

李泽平,余怀忠,杨志高,等. 2025. 基于加卸载响应比的前震识别方法应用及实例检验[J]. 地震研究, 48(2): 220–228, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0023.

Li Z P, Yu H Z, Yang Z G, et al. 2025. Test and application of the foreshock identification method based on the Load/Unload Response Ratio[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 220–228, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0023.

基于加卸载响应比的前震识别方法应用及实例检验^{*}

李泽平^{1,2}, 余怀忠^{3*}, 杨志高³, 张靖雪³

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430071;

3. 中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 为了验证改进的加卸载响应比方法在前震识别中的有效性, 对基于该方法开发的前震识别系统自动产出的地震预测结果进行整理分析。统计 2021 年 10 月—2024 年 4 月中国大陆西部地区 190 次 4 级以上非前震地震, 发现处于固体潮加载阶段的地震占比为 35.8%, 卸载阶段占比更大, 为 64.2%。统计了 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 6.4 级地震的 4 次前震、2021 年 12 月 24 日老挝 6.0 级地震的 2 次前震和 2022 年 6 月 10 日四川马尔康 6.0 级地震的 3 次前震的固体潮的加卸载状态, 发现所有前震均在固体潮加载阶段发生。结合前震判定和震后趋势分析的“交通灯”模型, 对 2024 年 4 月 10 日新疆拜城 5.6 级震群、1 月 23 日新疆乌什 7.1 级余震序列以及 4 月 3 日台湾花莲 7.3 级地震的 2 次强余震 (6.3 级、6.2 级) 的加卸载判定结果进行研究, 并对原震区后续强震危险性进行了分析, 结果显示加载地震后发生更强地震的情况与后续实际地震发震情况较为符合。通过 R 值评分和概率增益分析可知, 在 95% 置信度下, $R > R_0$ 、概率增益 $Gain > 1$, 表示基于 LURR 的前震识别方法能够通过显著性检验, 并且有较好的预测效能, 说明该方法适用于中国大陆西部地区震后趋势的实时判定。

关键词: 加卸载响应比; 固体潮; 前震; 震后趋势分析; 地震预测

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)02-0220-09

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0023

0 引言

地震预报是地震学领域的一个挑战, 也是世界性难题。地震学者在孕震模式、预测方法、地震前兆、实验研究等方面做了很多工作在地震孕育过程解释方面, 梅世蓉 (1995) 提出了板内强震孕育的固体模式; 张国民和李丽 (2003) 建立了大陆地震震源过程模型; 马瑾和郭彦双 (2014) 通过岩石实验提出了地震亚失稳理论。在地震预测方法方面, Sykes (1971, 1978) 提出了适合于地震长期预报的地震空区法; Rundle 等 (2003) 提出了适用于地震中期预报的地震活动性

图像法; Felzer 和 Brodsky (2006)、Mallman 和 Parson (2008) 提出了“应力影区法”; 姚琪等 (2023) 开发了一种基于数值模拟和地震活动性统计的混合地震预测模型。

地震短临预报主要依赖于地震前兆。在地震孕育过程中, 地应力的变化会引起震源及其附近物质发生变化, 因此常常会出现一些异常, 如地壳形变异常, 地震活动性异常, 地电、地磁等地球物理异常, 地下水位、水温、水化学等地下流体异常 (赵永红等, 2017)。如 Yu 等 (2023) 观测到了 2022 年青海门源 $M_s 6.9$ 地震前的地下水位异常; 马玉川等 (2022) 通过 1976 年唐山 7.8 级地震发震断层附近的地下水位观测资料, 分析了

^{*} 收稿日期: 2024-05-06.

基金项目: 中国地震局震情跟踪任务 (CEA-ZQGS-202501023); 国家自然科学基金地震科学联合基金 (U2039205).

第一作者简介: 李泽平 (1999-), 助理工程师, 主要从事地震预测理论研究. E-mail: lzp19990909@163.com.

通信作者简介: 余怀忠 (1975-), 研究员, 主要从事地震孕育机理和预测理论研究. E-mail: yuhz750216@sina.com.

唐山 7.8 级地震前后的地下水位变化与地震成核的关系。这些研究表明，采用适当的方法可以识别震前异常。但是地电、地磁、地下水位等观测数据受人类活动、自然环境、仪器灵敏度等的影响较大，信噪比较低，数据质量较差，异常信号很难被捕捉和识别，而且目前的异常识别方法大都是基于统计分析，缺少一定的物理机理。

在所有的地震前兆中，前震活动最为明显，具有显著的时空丛集性，可捕捉的信息较多，在地震预测研究中有较好的应用潜力，是目前短临地震预报最有效的指标之一（蒋海昆，周少辉，2020；薛艳等，2021）。Yu 等（2022）提出了基于加卸载响应比的前震识别方法，该方法具有明确的物理意义；李泽平等（2024）使用该方法对 2000 年以来川滇地区 6 级以上地震的 4 级前震以及近 10 年来该地区 4 级以上非前震的加卸载状态开展分析，发现前震倾向于在固体潮加载阶段发生，而非前震更易发生在固体潮卸载阶段，并发展了用于前震判定和震后趋势分析的“交通灯”模型。 R 值评分与概率增益分析显示，该方法具有良好的预测效能（Yu *et al.*, 2022；李泽平等，2024）。但是，以上研究都属于回溯性研究，并不是对某一地区未来某一时段地震发震概率的预测，没有真正运用于地震趋势的实时跟踪，这些方法是否适用于其他地区，还有待进一步验证。

2021 年以来，中国地震台网中心实现了 4 级以上地震震源机制解的快速产出（震后 15 min 内），解决了数据更新的滞后性问题，这使得运用基于加卸载响应比的前震识别方法动态跟踪震后趋势成为可能。目前，地震预测预报研究人员基于中国地震台网中心的震源机制解数据库，开发出了相应的前震分析系统，实现了实时分析和预测功能。本文对 2021 年 10 月—2024 年 4 月该系统产出的实时分析结果进行了梳理，对具有代表性的前震的加卸载状态和 2024 年 3 次典型的地震序列的震后趋势进行了分析，验证该方法的有效性，特别是在我国西部地区的适用性。

1 研究方法

1.1 加卸载响应比的定义

加卸载响应比理论（Load/Unload Response

Ratio, LURR）是基于岩石本构关系动态变化提出的一种中短期地震预测方法（尹祥础等，1994），该方法通过固体潮加载和卸载过程响应量物理性质的差别，来衡量岩石等非均匀脆性介质的损伤程度（刘月等，2023）。如果用 X 表示响应量，可以将其定义为：

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (1)$$

式中： ΔR 和 ΔP 分别表示岩石介质的响应增量和载荷增量。

加卸载响应比 Y 可以定义为：

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (2)$$

式中：“+”和“-”代表加载和卸载过程。当岩石介质处于弹性阶段时， $X_+ = X_-$ ， $Y = 1.0$ ；进入损伤阶段后， $X_+ > X_-$ ， $Y > 1.0$ 。

1.2 前震与主震的触发关系

Yu 等（2006）研究表明，当断层面的构造应力较高，发震断层处于临界载荷时，潮汐应力才会对地震产生调制作用。在这个阶段，任何微小的应力扰动，都可能促使区域应力积累达到临界值，从而更容易触发后续地震。每一个地震都有可能是后续更大地震的前震（Helmstetter, Sornette, 2003），而对于前震来说，在潮汐加载阶段，潮汐应力与构造应力方向相同，二者再叠加上前震破裂触发的应力，使得库仑破坏应力（CFS）相对更高，更容易触发后续地震；反之，在潮汐卸载阶段，潮汐应力对库仑破坏应力起到削弱作用，不易触发地震。同时，震级较大的前震，释放的能量也较大。所以加载阶段的大震级地震更容易触发后续地震事件（李泽平等，2024）。

1.3 前震加卸载判断

前震所处的加载和卸载阶段可以用构造优选滑动方向上潮汐诱发的库仑破坏应力的变化量来决定，可表示为潮汐有效剪应力在构造有效剪应力方向上的投影（Yu *et al.*, 2022）：

$$\Delta CFS \approx \tau' \cdot \frac{u}{|u|} \quad (3)$$

式中： u 为断层面上沿构造优选方向的滑动矢量

(即构造有效剪应力方向); τ' 为潮汐有效剪应力。潮汐有效剪应力的详细模型和计算方法具体见 Yu 等 (2020) 研究。

通过 ΔCFS 的变化率确定加载和卸载阶段, 可表示为:

$$p = \frac{d}{dt} \left(\Delta \tau' \cdot \frac{u}{|u|} \right) \quad (4)$$

式中: $p > 0$ 表示加载; $p < 0$ 表示卸载。

当一个能量较大的地震发生后, 可将其视为一个潜在前震, 通过上述方法判断其所处的加卸载阶段, 进而再分析后续发生更强地震的可能性。

1.4 前震判定模型

为了方便使用基于 LURR 的前震识别方法开展地震短临预报实践, Yu 等 (2022) 和李泽平等 (2024) 参考 Gulia 和 Wiemer (2019) 的研究结果, 发展了一种用于前震识别和震后趋势分析的“交通灯”模型 (图 1): 该模型用绿色、黄色和红色代表 3 种警报状态, 指示后续更强地震发生的危险程度。地震发生后, 基于 LURR 的前震识别系统会自动获取该地震震源机制解数据, 判定地震加卸载状态, 结合“交通灯”模型产出判定意见:

(1) 如果地震发生于固体潮卸载过程中, 则表明原震区可能偏离临界状态, 预测后续发生更强地震的可能性低于平时背景地震活动水平, 较为安全, “交通灯”亮绿色。

(2) 如果地震发生在固体潮加载过程中, 原震区后续有一定发生更强地震的概率, 相对于泊松分布, 具有一定的显著统计性, 概率增益为 2.2;

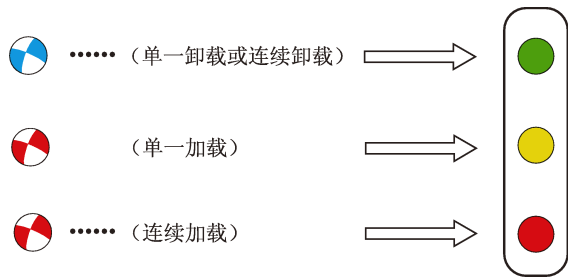


图 1 前震识别和震后趋势分析的“交通灯”模型 (据 Yu *et al.*, 2022 修改)

Fig. 1 “Traffic light” model for foreshock determination and post-earthquake trend analysis (according to Yu *et al.*, 2022)

后续需要进一步关注同等大小地震的可能, “交通灯”亮黄色 (李泽平等, 2024)。

(3) 如果发生单次加载地震后, 又发生单次或多次的加载地震, 构成连续加载, 则原震区后续发生更强地震的可能性较大, 相对于泊松分布, 具有较高的显著统计性, 概率增益为 3.4, “交通灯”亮红色 (李泽平等, 2024)。

综上, 当 4 级以上显著地震发生后, 结合地震所处的加卸载状态, 使用“交通灯”模型动态监测原震区的应力水平, 从而对震后趋势开展实时分析。

2 应用实例

2.1 前震选取原则

选取主震前 2 个月、震中 20 km 范围内发生的 4.0 级以上地震作为前震。按照 Jones 和 Molnar (1979)、Rundle 等 (2002) 的观点, 前震震级与主震震级差为 2; 在时间尺度上, 梅世蓉等 (1993) 选取震前 40 d, 而中国地震局在地震预测实践中, 通常认为短期异常预测时间尺度为 3 个月 (Yu *et al.*, 2022), 本文兼顾二者的研究结果, 选择主震前 2 个月为前震统计的时间尺度。

2.2 研究内容及数据

本文基于前震识别系统, 对 2021 年 10 月—2024 年 4 月我国大陆西部地区 ($20^{\circ} \sim 50^{\circ}N$, $70^{\circ} \sim 108^{\circ}E$) 共 190 次 4 级以上非前震地震所处的固体潮加卸载状态进行了统计, 作为对比, 对该区域前震的加卸载状态也进行了统计, 验证使用该方法基于前震判定震后趋势的有效性。前震分析系统使用的震源机制解数据来自于中国地震台网中心。

2.3 非前震地震所处的固体潮加卸载阶段检验

图 2 显示, 190 次 4 级以上非前震地震中, 发生在固体潮加载阶段的有 68 次, 占比 35.8%; 发生在卸载阶段的有 122 次, 占比 64.2%。李泽平等 (2024) 对 2009 年 1 月 1 日—2022 年 10 月 31 日川滇地区 ($20^{\circ} \sim 35^{\circ}N$, $96^{\circ} \sim 106^{\circ}E$) 的 4 级以上非前震地震的加卸载占比情况进行了统计, 384 次地震中有 127 次发生在加载阶段, 占比 33%, 257 次发生在卸载阶段, 占比 67%, 与本文的统计结果相近, 证明非前震更倾向于在固体潮卸载阶段发生。

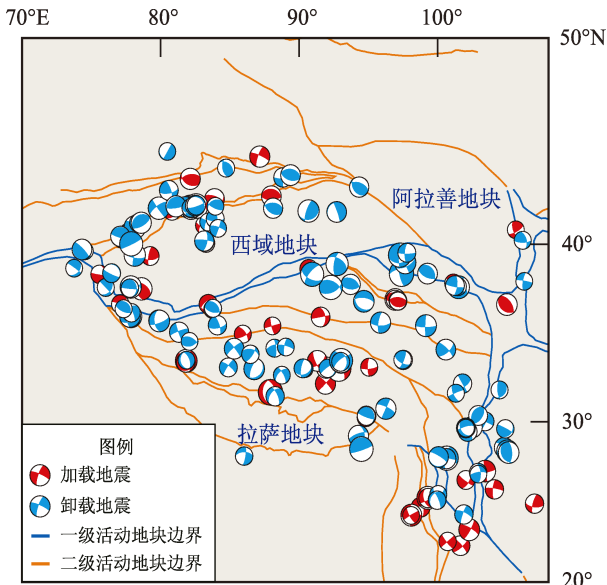


图 2 2021 年 10 月—2024 年 4 月我国大陆西部地区非前震地震的加卸载状态分布

Fig. 2 Loading and unloading distribution of non-foreshocks in the western region of the Chinese mainland from Oct. , 2021 to Apr. , 2024

2.4 前震地震所处的固体潮加卸载阶段检验

为了与非前震计算结果进行对比，本文对前震分析系统产出的 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 6.4 级地震的 4 次前震、2022 年 6 月 10 日四川马尔康 6.0 级地震的 3 次前震的加卸载情况进行了统计整理（表 1、图 3）。

漾濞 6.4 级地震发生前的 3 d 内，有较为明显的前震活动，包括 4 次 4 级以上前震，震级分别是 4.2、4.4、4.2 和 5.6 级，发震断层类型为右旋走滑。整理前震识别系统的产出结果发现，4 次前震均发生在固体潮加载阶段。

马尔康 6.0 级地震前 1 小时之内发生了 3 次前震，震级分别为 5.8、4.1 和 4.4 级。马尔康 6.0 级地震序列空间分布较为密集，整体分布于松岗断裂北东侧，均为走滑型破裂事件，且 3 次前震也都在固体潮加载阶段触发。

2021 年 12 月 24 日老挝境内发生了 6.0 级地震。从系统产出结果得到，主震前的 2 次 4.8、4.6 级前震均发生在固体潮加载阶段。

表 1 漾濞 6.4 级、马尔康 6.0 级、老挝 6.0 级地震序列的前震震源机制解及加卸载状态

Tab. 1 Focal mechanism solutions of the foreshocks of the Yangbi M_s 6.4 earthquake, the Maerkang M_s 6.0 earthquake and the Laos M_s 6.0 earthquake, and the loading or unloading states of the stress coinciding with the foreshocks

地震序列	发震时间 年-月-日 时:分:秒		震中位置		M_s	震源机制解			震源深度/ km	加/卸载 赋值
			$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$		走向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	滑动角/ $(^{\circ})$		
漾濞 6.4 级地震	2021-05-18	21:39:35	25.65	99.93	4.2	308	82	162	8	1
	2021-05-19	20:05:56	25.66	99.92	4.4	312	65	-174	8	1
	2021-05-21	20:56:02	25.63	99.93	4.2	27	58	-45	8	1
	2021-05-21	21:21:25	25.63	99.92	5.6	306	81	-166	10	1
	2021-05-21	21:48:34	25.67	99.87	6.4	45	84	-3	8	—
马尔康 6.0 级地震	2022-06-10	00:03:09	32.27	101.82	5.8	325	82	-13	10	1
	2022-06-10	00:06:44	32.26	101.79	4.1	149	77	28	10	1
	2022-06-10	00:21:17	32.28	101.79	4.4	152	71	19	10	1
	2022-06-10	01:28:34	32.25	101.82	6.0	151	74	10	13	—
老挝 6.0 级地震	2021-11-16	13:22:47	22.31	101.68	4.8	40	80	15	7	1
	2021-11-16	15:54:47	22.31	101.69	4.6	110	90	-175	7	1
	2021-12-24	21:43:21	22.33	101.69	6.0	303	80	170	8	—

注：表“1”代表加载；“-1”代表卸载；“—”表示没有作判断。

由上述 3 次震例分析结果可知，前震更倾向于在固体潮加载阶段发生，这与本文 1.2 节的分析相符。在地震孕育前期，区域应力积累较少，地壳介质处于相对稳定状态，由于块体之间的碰撞挤

压等构造活动，孕震区应力逐渐积累到临界的高值状态，此时任何微小的应力扰动都可能导致系统失稳。发生于潮汐加载阶段的地震对合应力起增强的作用，更容易触发后续地震（李泽平等，

2024)。地震触发后,区域应力会有一定程度的释放,该区域逐渐进入下一个地震孕育周期。

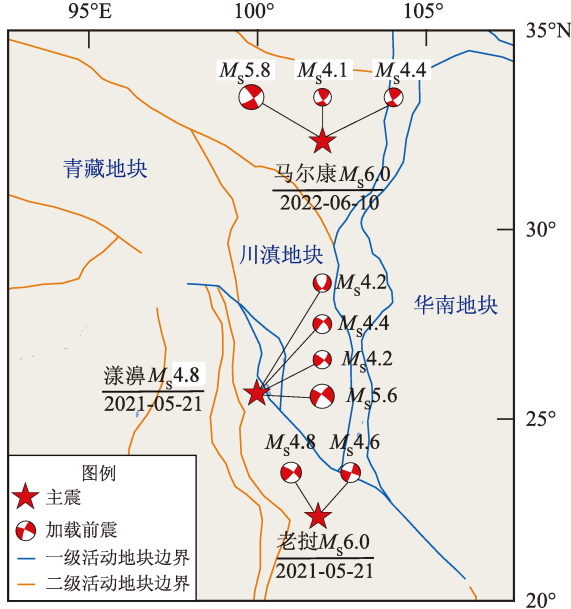


图3 漾濞6.4级、马尔康6.0级、老挝6.0级地震序列的前震加卸载状态分布

Fig. 3 Distribution of the foreshocks of the Yangbi $M_s6.4$ earthquake, the Maerkang $M_s6.0$ earthquake, the Laos $M_s6.0$ earthquake coinciding with the loading or unloading states of the stress

2.5 概率增益分析

为了检验前震判定的显著度,本文进行了概率增益分析。概率增益定义为(蒋长胜等,2011):

$$Gain = \frac{h}{\tau} \quad (5)$$

式中: h 为标准率; τ 为虚报率。 $Gian > 1$, 表示异常的出现有助于地震发生; $Gian < 1$, 表示异常的出现与地震发生与否无关,甚至反相关。

由于前震分析系统运行时间较短,积累的前震震例不多,本文计算了预报结果为无震条件下基于 LURR 的前震分析方法的概率增益。如果预报结果为无震,非前震发生于卸载阶段,则为报准;如果预报结果为无震,前震发生于卸载阶段则为虚报。非前震共有 190 次,卸载阶段的地震有 122 次,报准率 $h = 122/190$;前震都发生于加载阶段,因此虚报率 $\tau = 0$ 。在 95% 的置信度下,相应的 R_0 约为 0.06, R 值评分为 0.64, $R > R_0$, 远超背景概率; $Gain > 1$, 表明具有较高的

统计显著性。随着今后前震震例的积累, $Gain$ 的值会有所下降。

R 值评分与概率增益分析结果显示,该方法在我国西部地区具有良好的预测效果。

3 震后趋势分析

本文统计了 2024 年 4 月 10 日新疆拜城 5.6 级震群、2024 年 1 月 23 日新疆乌什 7.1 级地震余震序列以及 2024 年 4 月 3 日中国台湾花莲 7.3 级地震的 2 次强余震(6.3 级、6.2 级)的加卸载情况,并对原震区发震后未来 2 个月的地震危险性进行分析,这 3 次地震序列中 4 级以上地震的震源机制解及所处的加卸载状态详见表 2。

对于新疆拜城 5.6 级震群(表 2),总共发生了 8 次 4.0 级以上地震,其中加载地震有 6 次,卸载地震有 2 次。3 月 14 日 4.5 级加载地震发生后,触发了 4 月 7 日 5.4 级地震,2 次加载地震破裂产生的应力加速了震源区介质的损伤演化,即使在固体潮卸载阶段,依然触发了 4 月 7 日 4.2 级固体潮卸载阶段地震。由于此次卸载地震震级较小,释放能量较少,不足以抵消前 2 次加载地震释放的能量,因此在 4 月 8—11 日先后连续触发了 5.1、4.8、5.6 和 4.5 级加载地震。4 月 17 日 4.7 级固体潮卸载阶段地震触发后,原震区应力水平有一定的下降,但加载地震较多。表明该区域后续仍有一定概率发生更强地震(图 4)。

2024 年 1 月 23 日新疆乌什发生 7.1 级地震,地震后 2 个月内,在震中附近又连续发生了 15 次余震,最大余震震级为 5.6 级(表 2)。此次地震发生在固体潮加载阶段,地震释放能量巨大,在震后 6 个小时内连续发生了 5 次余震,均发生在固体潮加载阶段;随后又在卸载阶段发生了 2 次余震,对区域应力起到一定的削弱作用,但仍然不足以抵消全部应力,之后 2 个月内,加卸载地震交替发生,应力逐渐释放,地震活动逐渐趋于平稳。以上表明该区域后续发生更强地震的可能性较低(图 4)。

2024 年 4 月 23 日台湾花莲连续发生 2 次强震(6.3 级、6.2 级)的发震时间间隔不到 10 分钟。这两次地震均是 2024 年 4 月 3 日台湾花莲 7.3 级地震的余震。在这 2 次地震前 6 小时内,连续发生了 6 次 4 级以上中强地震(表 2)。笔者运用基于

表 2 2024 年 3 次地震序列中 4 级以上地震的震源机制解及加卸载状态

Tab. 2 Focal mechanism solutions and the loading or unloading states of the $M \geq 4.0$ earthquakes of three earthquake sequences in 2004

地震序列	发震时间		震中位置		M_S	震源机制解			震源深度/ km	加/卸载 赋值
	年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$		走向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	滑动角/ $(^{\circ})$		
新疆拜城地震	2024-03-14	16:36:22	41.89	82.30	4.5	80	65	60	17	1
	2024-04-07	16:46:18	41.94	82.14	5.4	205	55	65	17	1
	2024-04-07	19:03:09	41.89	82.17	4.2	215	71	-120	18	-1
	2024-04-08	04:47:59	41.93	82.07	5.1	25	70	60	18	1
	2024-04-10	18:57:39	41.88	82.36	4.8	295	59	106	20	1
	2024-04-10	22:56:17	41.98	82.56	5.6	65	55	55	16	1
	2024-04-11	02:53:50	41.99	82.54	4.5	75	65	55	13	1
	2024-04-17	12:22:34	42.00	82.50	4.7	73	78	-112	17	-1
新疆乌什地震	2024-01-23	02:09:05	41.26	78.63	7.1	252	76	104	22	1
	2024-01-23	02:14:16	41.27	78.61	4.5	75	86	105	20	1
	2024-01-23	02:42:33	41.33	78.70	5.2	256	82	-140	14	1
	2024-01-23	02:50:43	41.33	78.68	4.6	260	73	-121	17	1
	2024-01-23	04:57:12	41.20	78.81	4.5	104	67	110	20	1
	2024-01-23	07:19:25	41.21	78.71	5.2	260	60	80	15	1
	2024-01-23	09:18:41	41.19	78.84	5.2	245	85	65	10	-1
	2024-01-23	12:01:22	41.31	78.82	4.7	249	76	-133	10	-1
	2024-01-23	17:24:48	41.33	78.79	4.0	132	61	132	10	1
	2024-01-23	20:09:29	41.35	78.85	4.2	331	85	120	10	-1
	2024-01-25	04:35:08	41.27	78.78	4.1	256	73	-115	18	1
	2024-01-26	04:01:28	41.29	78.83	5.6	285	57	123	18	-1
	2024-01-26	19:40:43	41.14	78.76	4.3	124	52	117	12	1
	2024-02-15	11:52:40	41.30	78.78	4.7	46	80	102	10	-1
	2024-02-23	12:08:35	41.24	78.74	4.1	255	75	-40	12	1
	2024-03-06	08:09:59	41.28	78.70	4.7	239	76	-96	10	-1
中国台湾花莲地震	2024-04-22	21:00:43	23.72	121.58	4.4	175	73	148	10	1
	2024-04-22	21:13:41	23.67	121.54	5.1	315	75	85	10	1
	2024-04-22	21:42:57	23.83	121.65	4.2	350	75	-60	10	1
	2024-04-22	22:11:25	23.79	121.49	5.9	180	90	10	9	1
	2024-04-23	00:33:05	23.84	121.69	4.0	350	80	15	12	1
	2024-04-23	01:40:25	23.70	121.51	4.2	145	75	85	10	1
	2024-04-23	02:26:53	23.70	121.68	6.3	180	75	20	10	1
	2024-04-23	02:32:50	23.81	121.53	6.2	94	76	-164	10	1

注：表中“1”代表加载；“-1”代表卸载。

LURR 的前震识别方法对这 6 次地震做了分析,发现 6 次地震均发生在固体潮加载阶段,预示着该区域后续发生强震的危险性较高(图 4)。实际情况则是,在最后 1 次 4.2 级加载地震发生后的 1 小时内,6.3 级和 6.2 级 2 次强余震(相当于余震序列中的主震)相继触发。

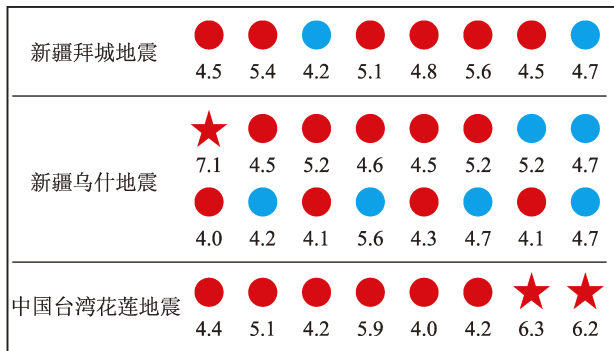


图 4 2024 年 3 次地震序列原震区强震危险性分析

Fig. 4 Risk analysis of strong earthquakes in the seismogenic area of three earthquake sequences in 2024

4 讨论

相较于传统的 LURR 算法,改进后的 LURR 方法有以下优点:

(1) 更加合理地确定构造剪切应力的滑移方向。在传统的 LURR 计算中,通常假设主震周边的小震震源机制解与主震一致,其构造剪切应力的方向根据主震的震源机制获得。因此可能产生 2 个方面的误差:一是在目标地震发生之前,其震源机制解是未知的,一般根据预测区域历史地震的震源机制解推算,导致主震震源机制出现误差;二是震源区内小震与主震的震源机制一致性存在一定的误差。改进后的方法,可以在任何一个 4 级以上地震发生后,根据该地震的震源机制解确定其构造剪切应力方向,从而避免上述 2 种误差,计算结果更为准确合理。

(2) 更有时效性。传统的 LURR 方法需要分别统计加卸载阶段地震的“响应量”来求解二者之比,因此至少需要等待一个加卸载周期。改进的 LURR 方法,在前震发生后就可以立即通过其自身震源机制解来判断加卸载状态,时

效性明显提高。

LURR 具有明确的物理意义,并且经过了大量的实验验证和震例检验,在地震中短期预测中效果较好。作为一种新的前震识别方法,本文方法改进了传统 LURR 方法在地震短临预测方面的不足,且经本文研究,在中国大陆西部地区仍然适用。基于 LURR 的前震识别系统,依赖于地震震源机制解数据,震后快速产出震源机制解能一定程度提高其时效性。目前,系统产出震例较少,实用性和准确性仍然需要大量实践进一步验证;用于前震判定的“交通灯”模型,后续也需要在实践中进一步完善。

5 结论

本文通过改进的 LURR 方法,以实时更新的震源机制解数据为基础,通过前震识别系统,应用“交通灯”模型,对前震识别系统实时产出的几个地震序列的加卸载判定结果做了统计分析,得到以下结论:

(1) 我国大陆西部地区非前震地震大都发生在固体潮卸载阶段。

(2) 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 6.4 级地震的 4 次前震、2021 年 12 月 24 日老挝 6.0 级地震的 2 次前震和 2022 年 6 月 10 日四川马尔康 6.0 级地震的 3 次前震都发生在固体潮加载阶段,该结果与前人研究及本文所述前震触发模式相符。

(3) 应用“交通灯”模型对 2024 年 4 月 10 日新疆拜城 5.6 级震群、2024 年 1 月 23 日新疆乌什 7.1 级余震序列以及 2024 年 4 月 3 日台湾花莲 7.3 级地震的 2 次强余震(6.3 级、6.2 级)的震后趋势判定具有较好的动态监测效果。

参考文献:

- 蒋长胜,张浪平,韩立波,等. 2011. 中长期地震危险性概率预测中的统计检验方法 I: Molchan 图表法[J]. 地震, 31(2): 106 - 113.
- Jiang C S, Zhang L P, Han L B, et al. 2011. Probabilistic forecasting method of long-term and intermediate-term seismic hazard I: Molchan error diagram[J]. Earthquake, 31(2): 106 - 113. (in Chinese)
- 蒋海昆,周少辉. 2020. 前震: 预测意义及识别方法[J]. 地震地磁观测与研究, 41(5): 222 - 225.
- Jiang H K, Zhou S H. 2020. Foreshock, predicting significance and distinguishing methods[J]. Seismological and Geomagnetic Observation

- and Research, 41(5): 222 – 225. (in Chinese)
- 李泽平, 余怀忠, 晏锐, 等. 2024. 基于 LURR 的前震分析方法及其在川滇地区的应用[J]. 地球物理学报, 67(6): 2248 – 2271.
- Li Z P, Yu H Z, Yan R, *et al.* The foreshock analysis technique based on the LURR method and its application in Sichuan-Yunnan region [J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(6): 2248 – 2271. (in Chinese)
- 刘月, 田勤俭, 张永仙, 等. 2023. 于田地区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)
- 马瑾, 郭彦双. 2014. 失稳前断层加速协同化的实验室证据和地震实例[J]. 地震地质, 36(3): 547 – 561.
- Ma J, Guo Y S. 2014. Accelerated synergism prior to fault instability: Evidence from laboratory experiments and an earthquake case[J]. Seismology and Geology, 36(3): 547 – 561. (in Chinese)
- 马玉川, 晏锐, 王广才, 等. 2022. 1976 年唐山 7.8 级地震前地下水位变化与地震成核过程的关系[J]. 地球物理学报, 65(4): 1325 – 1335.
- Ma Y C, Yan R, Wang G C, *et al.* 2022. Groundwater level changes before the 1976 Tangshan $M_s 7.8$ earthquake and its relation with the earthquake nucleation process [J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(4): 1325 – 1335. (in Chinese)
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社.
- Mei S R, Feng D Y, Zhang G M, *et al.* 1993. Introduction to Earthquake Prediction in China[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 梅世蓉. 1995. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)———固体孕震模式的由来与证据[J]. 地震学报, 17(3): 273 – 282.
- Mei S R. 1995. Study on physical model of earthquake precursor field and temporal and spatial distribution mechanism of earthquake precursors (I): Origin and evidence of solid seismogenic model[J]. Acta Seismologica Sinica, 17(3): 273 – 282. (in Chinese)
- 薛艳, 解孟雨, 刘杰, 等. 2021. 全球 $M_w \geq 8.0$ 浅源地震的前震序列研究[J]. 地震地质, 43(5): 1233 – 1249.
- Xue Y, Xie M Y, Liu J, *et al.* 2021. Study on foreshock sequences of the global great shallow – focus earthquakes with $M_w \geq 8.0$ [J]. Seismology and Geology, 43(5): 1233 – 1249. (in Chinese)
- 姚琪, 王辉, 刘杰, 等. 2023. 基于数值模拟和地震活动性统计的混合地震预测: 在中国地震科学实验场的应用[J]. 地球物理学报, 66(10): 4162 – 4175.
- Yao Q, Wang H, Liu J, *et al.* 2023. A hybrid method of earthquake forecasting based on numerical simulation and seismicity statistics: An application to China Seismic Experimental Site[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(10): 4162 – 4175. (in Chinese)
- 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 1994. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报, 37(6): 767 – 775.
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, *et al.* 1994. The Load – Unload Response Ratio theory: A new approach to earthquake prediction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 37(6): 767 – 775. (in Chinese)
- 张国民, 李丽. 2003. 地壳介质的流变性与孕震模型[J]. 地震地质, 25(1): 1 – 10.
- Zhang G M, Li L. 2003. Rheology of crustal media and a related seismogenic model [J]. Seismology and Geology, 25(1): 1 – 10. (in Chinese)
- 赵永红, 谢雨晴, 王航, 等. 2017. 地震预测方法 V: 地下流体方法[J]. 地球物理学进展, 32(4): 1539 – 1547.
- Zhao Y H, Xie Y Q, Wang H, *et al.* 2017. Earthquake prediction V: sub-surface fluid method [J]. Progress in Geophysics, 32(4): 1539 – 1547. (in Chinese)
- Felzer K R, Brodsky E E. 2006. Decay of aftershock density with distance indicates triggering by dynamic stress [J]. Nature, 441(7094): 735 – 738.
- Gulia L, Wiemer S. 2019. Real – time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks Decay of aftershock density with distance indicates triggering by dynamic stress[J]. Nature, 574(7777): 193 – 199.
- Helmstetter A, Sornette D. 2003. Foreshocks explained by cascades of triggered seismicity[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B10): 2457.
- Jones L M, Molnar P. 1979. Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 84(B7): 3596 – 3608.
- Mallman E P, Parsons T. 2008. A global search for stress shadows [M]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113(B12), doi: 10.1029/2007JB005336.
- Rundle J B, Tiampo K F, Klein W, *et al.* 2002. Self – organization in leaky threshold systems: The influence of near – mean field dynamics and its implications for earthquakes, neurobiology, and forecasting[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99(S1): 2514 – 2521.
- Rundle J B, Turcotte D L, Shcherbakov R, *et al.* 2003. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems[J]. Reviews of Geophysics, 41(4): 1019.
- Sykes L R. 1971. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians[J]. Journal of Geophysical Research, 76(32): 8021 – 8041.
- Sykes L R. 1978. Intraplate seismicity, reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation[J]. Reviews of Geophysics, 16(4): 621 – 688.
- Yu H Z, Liu J, Ma Y W, *et al.* 2022. A possible characteristic of foreshocks derived from the evaluation of loading/unloading induced by earth tides [J]. Frontiers in Earth Science, doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.967264>.

- Yu H Z, Liu L, Ma Y C, *et al.* 2023. Observed hydrological changes associated with active tectonic blocks before three consecutive earthquakes in Qinghai, China [J]. *Scientific Reports*, 13 (1), doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36274-2>.
- Yu H Z, Shen Z K, Wan Y G, *et al.* 2006. Increasing critical sensitivity of the Load/Unload Response Ratio before large earthquakes with identified stress accumulation pattern [J]. *Tectonophysics*, 428 (1-4): 87-94.
- Yu H Z, Yu C, Ma Z, *et al.* 2020. Temporal and spatial evolution of Load/Unload Response Ratio before the $M_s 7.0$ Jiuzhaigou earthquake of Aug. 8, 2017 in Sichuan Province [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 177: 321-331.

Test and Application of the Foreshock Identification Method Based on the Load/Unload Response Ratio

LI Zeping^{1,2}, YU Huaizhong³, YANG Zhigao³, ZHANG Jingxue³

(1. *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China*)

(2. *Hubei Earthquake Agency, Wuhan 430071, Hubei, China*)

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

Abstract

We sorted out and analyzed the forecasting results produced by the foreshock identification system developed based on the improved Load/Unload Response Ratio (LURR) method to verify the effectiveness of this method in foreshock identification. The western region of Chinese mainland was selected as the study area. In this region, 64.2% of all 190 non-foreshocks ($M > 4.0$) occurred during the unloading process, while the remaining events triggered during the loading process. The results indicated that non-foreshocks were more likely to occur during the unloading process. All the 4 foreshocks of the Yangbi $M_s 6.4$ earthquake in Yunnan on May 21, 2021, 2 foreshocks of the Laos $M_s 6.0$ earthquake on December 24, 2021, and 3 foreshocks of the Maerkang $M_s 6.0$ earthquake in Sichuan on June 10, 2022 were triggered during the loading process. Further, by using the “traffic light” model for foreshock identification and seismic risk analysis, we categorized the loading/unloading states and researched the risk of strong earthquakes in seismogenic areas for the Baicheng $M_s 5.6$ earthquake sequence on April 10, 2024, the Wushi $M_s 7.1$ sequence on January 23, 2024 in Xinjiang Uygur Autonomous Region, and two strong aftershocks ($M_s 6.3$, $M_s 6.2$) of the Hualien $M_s 7.3$ earthquake sequence on April 3, 2023 in Chinese Taiwan. The results showed that the occurrence of stronger earthquakes after loading earthquake was consistent with the actual earthquake situation. Analyzing with R -value and probability gain, we can see that R -value is greater than R_0 -value with 95% confidence and the probability gain is greater than 1, this indicates that the foreshock identification method based on the Load/Unload Response Ratio (LURR) can pass the significance test, and the prediction effect is good. This method is suitable for real-time assessment of the seismic risk trend in the western region of the Chinese mainland.

Keywords: Load/Unload Response Ratio; foreshock; earth tide; analysis of the post-earthquake risk trend; earthquake prediction