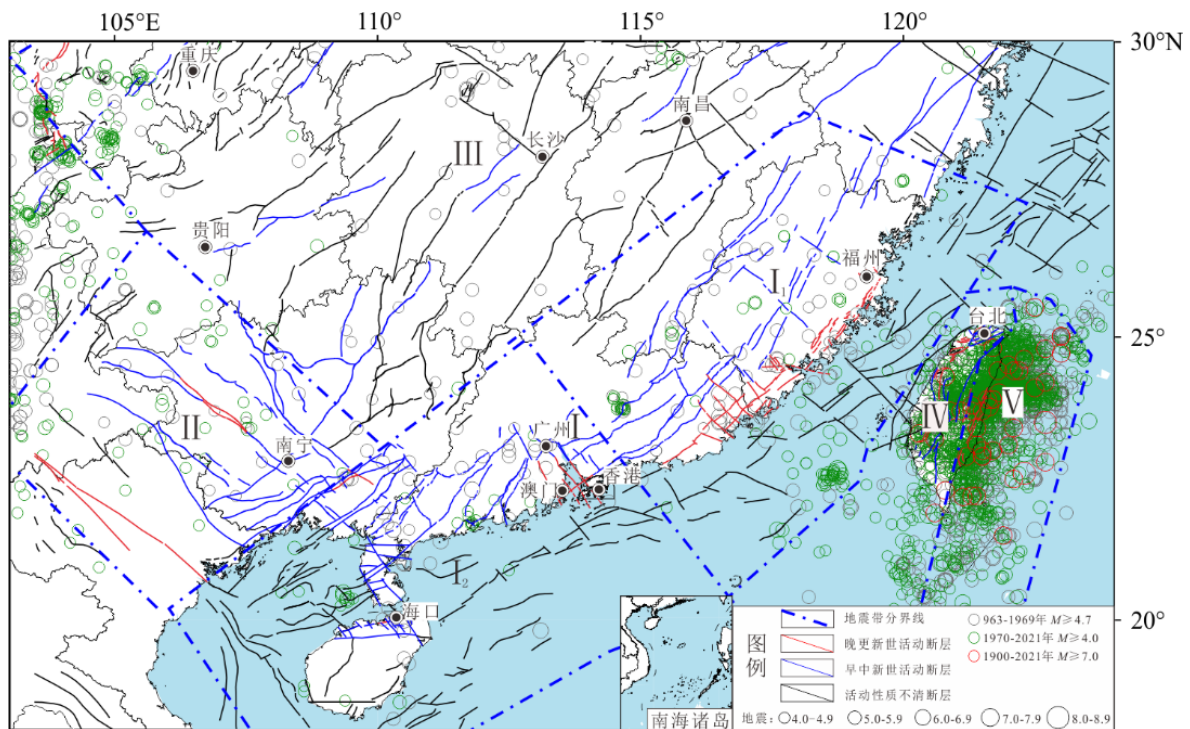
研究成果^[1-6]和各学科(测震、流体、形变、电磁)推荐的技术方法^[7-10]开展华南地区中、强震例的回溯性检验,初步构建了华南地区用于中、强地震预测的指标体系。下文梳理总结上述工作形成的预测指标^[11],探索其应用于华南地区地震危险性综合研判的技术思路。

1 华南地区构造应力环境和中强地震活动背景

华南地处欧亚大陆板块东南隅,同时受到东侧西太平洋板块向西俯冲和西侧印度洋板块北向推挤的夹持作用。其中,印度洋板块碰撞产生北向差异运动造成了中国大陆西部青藏高原的隆起,这一推挤作用通过侧向滑移作用影响华南地区,影响力大为减弱,加之华南地区较软的基底条件,导致华南地区整体地震活动水平偏弱;西太平洋(菲律宾海)板块向西的推挤作用在欧亚板块边界处的台湾地区受到阻挡,且南海洋壳沿马尼拉海沟向东俯冲到菲律宾海板块之下,菲律宾海板块在台湾东北部海域沿琉球海沟向北西俯冲于欧亚

板块之下,台湾岛正好位于这两个俯冲方向大致相对的俯冲体系的转换位置,使得台湾岛及其附近海域发育了十分复杂的构造环境,且板块边界处的动力作用影响自西向东逐渐减弱。

在上述构造应力环境下,华南地区发育了北东、北西和近东西向的多组断裂。14组北东向断裂自西北内陆至东南沿海,其断裂带附近最大历史破坏性地震震级水平逐步上升;14组北西向断裂其断裂带附近最大历史破坏性地震震级水平多为5、6级,其中6级以上地震大多位于北西与北东向断裂带交汇的沿海及近岸海域地区。上述历史地震的分布格局显示,华南地区地震活动活动水平最高为华南沿海地震带地区,其中东段活动水平大于西段,其次为右江地震带地区,再次为华南内陆的长江中游地震带。华南块体东南侧的台湾地震带,以中央山脉为界分为东、西两带,其中东带受板块边界处强烈构造运动的直接作用,6、7级地震频发,历史上最大震级水平达8级;西带邻近板块碰撞边界,地震活动水平亦十分强烈,但频次和强度水平不及东带(图1)。



地震带划分: I: 华南沿海地震带(I₁: 华南沿海地震带东段、I₂: 华南沿海地震带西段); II: 右江地震带;
III: 长江中游地震带; IV: 台湾西地震带; V: 台湾东地震带

图1 华南地区地震构造与历史地震

Fig.1 Seismotectonics and historical earthquakes in South China

2 华南预测指标体系应用

利用现有技术、方法，结合华南地区历史震

例的梳理，总结得到 17 项地震活动性和 39 项地球物理观测异常指标(表 1)。综合上述预测指标形成的指标体系，从时、空、强三方面探索地震综合预测的思路(图 2)，现分述如下：

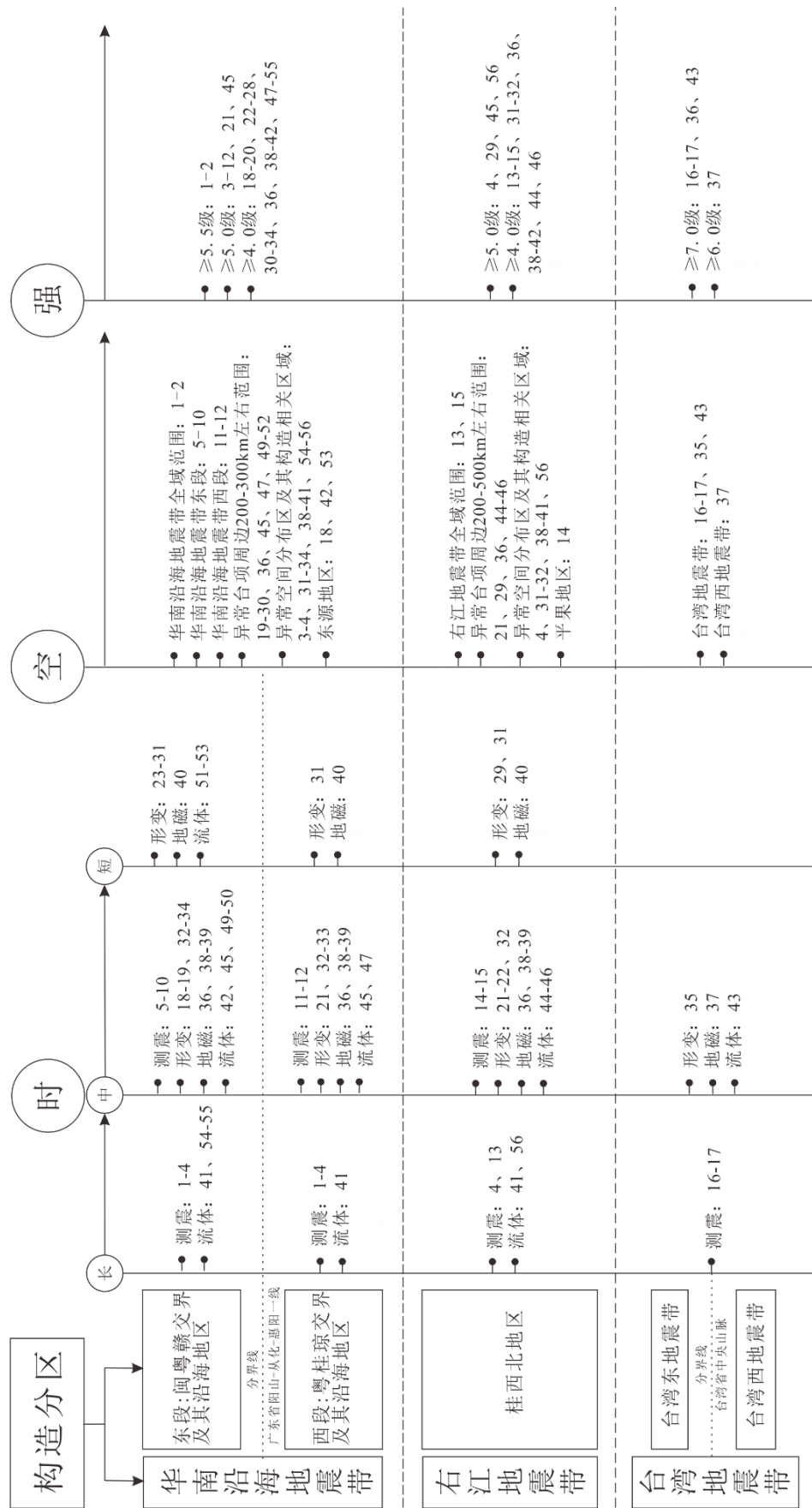
表 1 华南地震预测指标
Table 1 The prediction index of South China

序号	预测指标	预测时效	预测空间	预测强度
1	台湾 7 级强震活跃-平静相关性	≤3 年	华南沿海地震带	$M \geq 5.5$
2	华南沿海地震活跃幕	≤3 年	华南沿海地震带	$M \geq 5.5$
3	$M_L \geq 3.0$ 地震空区	≤3 年	华南沿海空区内部及边缘	$M \geq 5.0$
4	$M_L \geq 3.0$ 地震集中增强	≤3 年	华南陆域增强区及周边	$M \geq 5.0$
5	$b \leq 0.72$ 持续半年	≤2 年	华南沿海地震带东段	$M \geq 5.0$
6	$M_L \geq 4.0$ 平静超 18 个月	≤2 年	华南沿海地震带东段	$M_L \geq 5.0$ 成组活动
7	震级结构异常	≤2 年	华南沿海地震带东段的地震窗 或其邻近的构造相关区域	$M \geq 5.0$
8	$M_L \geq 3.2$ 平静超 160 天	≤2 年(活跃幕时段)	华南沿海地震带东段	$M \geq 5.0$
9	地震窗 $M_L \geq 3$ 频次高值	≤1.5 年	华南沿海地震带东段	$M_L \geq 5.0$
10	台湾 7 级强震相关性	≤1.5 年(活跃幕时段)	华南沿海地震带东段	$M \geq 5.0$
11	$b \leq 0.75$ 持续半年	≤2 年	华南沿海地震带西段	$M \geq 5.0$
12	$M_L \geq 2.0$ 平静超 12 个月	1.8~2.1 年	粤桂交界及北部湾	$M \geq 5.0$
13	南北地震带中南段 6.5 级地震相关性	7 个月~16 年	右江地震带	$M \geq 4.8$
14	平果窗开窗	≤2 年	平果震区 140 km 范围	$M \geq 4.3$
15	$b \leq 0.85$ 持续半年	≤2 年	右江地震带	$M \geq 4.9$
16	台湾 7 级地震准周期	≤2 年	台湾地区	$M \geq 7.0$
17	台湾 6 级平静(超过 365 天)	≤2 年	台湾地区	$M \geq 7.0$
18	破年变(河源台室内短水准)	≤1 年	异常台站周边 50 km	$M_L \geq 4.5$
19	破年变(南昌台垂直摆倾斜仪 EW 向)	≤1 年	异常台站周边 300 km	$M_L \geq 4.5$
20	破年变(长沙台洞体应变 EW、NS 向)	≤1 年	异常台站周边 400 km	$M_L \geq 4.0$
21	破年变(长沙台洞体应变 NS 向)	≤1 年	异常台站周边 500 km	$M \geq 5.0$
22	趋势转折(梧州台水管倾斜仪 NS 向)	≤0.5 年	异常台站周边 300 km	$M_L \geq 4.5$
23	潮汐畸变(漳州台洞体应变)	≤30 日	异常台站周边 200 km	$M_L \geq 4.5$
24	潮汐畸变(汕头台洞体应变)	≤60 日	异常台站周边 300 km	$M_L \geq 4.5$
25	速率改变(厦门天洞体应变)	≤150 日	异常台站周边 200 km	$M_L \geq 4.5$
26	趋势转折(汕头台洞体应变)	≤30 日	异常台站周边 300 km	$M_L \geq 4.5$
27	趋势转折(上饶台垂直摆倾斜仪 EW 向)	≤60 日	异常台站周边 300 km	$M_L \geq 4.5$
28	趋势转折(南昌台洞体应变)	≤80 日	异常台站周边 300 km	$M_L \geq 4.5$
29	趋势转折(长沙台洞体应变 NS 向)	≤30 日	异常台站周边 500 km	$M \geq 5.0$
30	大幅波动(汕头台水管倾斜仪 NS 向)	≤30 日	异常台站周边 300 km	$M_L \geq 4.5$

(转下表)

(接表1)

序号	预测指标	预测时效	预测空间	预测强度
31	重力(相邻两期段差值>40 μgal)	≤1年	异常区周边 50 km	M_L 4.0左右
32	重力(同一点或相邻多点重力值趋势变化持续1~2年,累积幅度>45 μgal)	≤2年	异常区周边 50 km,重点关注重力变化高梯度区	M_L 4.0左右
33	流动重力(多点重力点值同步大幅变化)	≤2年	重力点值异常区	M_L ≥4.0
34	流动重力(多个重力点累积变化超 30 μgal)	≤1年	重力累积变化高值区	M ≥4.5
35	流动跨断层短水准(小波分析破年变)	≤2年	台湾地区	M ≥7.0
36	地磁测深视电阻率	≤1.5年	异常台站周边 200 km	M ≥4.5
37	地磁测深视电阻率(漳州)	≤2年	台湾西地震带	M ≥6.0
38	地磁加卸载相应比	≤0.5年	异常阈值线(3.0)附近	M ≥4.0
39	地磁逐日比	≤0.5年	异常阈值线(2.8)附近	M ≥4.0
40	地磁低点位移	≤60日	异常线附近 200 km	M ≥4.0
41	多井水位同震阶升	≤3年	同震阶升水井分布区域	M_L ≥4.0
42	河源黄子洞水氡(氡五日均值超 1.7倍均方差持续 2个月以上)	≤14个月	东源地区	M_L ≥4.5
43	华安汰内井水氡(年原始数据月均值之差≥4 Bq/l)	1年左右	台湾地区	M ≥7.0
44	九塘水位(同震阶升持续高值1年左右)	异常持续期内或结束后	异常井周边 200 km	M_L ≥4.5
45	桂平西山井、石康井水位(破年变)	≤1年	异常井周边 300 km	M_L 5.5左右
46	香1井水位(趋势上升背景下的加速或转折)	转折持续或结束后	异常井周边 200 km	M_L ≥4.5
47	儋州西流井、琼海加积井水位趋势变化	转折后1~2年	异常井周边 350 km	M_L ≥5.0
48	长沙井水位同震阶降	同震阶降后2年内	异常井周边 300 km	M_L ≥5.0
49	宁德井气氡(日均值超 2.0倍均方差)	≤0.5年	异常井周边 250 km	M_L ≥4.5
50	华安汰内井和厦门东孚井水化(月测值超 1.6倍均方差,华安汰内井碳酸氢根离子为 2.0倍)	≤0.5年	异常井周边 250 km	M_L ≥4.5
51	华安汰内井水氡(与气温变化不同步或突跳)	1个月左右	异常井周边 250 km	M_L ≥4.5
52	宁德井气氡(与气温不同步的趋势上升)	1个月左右	异常井周边 250 km	M_L ≥4.5
53	河源黄子洞水氡(日测值超 25 Bq/l)	≤15日	东源地区	M_L 3.5~4.5
54	永安—晋江断裂带多井水准同步趋势上升	1~3年	断裂构造及邻近地区	M_L ≥4.5
55	长乐—诏安断裂带多井水准同步趋势上升	1~3年	断裂构造及邻近地区	M_L ≥4.5
56	百色—合浦断裂带多井水准同步趋势上升	1~3年	断裂构造及邻近地区	M_L ≥4.5



备注: 图中数字对应表1中序号

图2 地震预测思路流程图
Fig.2 Flow chart of earthquake prediction

2.1 时间预测

华南预测指标的预测时间特征主要表现为:地震活动性指标均为中、长期预测指标;地球物理观测预测指标以中、短期预测指标为主。均未提取到具有明确临震预测意义的预测指标。利用现有预测指标开展目标地震的发震时间预测,遵循长、中、短、临的逼近式预测工作思路,主要预测流程如下:

(1)在长期时间预测尺度上,重点关注地震活动性(指标1~4)和流体异常指标(指标41、54~56)。其中地震活动性指标显示:一方面需关注构造区域自身因能量积累一释放而形成的地震期幕活动(指标2)和地震活动空间异常(指标3、4);另一方面需关注构造区周边,尤其是动力边界处强震影响(指标1、13)。地震活动性长时间预测指标主要表现为:华南沿海地震带其自身地震活动周期存在平静、活跃交替的特征,根据平静幕、活跃幕持续时间、地震活动强度特征等,可从长时间尺度上判定区域地震活动趋势;在华南沿海地震带中强震前的孕震时段,出现 M_L3 地震空区和 M_L3 地震集中增强的空间活动形态,在较长时间尺度上关注发生中强震的危险;华南沿海地震带特别是东段地区,因其毗邻台湾强震区,从地震活动相关性角度显示台湾7级以上地震持续平静异常(超6年)的中后期是华南5.5级以上地震活跃幕的早期时段;华南西部的右江地震带区域,受南北地震中南段6.5强震影响,在长期时间尺度右江地震带出现4.8级以上地震持续活跃现象。流体学科长时间预测指标(指标41、54~56)显示,多井水位同震阶升区域(指标41)或某一断裂构造带区域多井水位准同步趋势上升区域(指标54~56),是应力水平较高区域,具备发生地震的应力积累背景。

(2)在中期时间预测尺度上,重点关注地震活动性异常指标(指标5~10、11~12、14~15),显示华南地区中强地震之前存在高应力背景(指标5、11、15)、异常平静(指标6、8、12)、小震异常增强活动(指标7、9、14)和地震活动相关性增强(指标10)等地震活动异常现象;重点关注地球物理观测的形变类(指标18~22、32~34)、地磁类(指标36、38~39)和流体(指标42、44~50)异常指标,显示在华南地区中强地震前在中期时间尺度上出现形变破年变、重力累积或同步大幅变化、地磁

测深视电阻率、地磁加卸载响应比、地磁逐日比、水氡和气氡高值、水位破年变和多项水化测项同步变化等异常变化。

(3)在短期时间预测尺度上,均为地球物理观测异常指标,其中形变类以潮汐畸变、速率改变、趋势转折、大幅波动和重力相邻两期期差大幅变化为主要变化特征(指标23~31);地磁类以地点位移异常为主(指标40);流体类以水氡与气温变化不同步、气氡与气温不同步趋势上升和水氡高值超限异常为主要变化特征(指标51~53)。

2.2 空间预测

根据华南预测指标的空间预测意义显示,测震学类指标以指示华南地区不同断裂构造区的大范围指示意义为主,部分地震活动在一定区域范围内的增强、平静异常可以进一步缩小预测范围;地球物理类预测指标,其空间指示意义相对较强,主要指示类别包括异常台项周边一定空间范围、异常测值空间分布区及其构造相关区域、异常阈值线及邻近地区等。利用现有预测指标,对华南不同构造区开展目标地震的危险区空间范围预测,按照空间预测尺度由大到小进行梳理,主要预测思路如下:

(1)基于地震活动性异常的大范围空间尺度预测

华南沿海地震带存在活跃-平静交替的期幕活动特征,关注活跃幕时段该区作为5.5级以上地震危险区的可能性(指标2);根据低 b 值反应的高应力特征,关注华南不同断裂构造区在高应力背景下作为中强地震危险区的可能性(指标5、11、15);根据华南邻近构造强震区强震相关性影响,关注华南沿海地震带东段和右江地震带作为中强地震危险区的可能性(指标10、13);对华南不同构造分区地震活动背景水平差异性分析的基础上,提取中、小地震的平静、活跃等异常特征,关注相应构造区域发生中强地震的危险性(指标6~9、12、14)。

(2)基于地球物理观测异常台项的空间尺度预测

根据华南地区地球物理观测的预测指标梳理,需关注华南沿海地震带异常台项周边200~300 km空间范围,右江地震带异常台项200~500 km范围中强地震的危险性。

(3)基于地震活动和地球物理观测空间异常的空间尺度预测

地震活动在空间上的平静、活跃异常(指标3、4)指示需关注地震空区和增强区及周边区域发生地震为危险性;重力观测提示相邻两期段差超限区域、多点累积重力超限区域和同步大幅变化区域需作为中强地震危险区予以关注(指标31~34);地磁的异常线或异常阈值线附近地区需予以关注(指标38~40);流体的多井水位同震阶升区(指标41)和多井水位同步上升区域(指标54~56)需作为中强地震危险区予以关注。

(4)小区域范围空间尺度预测

华南的东源地区和平果地区,作为历史上发生过中强地震且现今仍持续较为密集小震活动的地区,当东源地区出现河源短水准破年变(指标18)和河源黄子洞水氡高值(指标42、53)、平果地区出现开窗活动(指标14)时,需关注相应区域发生地震的危险性。

2.3 强度预测

根据现有华南预测指标梳理成果,按照目标地震震级水平由强至弱,梳理预测工作的思路如下:

(1)基于不同构造分区地震活动背景强度的震级水平预测

根据历史地震活动水平分析显示,华南不同构造分区其地震活动背景水平存在一定的差异性。华南沿海地震带地震活动水平高于右江地震带,且华南沿海地震带东段高于西段。就华南沿海地震带本身而言,需关注其在地震幕划分背景下活跃幕时段发生5.5级以上,平静幕时段发生5级以上地震的可能。同时,考虑华南地区与邻近构造区中强以上地震的相关性,华南沿海地区需关注台湾7级以上强震影响下发生5.5级以上地震可能,右江地震带需关注南北地震带中南段6.5级以上地震影响下发生4.8级以上地震的可能。

(2)基于地震活动性异常的震级水平预测

根据华南地区地震活动性预测指标的梳理显示,其对华南地区的预测强度水平多为5级左右及以上,主要关注以下异常:华南沿海地震空区、华南陆域3级以上集中增强、低 b 值(东段小于0.72,西段小于0.75,右江地震带小于0.85)、地震平静、地震窗 $M_L \geq 3$ 地震高频次异常等。

(3)基于地球物理观测的震级水平预测

华南地区预测指标显示,地球物理观测异常

对应的预测震级水平大多在4级以上,其中形变类以破年变、趋势转折、潮汐畸变、速率改变、大幅波动异常为主;重力以相邻两期段差变化超限、多点点值趋势上升和同步大幅变化为主;地磁以磁测深视电阻率、加卸载响应比、逐日比和低点位移异常为主;流体以水位同震阶升、多井水位趋势上升、水氡、气氡、水化、水氡和气氡与气温变化不同步异常为主。

3 结论与讨论

(1)根据华南预测指标的时间预测效能来看,地震活动性类预测指标以中、长期为主,缺少明确的短临预测指标;地球物理观测类指标以中期为主,存在少量短期指标,缺少临震指标。在对可能发生的目标地震预测工作中,应以地震活动性异常确定其长时间尺度的危险性,重点关注异常长时间演化背景下的转折变化特征,例如邻近中强地震构造区的活跃程度及其影响、空区平静打破等,关注地震活动性预测由长期向中期过渡的变化特征,并综合地球物理观测类等中、短期预测指标,逼近目标地震的发震时间。

(2)华南预测指标对发震地点的预测,主要基于对历史震例的回溯性检验获得。其中,地震活动性类预测指标既包含对统计区地震活动特征(活跃幕、地震相关性、低 b 值、显著平静)得到大范围地震危险区的判定指标,也包含地震活动空间异常(地震空区、集中增强)所指示的相对较小范围的地震危险区判定指标,还包含一些地震活动窗口区域(广西平果、广东东源)的小范围地震危险区的判定指标。地球物理观测预测指标对空间的指示意义,主要包括异常台项周边一定范围(华南沿海东段200~300 km范围,西段300~500 km范围)、异常空间分布及其构造相关区域、异常阈值线及邻近区域和小区域范围(东源地区),总体上地球物理预测指标对空间的预测范围较多数地震活动性类预测范围更小,但其大多是针对某一特定台项总结得出,相同测项在不同台站的普适性不强。

(3)华南预测指标对地震强度的预测,地震活动性预测指标多对应震级水平较大的中强(5.0级以上)地震,地球物理观测多对应震级水平较小的中等强度(4.0级以上)地震。造成这种差异的主要原

因是受限于统计样本的差异性,其中地震活动性观测资料累积时间长、用于提取指标的历史震例较为丰富,中强震例样本较多,使得预测指标提取的发震水平普遍较高,特别是台湾强震活跃区,1900年以来积累了较为完整的强震目录;而地球物理观测资料累积时段较短(最早始于二十世纪七八十年代,但当时观测台项偏少,最后经不断建设与数字化改造,在2000年前后各学科才逐步形成覆盖面较为完善的观测体系),且观测时段发生的中强地震偏少或中强地震发生在地球物理监测能力的弱区或盲区(华南沿海地震带和右江地震带区域自1970年以来73%的5级以上地震和100%的6级以上地震发生在上述区域),在地球物理预测指标提取过程中结合实际观测所得的异常,只能适当降低预测震级水平下限开展震例总结,最终使得地球物理观测指标的预测震级水平普遍偏小。

参考文献

- [1] 张肇诚主编. 中国震例(1986-1988)[M]. 北京:地震出版社,1999:184-212.
- [2] 陈祺福主编. 中国震例(1992-1994)[M]. 北京:地震出版社,2002:399-431.
- [3] 陈祺福主编. 中国震例(1995-1996)[M]. 北京:地震出版社,2002:15-28.
- [4] 陈祺福主编. 中国震例(1997-1998)[M]. 北京:地震出版社,2002:74-90.
- [5] 蒋海昆主编. 中国震例(2003-2006)[M]. 北京:地震出版社,2014:428-445.
- [6] 蒋海昆主编. 中国震例(2011-2012)[M]. 北京:地震出版社,2018:233-259.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.