

于晨,韩盈,张永仙,等. 2025. 多方法组合预测模型在 CSEP 计划中的应用和预测效能检验[J]. 地震研究, 48(2): 199–209, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0021.

Yu C, Han Y, Zhang Y X, et al. 2025. Application of multi-method earthquake prediction in CSEP and testing of prediction efficiency [J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 199–209, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0021.

多方法组合预测模型在 CSEP 计划中的应用和 预测效能检验*

于晨¹, 韩盈¹, 张永仙², 张小涛¹, 余怀忠¹

(1. 中国地震台网中心, 北京 100045; 2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要: 为了更好地评估 CSEP 中国检验中心的实用性, 对基于多方法组合预测模型 MMEP 的 2018—2023 年全国 5 级以上地震的年度预测结果进行了系统梳理, 并采用 CSEP 中国检验中心的 R 值评分模块对年度预测结果进行了评估。结果表明: ①近几年 MMEP 年度预测结果的 R 值评分均值在 0.3~0.4, 年度预测效能波动较小; ②中国大陆西部地区的预测结果优于东部地区, 其中 2019 年四川长宁 6.0 级、2020 年新疆伽师 6.4 级和于田 6.4 级地震的年度预测以及四川泸定 6.8 级地震的中短期预测的“时、空、强”三要素基本正确。

关键词: 多方法组合预测模型; CSEP 计划; 加卸载响应比; R 值评分方法; 预测效能检验

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)02-0199-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0021

0 引言

地震是地壳介质在长期构造加载作用下发生变形, 导致断层错动, 最终发生失稳的结果。地震发生的物理成因虽然已达成广泛共识, 但地震预报仍然是世界性难题, 其主要原因在于, 破坏性地震往往发生在地下数千米至数十千米的深处, 导致与地震孕育过程相关的介质物性变化、应力状态和动态演化规律难以被准确观测到。通过在地表布设的观测仪器获得的资料, 究竟能为地震预报提供多大程度的帮助, 地震学界目前仍未达成共识(陈运泰, 2009)。

在地震预测预报研究领域, 如何合理地选择地震前兆预测模型是一个比较复杂且关键的问题,

不同的模型通常会得到不同的预测结果。随着地震预测研究的不断深入, 将现代统计物理的相关理论和方法应用于地震预测预报领域取得了长足的进展, 这已经成为物理学和地震学之间一个活跃的交叉研究方向。Rundle 等(2003)把统计物理方法应用于地震活动性图像分析, 并对美国加州地区的地震活动进行了预测, 获得了比较好的预测结果。Bowman 和 King(2001)、Yu 等(2006)根据震前断层间相互作用的库仑应力触发关系, 对地震临界区域进行约束, 提出了解决统计区域选择的一个途径。这些方法尽管在一定程度上能够确定大地震发生前的孕震区域的应力及地震活动性演化, 但是难以提取其中的中短期异常变化信息, 因而直接应用在中短期地震预测预报中仍然存在困难。

* 收稿日期: 2024-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2039205); 国家重点研发计划(2018YFE0109700); 2024 年度震情跟踪定向工作(2024010405); 中国地震台网中心青年基金(QNJJ-202304)。

第一作者简介: 于晨(1988-), 工程师, 主要从事地震电磁学方面的研究. E-mail: yuchen@seis.ac.cn.

为了得到一个简单统一且时间相关的地震预测模型,研究人员尝试将多种前兆模型联合应用于地震预测研究,从而实现在空间上向地震危险区域逐渐逼近,在时间上从长期预测向中短期预测的自然过渡。近年来国际合作的地震预测实验室也给出了组合模型方法的研究方案(Zechar, Jordan, 2010),如 Gelfand 等(1976)最早提出使用组合多种模式识别技术提取不同的地震前兆现象;Shebalin 等(2012)尝试不同权重的组合模型方法,为组合速率模型和预警模型提供了方向。本文讨论的多方法组合预测模型(Multi-Method Earthquake Prediction, MMEP),以长、中、短临预报思路为指导,将图像信息(Pattern Informatics, PI)、矩加速释放(Accelerating Moment Release, AMR)、我国学者提出的态矢量(State Vector, SV)和加卸载响应比(Load/Unload Response Ratio, LURR)4种不同时间尺度的预测模型进行合理组合,在近10多年的地震预测实践中取得了较好的效果(马震等, 2020; 余怀忠等, 2020; 于晨, 2022)。

“地震可预测性国际合作研究”(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, CSEP)计划由美国南加州地震中心(South California Earthquake Center, SCEC)主导,针对地震的可预测性以及如何开展地震预测工作的问题进行研究分析,通过全球不同地区的测试中心,开展类似于竞技运动的活动,鼓励地震工作者开发多种不同时间尺度的地震预测模型。目前, CSEP 计划已经由1.0阶段发展到2.0阶段(张盛峰, 张永仙, 2021),近几年依托国家重点研发计划, CSEP 中国检验中心已基本建设完成,开发研制了图像信息(PI)、加卸载响应比(LURR)和态矢量(SV)等预测模块。为了更好地评估 CSEP 中国检验中心的实用性,本文对基于上述3种预测方法的多方法组合预测模型 MMEP 的年度预测结果进行了梳理总结,并采用 CSEP 中国检验中心的 R 值评分模块对年度预测结果进行了评估。

1 MMEP 方法

MMEP 方法的建模思路如下:首先采用图像信息(PI)方法对研究区域进行空间扫描,从中长期时间尺度上找出存在地震活动异常的区域,这些区域是未来可能发生大地震的危险区。然后用加卸载响应比(LURR)和态矢量(SV)对上述异常区的地震趋势进行评估,在中短期时间尺度上优化和筛选危险区,最后通过矩加速释放(AMR)方法对筛选的区域中潜在的地震发生时间和震级进行渐近估计,最终确定“时、空、强”三要素。

地震活动率的变化是潜在应力变化的一种表现形式,PI 扫描技术方法是建立在此基础上的。该方法通过严格的统计检验,提取地震活动状态显著偏离平均状态的区域(显著平静和显著活动地区),即“地震热点”,是一种预测效能较高的中长期地震预测方法。该方法由 Rundle 等(2000)提出, Tiampo 等(2002)为 PI 方法赋予了数学概念,并对其计算过程进行了较为合理的解释,他们的研究结果显示 PI 方法的预测结果比相对强度法(Relative-Intensity, RI)和随机预测更准确,预测的时间尺度为3~10年。

LURR 方法通过识别震源介质的稳定状态来探查大地震的发生,SV 方法可以探查包含震源区的孕震系统的稳定性,而 AMR 方法是基于地震可以被视为临界点的假设提出的。LURR 方法是基于岩石本构关系动态演化提出的预测方法,是对震源区地壳介质破坏规律的重要发现。Yin 等(1995, 2002)研究发现,在大地震之前的数月至数年间,加卸载响应比时间序列会出现明显的异常,这一现象可以被用作预测地震发生的重要前兆规律。SV 方法是由尹祥础等(2004)提出的一种地震预测方法。当包含孕震区介质的系统处于稳定状态时,态矢量变化相对平稳,当大地震临近时,则会出现显著异常变化,4个相关参数时间序列会急剧增加。地震学家发现,存在震前地震能量幂率

加速释放这一规律, Sammis 和 Smith (1999) 对地壳的间歇性临界状态的研究也得到了类似的结果。根据此规律可以将大地震看作一种地壳的临界现象, 而地壳并不是一直处于临界状态。一次大地震发生后, 该地区的地壳将远离临界状态, 之后构造应力的增加又使地壳逐步趋向临界状态, 地壳介质的相关尺度也逐渐增大, 而相关尺度的大小与震级有密切的关系。

2 CSEP 应用进展

2006 年 1 月开始, 美国南加州地震中心发起了 CSEP 计划, 该计划由全球多个国家的众多科学家组成, 该计划的目标是建立虚拟的、分布式的实验室, 在全球各区域或全球尺度进行更为广泛的科学预测实验。CSEP 计划总部位于美国, 日本、欧洲和新西兰已建成 CSEP 分中心并投入使用, 目前中国和冰岛分中心正在积极筹备建设中。2018 年开始, CSEP 专家组开始倡导 CSEP 2.0 阶段的工作, 提出了针对新时期、新形势下的预测检验平台建设的设计要求和解决方案, 并根据当前预测模型和检验方法的发展提出了新的科学问题。在 CSEP 2.0 阶段, 中国依托科技部政府间国际科技创新合作重点专项“中国地震科学实验场的地震可预测性国际合作研究(2018YFE0109700)”, 与南加州地震中心合作建立 CSEP 中国检验中心。

目前, MMEP 模型中的 PI、LURR 和 SV 方法的预测-检验模块已开发完成, 用于震例回溯性检验和实时分析。以 LURR 模块为例(图 1), 在预测模块中, 地震目录作为输入文件, 通过修改震级范围、时间范围、研究区域范围、计算时间窗长和步长和异常阈值等参数, 可以得到对应的 LURR 值异常分布情况。在检验模型中, 输入需要检验的地震目录, 修改预测最小震级和检验日期范围等参数, 得到 LURR 异常的 R 值空间检验结果, 在完成模型计算和 R 值检验后, 平台可以自动产出检验报告。今后, 我国地震工作者将通过

CSEP 中国检验中心, 开发完成 MMEP 预测检验模块, 实现检验报告自动产出。

图 1 LURR 模型预测-检验模块

Fig. 1 Prediction - testing module of LURR model

3 R 值评分方法原理

R 值评分方法是一种目前广泛使用的地震预报效能评价方法自 20 世纪 70 年代至今经过不断改进完善, 在地震年度危险区预报效能评估等工作中发挥了重要的作用。本文采用 R 值评分方法对 MMEP 近几年的结果进行评价。

根据许绍燮(1989)的计算思路, 采用地震报准率和预测的时间或空间占有率之差计算 R 值:

$$R = h - \tau = \frac{N_H}{N_T} - \frac{S_P}{S_T} \quad (1)$$

式中: h 和 τ 分别表示地震报准率和预测区域的空间占有率; 在年度预测检验中, N_H 和 N_T 分别表示本年度报准的地震个数和本年度发生的地震总数; S_P 和 S_T 分别表示预测区的面积和全国国土总面积。

通常认为,当预报的成功率高于随机概率的成功率,即 $R>0$ 时,该预测结果具有一定的预测效能(张国民等,2002)。由于年度危险区的空间形状是不规则的,面积各有不同,为了能够精简 R 值评分方法的计算过程,CSEP中国检验分中心采用 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的网格划分方法进行计算,因此式(1)可修改为:

$$R=h-\tau=\frac{N_H}{N_T}-\frac{N_P}{N_G}$$

(2)

式中: N_P 和 N_G 分别表示地震危险区覆盖的网格数

和中国大陆覆盖的网格数; N_H 为该年度落入MMEP年度危险区网格内的地震个数; N_T 为该年度发生的地震总数。

4 MMEP 年度预测效能检验

本文采用网格划分的 R 值评分方法,对2018—2023年的MMEP年度预测效能进行检验和评价,见表1。

表1 2018—2023 年 MMEP 年度预测效果检验
Tab. 1 Test of the MMEP annual prediction from 2018 to 2023

预测年份	序号	预测地区	预测震级	实发地震	时间/空间/强度	评判
2018 年	1	滇南	6.2	8 月 13 日云南通海 5.0 级	√√√	预测正确
				8 月 14 日云南通海 5.0 级		
				9 月 8 日云南墨江 5.9 级		
	2	滇西北	5.8	12 月 16 日四川西昌 5.1 级	√√√	预测正确
	3	川滇交界东部	6.4	12 月 16 日四川兴文 5.7 级	√√√	预测正确
	4	青藏交界	6.5	8 月 3 日青海治多 5.1 级	√√×	预测震级偏高
	5	南天山西段	6.5	9 月 4 日新疆伽师 5.5 级	√√×	预测震级偏高
				11 月 4 日新疆阿图什 5.1 级		
				12 月 20 日新疆阿克陶 5.2 级		
	6	于田地区	6.0	8 月 4 日西藏日土 5.2 级	√√×	预测震级偏高
				9 月 28 日西藏日土 5.1 级		
2019 年	7	川青藏交界	6.6	5 月 6 日青海称多 5.3 级	√√×	预测震级偏高
	8	渤海湾西段	5.0	—	×××	虚报
	9	辽东半岛	5.2	—	×××	虚报
	10	甘青交界	6.0	—	×××	虚报
	1	滇南	6±	—	×××	虚报
	2	滇西北	6.5±	—	×××	虚报
	3	川滇交界东部	6±	1 月 3 日四川珙县 5.3 级	√√√	预测正确
				6 月 17 日四川长宁 6.0 级		
				6 月 17 日四川珙县 5.1 级		
				6 月 18 日四川长宁 5.3 级		
				6 月 22 日四川珙县 5.4 级		
				7 月 4 日四川珙县 5.6 级		
				9 月 8 日四川威远 5.4 级		
	4	青海北部	5.5±	12 月 18 日四川资中 5.2 级	×××	虚报
				—		

续表1

预测年份	序号	预测地区	预测震级	实发地震	时间/空间/强度	评判	
2019 年	5	南天山西段	6.5 ±	1 月 12 日新疆疏附 5.1 级 10 月 27 日新疆乌什 5.0 级	√√×	预测震级偏高	
	6	西昆仑	6 ±	—	×××	虚报	
	7	川青藏交界	6.5 ±	—	×××	虚报	
	8	辽东半岛	5 ±	—	×××	虚报	
	9	天山中段	6.5 ±	—	×××	虚报	
2020 年	1	滇南	6.0 ±	—	×××	虚报	
	2	川滇藏	6.0 ±	—	×××	虚报	
	3	川东南	6.0 ±	2 月 3 日四川青白江 5.1 级	√√×	预测震级偏高	
	4	青海北部	5.2 ±	—	×××	虚报	
	5	川陕甘交界	5.2 ±	—	×××	虚报	
	6	天山中段	6.5 ±	1 月 16 日新疆库车 5.6 级 3 月 23 日新疆拜城 5.0 级	√√×	预测震级偏高	
	7	南天山西段	6.5 ±	1 月 18 日新疆伽师 5.4 级 1 月 19 日新疆伽师 6.4 级 1 月 19 日新疆阿图什 5.2 级 2 月 21 日新疆伽师 5.1 级 5 月 6 日新疆乌恰 5.0 级 5 月 9 日新疆柯坪 5.2 级	√√√	预测正确	
	8	西昆仑	6.2 ±	6 月 26 日新疆于田 6.4 级	√√√	预测正确	
	9	青藏交界东部	6.5 ±	1 月 25 日西藏丁青 5.1 级	√√×	预测震级偏高	
	10	青藏交界西部	6.5 ±	—	×××	虚报	
	11	松原地区	5.5	—	×××	虚报	
	12	中国台湾	7.2 ±	2 月 15 日台湾花莲 5.4 级 5 月 3 日台东海域 5.4 级 6 月 14 日宜兰海域 5.5 级 7 月 26 日花莲海域 5.5 级 9 月 30 日宜兰海域 5.0 级 12 月 10 日宜兰海域 5.8 级	√√×	预测震级偏高	
	2021 年	1	南天山西段	6 ~ 7	9 月 4 日新疆皮山 5.1 级 9 月 5 日新疆叶城 5.0 级	√√×	预测震级偏高
		2	天山中段	6 ±	3 月 24 日新疆拜城 5.4 级	√√×	预测震级偏高
		3	西昆仑	6 ~ 7	—	×××	虚报
4		西藏南部	6 ~ 7	—	×××	虚报	
5		青藏交界东部	6 ~ 7	3 月 19 日西藏比如 6.1 级	√√√	预测正确	
6		祁连山中东部	6 ±	—	×××	虚报	
7		甘青川交界	6 ±	—	×××	虚报	
8		川滇藏交界	6 ±	—	×××	虚报	
9		川滇交界东部	6 ±	9 月 16 日四川泸县 6.0 级	√√√	预测正确	
10		滇南	6 ±	6 月 10 日云南双柏 5.1 级 12 月 24 日老挝 6.0 级	√√√	预测正确	

续表 1

预测年份	序号	预测地区	预测震级	实发地震	时间/空间/强度	评判
2021 年	11	中国台湾东部沿海	7 ±	1 月 9 日宜兰海域 5.1 级	√√ ×	预测震级偏高
				1 月 17 日台东海域 5.1 级		
				2 月 7 日宜兰海域 5.2 级		
				2 月 9 日宜兰海域 5.3 级		
				3 月 2 日屏东海域 5.3 级		
				4 月 18 日花莲 5.6 级		
				4 月 18 日花莲 6.1 级		
				6 月 11 日花莲 5.3 级		
				7 月 7 日花莲海域 5.3 级		
				7 月 8 日花莲海域 5.1 级		
				7 月 14 日花莲海域 5.2 级		
				8 月 5 日宜兰海域 5.8 级		
				8 月 6 日宜兰海域 5.4 级		
				8 月 6 日花莲 5.1 级		
				9 月 6 日花莲海域 5.2 级		
				10 月 24 日宜兰 6.3 级		
				12 月 30 日花莲海域 5.1 级		
2022 年	1	南天山西段	6.6	7 月 2 日新疆皮山 5.1 级	√√ ×	预测震级偏高
				7 月 3 日新疆阿合奇 5.2 级		
				10 月 16 日新疆巴楚 5.1 级		
				10 月 23 日新疆皮山 5.1 级		
	2	天山中段	6.4	—	× × ×	虚报
	3	小滇西至滇西南	6.6	11 月 19 日云南红河 5.0 级	√√ ×	预测震级偏高
	4	川滇交界东部	6.1	4 月 6 日四川兴文 5.1 级	√√ ×	预测震级偏高
	5	甘青川交界	6.7	6 月 10 日四川马尔康 5.8 级、6.0 级和 5.2 级	√√ ×	预测震级偏高
	6	青藏交界东部	6.1	8 月 14 日青海杂多 5.9 级	√√√	预测正确
	7	祁连山西段	5.9	10 月 19 日青海茫崖 5.5 级	√√√	预测正确
	8	青藏交界西部	6.5	—	× × ×	虚报
	9	西藏南部	6.0	—	× × ×	虚报
	10	川滇藏交界	6.5	1 月 2 日云南宁蒗 5.5 级	√√√	预测正确
				9 月 5 日四川泸定 6.8 级		
				10 月 22 日四川泸定 5.0 级		
	11	西昆仑	6.3	—	× × ×	虚报
	12	中国台湾及东部沿海	6.9	1 月 3 日台湾花莲海域 6.4 级	√√√	预测正确
				2 月 7 日宜兰海域 5.1 级		
				2 月 12 日花莲海域 5.4 级		
				3 月 9 日台东海域 5.1 级		
				3 月 23 日台东海域 6.6 级		
				3 月 23 日花莲 5.7 级		
				3 月 23 日花莲海域 5.2 级		
				3 月 23 日台东海域 5.7 级		
				3 月 24 日台东海域 5.2 级		
				5 月 9 日花莲海域 6.2 级		

续表 1						
预测年份	序号	预测地区	预测震级	实发地震	时间/空间/强度	评判
2022 年	12	中国台湾及东部沿海	6.9	6 月 20 日花莲 5.9 级	√√√	预测正确
				9 月 17 日台东 6.5 级、5.3 级		
				9 月 18 日台东 5.7 级、5.0 级		
				9 月 18 日花莲 6.9 级、5.4 级		
				9 月 19 日花莲 5.7 级		
				10 月 11 日花莲海域 5.6 级		
				12 月 8 日花莲海域 5.1 级		
2023 年	1	南天山西段	6±	11 月 8 日新疆阿图什 5.4 级	√√√	预测正确
				12 月 19 日新疆阿图什 5.5 级		
	2	天山中段	6~7	—	×××	虚报
	3	新疆西藏交界	6±	—	×××	虚报
	4	祁连带西段	5~6	—	×××	虚报
	5	青藏交界	6~7	—	×××	虚报
	6	祁连带东段	6±	12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级	√√√	预测正确
	7	甘青川交界	6±	—	×××	虚报
	8	滇西北地区	6±	5 月 2 日云南隆阳 5.2 级	√√×	预测震级偏高
	9	川滇交界东部	6±	—	×××	虚报
	10	滇南地区	6±	—	×××	虚报
	11	中国台湾及附近海域	6~7	7 月 9 日屏东海域 5.4 级	√√×	预测震级偏高
				10 月 11 日花莲 5.4 级		
				10 月 24 日花莲海域 5.9 级		

注：“±”表示震级上下浮动 0.5 级；“√”表示正确；“×”表示不正确；“虚报”指预测区内及边界未发生 5 级以上地震。

2018—2023 年 MMEP 年度危险区 R 值评分检验结果如图 2 所示。从 2020 年开始，我国地震工作者对中国台湾及附近海域地区进行年度地震趋势分析，图 2a 为不含中国台湾地区的 MMEP 年度危险区 R 值评分结果， R 值评分检验均值约为 0.38，年度预测效能曲线总体平稳，波动幅度不大，2018 年的 R 值最高，约为 0.65。图 2b 为包含了中国台湾地区的 MMEP 年度预测区 R 值评分情况，由于中国台湾及附近海域地震活动较为频繁， R 值评分检验结果均值达到 0.49。

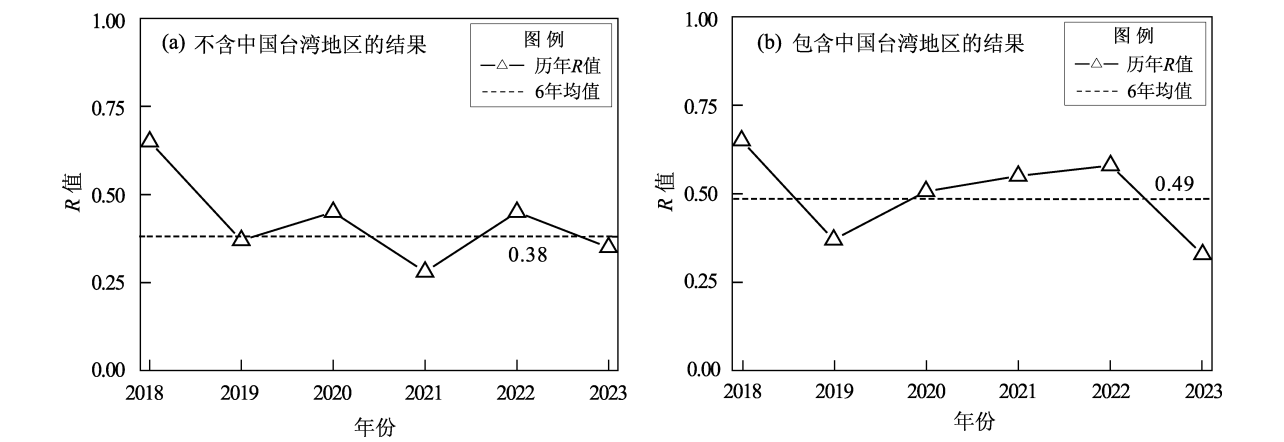


图 2 2018—2023 年 MMEP 年度预测区 R 值评分

Fig. 2 The R -value scores of annual potential earthquake zones predicted by MMEP from 2018 to 2023

5 讨论

MMEP 方法基于 Yu 等 (2006)、Bowman 和 King (2001) 等的研究成果, 将 PI、LURR、SV 和 AMR 这 4 种不同时间预测尺度的方法进行有机的结合, 捕捉孕震过程中异常演化的共性特征。在年度预测过程中, 地震工作者对模型在地震响应的空间尺度上进行改进, 针对不同地区地震活动水平自动设定空间扫描参数; 在时间尺度预测方面, 随着震例的不断积累, 地震工作者会选择合适的预测模型, 对发震时间做出预测。

由表 1 可见, 2018 年度中国大陆共发生 5 级以上地震 16 次, 其中 12 次地震发生在 MMEP 方法给出的年度危险区或附近区域, 预测的 10 个危险区中, 有 7 个发生了显著的地震事件, R 值评分为 0.65。并且对中国大陆西部的预测结果要优于东部——吉林松原 5.7 级地震不在预测区内, 而东部 2 个预测区内没有发生目标地震, 这可能与东部地区的地震活动水平以及地震发生周期有关 (薛艳等, 2020)。针对不同地区, 如何给出合适尺度的时间预测结果, 尚需改进。值得注意的是, 2018 年 2 月 12 日河北永清 4.3 级地震发生在“渤海湾西段 5.0”预测区内, 而西部地区的 10 月 16 日新疆精河 5.4 级和 9 月 12 日陕西宁强 5.3 级地震不在危险区内。梳理周、月会商跟踪资料发现, 天山中段的 $LURR$ 值异常开始于 2018 年下半年, 2018 年年初不具备年度预测的条件。同样, 宁强 5.3 级地震前的 $LURR$ 值异常主要发生在 2018 年 5—7 月, 也不具备年度预测的条件。

2019 年度中国大陆共发生 5 级以上地震 20 次, 其中 10 次地震发生在预测的危险区附近, R 值评分为 0.38, 而该年度最显著的地震事件——四川长宁 6.0 级地震就发生在预测意见给出的“川滇交界东部 6 \pm ”预测区内。进一步分析发现, 长宁 6.0 级地震以及多次 5 级以上地震和四川威远 5.4 级地震均发生在该预测区内。从 $LURR$ 方法的时间序列演化看, 从 2018 年初开始, $LURR$ 值快速增加并在 2018 年年中达到峰值, $LURR$ 值异常持续至长宁 6.0 级地震, 并在震后逐渐回落 (马

震等, 2020), 这表明长宁 6.0 级地震发生前, 震源区介质存在明显的应力累积过程。西藏墨脱 6.3 级地震不在预测区内, 这可能与地震发生的位置较为偏僻, 地震目录不完备有一定关系。总体来看, 中国大陆西部地区的预测结果优于东部地区。

2020 年度中国大陆及台湾地区附近海域共发生 5 级以上地震 28 次, 其中 17 次发生在 MMEP 方法年度预测区及附近, R 值评分为 0.51。2020 年 1 月 19 日新疆伽师 6.4 级和 6 月 26 日新疆于田 6.4 级地震分别发生在用 MMEP 方法得出的“南天山西段 6.5 \pm ”和“西昆仑 6.2 \pm ”危险区内。于晨等 (2020)、余怀忠等 (2020) 和刘月等 (2023) 研究发现, 于田及其附近地区存在明显的 PI 热点异常, 异常持续时间长、范围大; $LURR$ 扫描结果显示, 2018 年于田地区存在异常, 但并不显著, 2018 年 12 月—2019 年 11 月异常明显增强, 随后开始减弱, 2020 年 6 月 26 日于田发生 6.4 级地震。正是根据 $LURR$ 值的时空演化特性并结合 PI 异常分布, 地震工作者在 2020 年度地震趋势预测中确定了新疆、西藏交界处的地震危险区。7 月 23 日西藏尼玛 6.6 级地震并不在地震趋势预测中给出的危险区内, 震后回溯性研究发现在震前 3 个月震中附近出现 $LURR$ 值异常, 该异常可能与该地区构造环境有关, 因此不具备年度预测条件。

2021 年度中国大陆及台湾地区附近海域发生 5 级以上地震 37 次, 其中 24 次发生在 MMEP 方法年度预测区及附近, R 值评分为 0.52。5 月 22 日青海玛多 7.4 级地震为本年度最大震级地震, 位于地震趋势预测中给出的“甘青川 6 \pm ”和“青藏交界东部 6~7”2 个预测区中间。青海、四川、西藏交界地区是震前 3 年使用 MMEP 方法得出需重点关注的存在发生 6.5 级以上强震的地区, 并且在 2021 年将青海、西藏交界东部的震级水平由前 2 年的“6.5 \pm ”调整为“6~7”。云南漾濞 6.4 级地震发生在“川滇藏交界 6 \pm ”预测区南部地区, 距离预测区大约 60 km。本年度由于 $LURR$ 值异常分布面积的变化, 研究人员缩小了该地区的预测区范围, 同样是根据 $LURR$ 值异常回落变化, 2021 年将地震预测区从连续跟踪 3 年的祁连山地震带的西部地区调整到东部地区, 因此未能预测到青海

茫崖5.8级和甘肃阿克塞5.5级地震。*LURR*值异常回落所预示的预测时间尺度究竟是多大,还需要对已有震例进行系统性回溯研究。

2022年度全国共发生5级以上地震53次,其中35次发生在MMEP年度预测区内及边缘,*R*值评分为0.53。9月5日四川泸定6.8级地震位于“川滇藏交界M6.5”预测区东侧,距离预测区约80 km。研究人员在周、月会商跟踪过程中发现,三岔口南部地区自2021年12月1日之后就存在*LURR*值异常,异常沿鲜水河断裂边缘呈北西向分布,2022年7月异常向震源区扩展,异常空间展布逐渐增大,并一直持续到泸定6.8级地震。泸定地震后,震中附近地区的*LURR*值开始减弱并逐渐消失(于晨,2022)。此外,该年度祁连山地震带地震活动非常活跃,虽然地震带的东段和西段均存在PI异常,但年度预测时*LURR*值异常集中在西段,因此尚不具备对青海门源6.9级、德令哈6.0级地震做出年度预测的条件。

2023年度全国共发生16次5级以上地震,其中7次发生在预测意见给出的预测区内及边缘,*R*值评分为0.33。该年度中国大陆地区5级以上地震活动明显偏弱,大陆东部及附近海域地震活动有所增强,这也增加了本年度预测的难度。值得注意的是,新疆沙雅6.1级和温宿5.1级地震位于年度预测意见给出的“天山中段6~7”危险区西南部约50 km处。在做年度预测时,震源区*LURR*值异常不显著,但地震发生前*LURR*值异常呈现由北向南扩展的趋势性变化。在回溯性分析中发现,震前一周的*LURR*值计算结果显示,新疆沙雅6.1级和温宿5.1级地震发生在*LURR*值异常区域的边缘,这为今后在中短期时间尺度上预测地震的震地点提供了新的思路。

6 结论

本文介绍了CSEP中国检验中心已开发完成的PI、*LURR*、SV等预测模块,采用CSEP中国检验中心的*R*值评分模块,对基于上述方法的MMEP模型2018—2023年度全国预测意见的效能进行了评估,得到以下结论:

(1) 2018—2023年度MMEP模型预测结果的

*R*值评分均值为0.3~0.4,年度预测效能波动较小,其中2020—2022年连续3年*R*值超过0.5。

(2) 中国大陆西部地区的预测结果要优于东部地区。在年时间尺度上对2019年四川长宁6.0级、2020年新疆伽师6.4级以及2020年于田6.4级地震进行了预测,在中短期时间尺度对2022年四川泸定6.8级地震进行了预测,预测给出的“时、空、强”三要素基本正确。2018年河北永清4.3级地震发生在“渤海湾西段5.0”预测区内,但预测震级偏高。

(3) 针对不同地区,如何选择合适的预测时间尺度和空间扫描参数,对预测效能的高低起到重要的作用,因此在今后的预报实践中需对预测结果进行梳理和总结,不断完善各方法的时空预测参数。

(4) MMEP模型中的PI、*LURR*和SV3种方法的预测检验模块已在CSEP中国检验中心开发完成,计划未来将引入完整的MMEP预测检验模块,实现检验报告自动产出等功能。

本研究使用了CSEP中国检验中心*R*值评分模块,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 陈运泰. 2009. 地震预测:回顾与展望[J]. 中国科学:地球科学,39(12):1633-1658.
- Chen Y T. 2009. Earthquake prediction: retrospect and prospect[J]. Scientia Sinica Terrae,39(12):1633-1658. (in Chinese)
- 刘月,田勤俭,张永仙,等. 2023. 于田地震强震前加卸载响应比异常及强震复发间隔[J]. 地球物理学报,66(2):616-625.
- Liu Y, Tian Q J, Zhang Y X, et al. 2023. Load-Unload Response Ratio anomalies before the Yutian strong earthquakes and its earthquake recurrence interval estimation[J]. Chinese Journal of Geophysics,66(2):616-625. (in Chinese)
- 罗兰格. 2015. 再谈地震预报*R*值评分法[J]. 华北地震科学,33(4):66-68.
- Luo L G. 2015. Talk on the *R* value method for earthquake prediction[J]. North China Earthquake Sciences, 33(4):66-68. (in Chinese)
- 马震,于晨,张小涛,等. 2020. 2019年6月17日长宁*M_s*6.0地震前地震活动和水位的加卸载响应比异常研究[J]. 中国地震,36(3):550-560.
- Ma Z, Yu C, Zhang X T, et al. 2020. Evolutions of *LURR* anomaly based on seismicity and ground water level data before the June 17, 2019

- $M_s6.0$ Changning earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, 36(3):550–560. (in Chinese)
- 石耀霖, 刘杰, 张国民. 2000. 对我国 90 年代年度地震预报的评估[J]. *中国科学院研究生院学报*, 17(1):63–69.
- Shi Y L, Liu J, Zhang G M. 2000. The evaluation of Chinese annual earthquake prediction in the 90s[J]. *Journal of Graduate School, Academia Sinica*, 17(1):63–69. (in Chinese)
- 许绍燮. 1989. 地震预报方法实用化研究文集:地震学专辑[M]. 北京:地震出版社.
- Xu S X. 1989. Collection of practical research on earthquake prediction method: Seismology album [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 薛艳, 姜祥华, 刘桂萍. 2020. 华北地区强震活动状态研究[J]. *地震*, 40(2):1–17.
- Xue Y, Jiang X H, Liu G P. 2020. Active state and trend on strong earthquake in North China[J]. *Earthquake*, 40(2):1–17. (in Chinese)
- 尹祥础, 余怀忠, 张永仙, 等. 2004. 态矢量——分析地震活动性的一种新方法[J]. *中国地震*, 20(1):73–79.
- Yin X C, Yu H Z, Zhang Y X, *et al.* 2004. State Vector-to analysis seismicity[J]. *Earthquake Research in China*, 20(1):73–79. (in Chinese)
- 于晨, 王淑艳, 苑争一, 等. 2020. 2020 年 6 月 26 日于田 $M_s6.4$ 地震前 Benioff 应变和地电场加卸载响应比异常研究[J]. *中国地震*, 36(3):417–426.
- Yu C, Wang S Y, Yuan Z Y, *et al.* 2020. LURR to Benioff strain and geoelectric field before Yutian $M_s6.4$ earthquake of June 26, 2020[J]. *Earthquake Research in China*, 36(3):417–426. (in Chinese)
- 于晨. 2022. 基于加卸载响应比(LURR)方法回顾 2022 年 9 月 5 日泸定 $M_s6.8$ 地震预测过程[J]. *地震地磁观测与研究*, 43(6):125–130.
- Yu C. 2022. A review of prediction process based on LURR before the Luding $M_s6.8$ earthquake on September 5, 2022[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 43(6):125–130. (in Chinese)
- 余怀忠, 于晨, 张小涛. 2020. 2020 年 6 月 26 日于田 $M_s6.4$ 地震前的多重地震参数异常研究[J]. *内陆地震*, 34(3):207–214.
- Yu H Z, Yu C, Zhang X T. 2020. Study on multiple seismic parameter anomalies before Yutian $M_s6.4$ earthquake on June 26th, 2020[J]. *Inland Earthquake*, 34(3):207–214. (in Chinese)
- 张国民, 刘杰, 石耀霖. 2002. 年度地震预报能力的学科评价[J]. *地震学报*, 24(5):525–532.
- Zhang G M, Liu J, Shi Y L. 2002. A scientific evaluation of annual earthquake prediction ability[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 24(5):525–532. (in Chinese)
- 张盛峰, 张永仙. 2021. “地震可预测性国际合作研究”——1.0 阶段工作理念及成果[J]. *地震*, 41(4):203–217.
- Zhang S F, Zhang Y X. 2021. Collaboratory for the study of earthquake predictability-working philosophy and achievements of CSEP 1.0[J]. *Earthquake*, 41(4):203–217. (in Chinese)
- Bowman D D, King G C P. 2001. Accelerating seismicity and stress accumulation before large earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, 28(21):4039–4042.
- Cao T, Aki K. 1984. Seismicity simulation with a mass-spring Model and a displacement hardening-softening friction law[J]. *Pure Appl Geophys*, 122(1):10–24.
- Gelfand I M, Guberman S A, Keilis-Borok V I, *et al.* 1976. Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California[J]. *Phys Earth and Planet Inter*, 11(3):227–283.
- Rundle J B, Levin W, Tiampo K, *et al.* 2000. Liner pattern dynamics in nonlinear threshold system[J]. *Phys Rev E*, 61(3):2418–2431.
- Rundle J B, Turcotte D L, Shcherbakov R, *et al.* 2003. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault system[J]. *Rev Geophys*, 41(4):1019–1049.
- Sammis C G, Smith S W. 1999. Seismic cycles and the evolution of stress correlation in cellular automation models of finite fault networks[J]. *Pure Appl Geophys*, 155(2):307–334.
- Shebalin P, Narteau C, Holschneider M. 2012. From alarm-based to rate-based earthquake forecast models[J]. *Bull Seism Soc Am*, 102(1):64–72.
- Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S A, *et al.* 2002. Pattern dynamics and forecast methods in seismically active regions[J]. *Pure Appl Geophys*, 159(10):2429–2467.
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, *et al.* 1995. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, 145(3):701–715.
- Yin X C, Mora P, Peng K Y, *et al.* 2002. Load-Unload Response Ratio and Accelerating Moment/Energy Release critical region scaling and earthquake prediction[J]. *Pure Appl Geophys*, 159(10):2511–2523.
- Yin X C, Yu H Z, Kukshenko V, *et al.* 2004. Load-Unload Response Ratio (LURR), Accelerating Energy Release (AER) and State Vector evolution as precursors to failure of rock specimens[J]. *Pure Appl Geophys*, 161:2405–2436.
- Yu H Z, Shen Z K, Zhu Q Y, *et al.* 2006. Increasing critical sensitivity of the Load/Unload Response Ratio before large earthquake with identified stress accumulation pattern[J]. *Tectonophysics*, 428(1–4):87–94.
- Zechar J, Jordan T. 2010. The area skill score statistic for evaluating earthquake predictability experiments[J]. *Pure Appl Geophys*, 167(8–9):893–906.

Application of Multi-Method Earthquake Prediction in CSEP and Testing of Prediction Efficiency

YU Chen¹, HAN Ying¹, ZHANG Yongxian², ZHANG Xiaotao¹, YU Huaizhong¹

(1. *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*)

(2. *Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

Abstract

In recent years, dependent on the national key research and development program, the Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) initiated by the Southern California Earthquake Center has been transplanted to China. The CSEP – China center has been established, and prediction modules such as Pattern Informatics (PI), Load/Unload Response Ratio (LURR), and State Vector (SV) have been developed. In order to better evaluate the practicability of CSEP – China center, the annual prediction results of the Multi – Method Earthquake Prediction (MMEP) based on the above three prediction methods are summarized. Furthermore, the R – value scoring module of CSEP – China center is used to evaluate the annual prediction results. The results show that: (1) The R – value score of MMEP annual prediction results is in the range of 0.3 – 0.4, and the annual prediction efficiency has little fluctuation; (2) The prediction results in the western region of Chinese mainland are better than those in the eastern region. Among them, the annual prediction of the Changning 6.0 earthquake in Sichuan, the Jiashi 6.4 earthquake and the Yutian 6.4 earthquake in Xinjiang, and the medium – short term prediction of the Luding 6.8 earthquake in Sichuan are correct. (3) For different regions, how to give the appropriate scale of time prediction results needs to be improved.

Keywords: Multi-Method Earthquake Prediction (MMEP); CSEP; Load/Unload Response Ratio; R -value test; prediction test