

余怀忠,于晨,张小涛,等. 2025. 中国 CSEP 检验中心的软件系统建设[J]. 地震研究,48(2):177-187,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0019.

Yu H Z, Yu C, Zhang X T, et al. 2025. Construction of software systems of the CSEP testing center in China[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2):177-187,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0019.

中国 CSEP 检验中心的软件系统建设*

余怀忠, 于晨, 张小涛, 苑争一, 钟骏, 解孟雨, 李泽平, 张靖雪

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 为提升地震预测方法评价的标准化和应用的规范化, 依托国家重点研发计划尝试把 CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability) 移植到中国, 建立中国 CSEP 检验中心。自主研发了加卸载响应比 (LURR)、地壳振动、态矢量和地震综合概率预测模块; 引进了国外的图像信息 (PI)、相对强度 (RI)、传染型余震序列 (ETAS) 预测模型并完成模块研发; 遴选出 Molchan 检验、 R 值评分、 N 值检验和 ROC 检验等国际认可的地震预报效能评价方法, 以集成方式搭建运行平台。作为开放性检验中心, 通过不断纳入新的算法, 着力提升地震预测能力、推进地震预测实践, 将地震预报业务中常用的地震发生率指数、小震调制比、 b 值等预测方法纳入到中心运行。中心的软件系统既能够完成回顾性预测检验, 又能够实现前瞻性预测分析, 可为现有预测方法提供运行环境和技术支持。

关键词: CSEP 检验中心; 预测模块; 检验模块; 集成功能; 开放性

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)02-0177-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0019

0 引言

中国的地震预报工作始于 1966 年邢台地震后, 通过多年的努力, 我国地震工作者已经在监测站网建设、前兆资料积累、预测经验获取、预报理论探索、预报工作机制建设等方面取得了显著成效。地震前兆观测从定时观测、模拟记录方式发展成数字化、网络化实时传输的时间数据加密; 从零星散点式观测发展为规模性区域成网观测的空间数据加密。在 1975 年辽宁海城 7.3 级、2017 年新疆精河 6.6 级、2022 年青海门源 6.9 级和 2022 年四川泸定 6.8 级等地震前均作出了有减灾实效的工作。然而, 我国还没有建立科学的地震预报方法体系, 制约了我国地震预报工作的推进。

我国大陆地区有超过 4 000 个台站开展地震连续观测, 观测资料包括地震目录、全球导航卫星系统 (GNSS)、地表形变、重力、地磁、地电、水文地质和地球化学等。科研人员基于海量的观测资料发展了上千种地震预测模型、方法 (Yu et al, 2022), 如强震破裂空段 (邵志刚等, 2022)、断层运动闭锁段 (Zhao et al, 2022)、库仑应力增强区 (程佳等, 2018) 和活动断层的中小地震稀疏段 (王未来等, 2021), 以及视应力 (陈丽娟等, 2022)、 b 值 (高雅婧等, 2022)、加卸载响应比 (Yu et al, 2021)、多方法组合 (Yu et al, 2013)、地震发生率指数 (Yu et al, 2024)、地震综合概率 (王芃等, 2022)、地震空区 (李兵等, 2022)、地震条带 (马茹莹等, 2021)、GNSS 观测的地壳变形和滑动亏损 (Wu et al, 2011; Zhao et al, 2022)

* 收稿日期: 2024-04-03.

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).

第一作者简介: 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.

等。大量新数据的获得,不断丰富地震学家对地震孕育过程的认知,也为地震预报带来了新的机会和挑战。近年来的地震预测研究实践发现,形成科学预报方法体系的关键在于评价标准体系的建立 (Yu *et al.*, 2022)。如果能够通过对预测方法的科学评价强化地震预报的基础,极有可能促进地震预报能力和水平的提升。

美国南加州地震中心 2006 年发起的“地震可预测性合作研究”(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, CSEP) 计划是全球最具代表性的地震预测研究 (Jordan *et al.*, 2006, 2010)。其目的是建立全球参与的、以发展向前和回溯不同时间尺度地震预测模型为目标的地震预测检验中心。美国南加州地震中心、意大利 INGV、新西兰 GNS Science、苏黎世联邦理工学院 ETH Zurich 等投入“竞技”的统计预测模型已超过几百个,可用于 1 d、1 a 和 5 a 等多个时间尺度预测 (Schorlemmer *et al.*, 2018)。基于 CSEP 计划产出了 N-检验、T-检验、ROC-检验、Molchan 检验、L(似然)-检验、ASS-检验、LW-检验、RT-检验和 RP-检验等一系列评价方法 (Schorlemmer *et al.*, 2007)。其中, Molchan 检验是国际上比较通用的一种评价方法。

依托国家重点研发计划“中国地震科学实验场的地震可预测性国际合作研究”,与全球 CSEP 计划深度合作,建设中国 CSEP 检验中心,引进吸收国内外先进经验,提升我国地震预测能力和社会公共安全的服务能力。目前已经吸纳了 b 值、态矢量 (Yu *et al.*, 2013)、地壳共振 (Chen *et al.*, 2020) 等 10 余种预测方法,实现 10 a、5 a、1 a、6 个月、3 个月、1 个月、5 d、1 d 等不同时间尺度参数模型的计算,以及 Molchan 检验、 R 值评分 (许绍燮, 1989)、N-检验和 ROC-检验等国际认可的地震预报效能评价方法。相关研究成果已经应用到中国地震局的年度危险区预测工作中。在中国大陆 2022 和 2023 年度危险区确定过程中,地震学家加强了中国 CSEP 检验中心的应用,强化预测方法的评价和综合概率分析,提升了年度预测的效果。

为了进一步提升中国 CSEP 检验中心的影响,推进相关地震预测方法的应用,本文围绕预测模块和检验模块的搭建和使用,介绍了中国 CSEP 检验中心的软件系统建设情况。

1 建设背景

2006 年美国南加州地震中心发起的全球 CSEP 计划,鼓励发展多种地震预测模型,采用向前地震预测、可比较的数据、统一的计算规则和严格的统计检验等方式开展国际合作研究,通过对模型的严格统计检验与评估,提高对地震的可预测性的认识。目前该研究计划已在美国、新西兰、日本、欧洲等地建立 CSEP 检验中心,在模型构建和向前预测检验等方面取得大量成果,代表了当前的地震预测科技发展水平,对我国当前的地震预测预报工作具有重要的参考价值。我国有必要加强与 CSEP 的国际合作,并以中国国家地震科学实验场为平台,引进吸收国际先进经验,迅速提升我国地震预测能力和国际影响力,提高社会公共安全的服务能力。

CSEP 1.0 计划实施了 10 年,取得了丰硕成果。2018 年 SCEC 学术年会 CSEP 专题研讨会,决定于 2019 年启动 CSEP 2.0 计划,整合已有的 CSEP 检验中心,进一步推进地震预测国际合作。我国地震学者在 CSEP 1.0 阶段开展了一些预研工作,学习引进了图像信息 (Pattern Informatics, PI)、传染型余震序列 (Epidemic-Type Aftershock Sequence, ETAS) 等模型,发表了一系列研究成果。在 CSEP 2.0 启动之际,我国地震学者尝试进一步开展合作研究,建立中国 CSEP 检验中心。

2 目的和方法

中国 CSEP 检验中心将通过建立地震预测方法的标准化评价体系,梳理现有的地震预测方法,并实现其应用的规范化。中心采用预测分析、效能检验和检验报告产出一体化的工作思路,定期更新各算法模块的基础数据,包括地震目录、断层、地壳形变、地下流体、地震波形、电磁等,其中地震目录已经实现准实时更新。既可以实现回顾性预测检验,也实现了向前预测功能 (图 1)。

中心的软件和功能模块基于 B/S 架构搭建,采用 java spring boot 框架,核心模块采用 Python 等科学编程语言开发,支持 Linux 64 位操作系统,支持关系型数据库,如 oracle、mysql 等。Web 服务:

Tomcat7.0 及以上。软件系统支持在实体服务器、云平台或虚拟机环境下部署和运行，在地震行业网内部署。同时，支撑并发量较大业务场景的要求，确保系统具有良好的弹性伸缩能力。

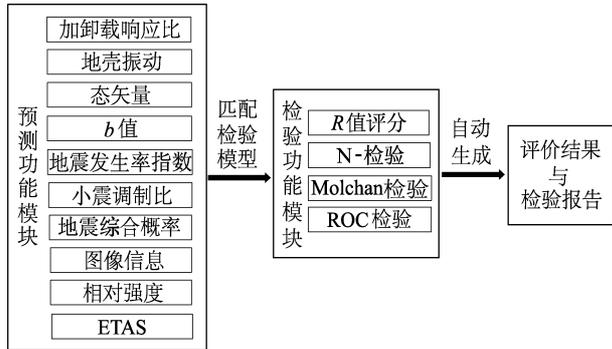


图 1 中国 CSEP 检验中心软件系统整体框架

Fig. 1 The framework of software system of the CSEP Testing Center in China

浏览器兼容性强，支持包括 Edge、火狐、谷歌、QQ 浏览器等的当前流行版本。系统具有良好的扩展性，支持模块化功能扩充，如新的数据质量控制指标、数据产品、定位算法等，能快速与现有系统集成。主要业务要求包括算法模块开发、综合数据处理系统、门户网站、信息服务系统 4 大部分。实现预测模块与检验模块的对接、检验结果与产出报告的对接、计算数据的读取和调用、定时更新、计算结果入库、检测报告入库等功能。其核心是综合数据处理系统，主要包括预测模块和检验模块的集成。

3 预测模块的开发

目前，平台已经集成了加卸载响应比（Load/Unload Response Ratio, LURR）地壳振动、态矢量、*b* 值、地震发生率指数、小震调制比、地震综合概率、图像信息（PI）、相对强度（Relative Intensity, RI）、ETAS 共 10 个预测模块。

选择上述 10 种预测模块的原因有 4 个：一是这些模块所涉及的方法具有一定的影响，有关研究成果已在国内外核心期刊上发表，已经有较为成熟的、公开的代码，便于成果的共享，也便于用户理解和应用。二是这些方法分别具有不同的优势预测时间尺度，比如 PI 方法为数年至数十年，

LURR 方法是数年至数月，态矢量方法为 1 a 左右甚至更短，地壳振动方法则为震前数月至数天，这些方法能够基本实现预测时间尺度上的互补，捕捉不同孕震阶段的异常特征。三是既有传统方法的继承和发展，又具有新方法的创新，LURR 方法、*b* 值、小震调制比是前人总结出来预测效能较好的方法，而态矢量、地震发生率、地震综合概率预测则是近年来提出的新预测方法。四是实现自主研发和国际流行方法的结合，LURR、态矢量、*b* 值、小震调制比、地震发生率指数、地壳振动、地震综合概率是我国自主研发的预测方法，而 PI、RI、ETAS 则是国际流行的地震预测方法，通过相互比对和印证，加深我国与国际地震预测研究的接轨，推进我国的地震预报发展。

3.1 LURR 模块

LURR 方法是通过潮汐应力在某一时刻在断层面上引起的库仑应力的增加和减少，判断加载和卸载，使用地震目录计算加卸载响应比值，预测地震迫近程度（尹祥础等，1994）。当系统处于稳态时，加载响应与卸载响应相当，因而 $LURR = 1$ ；当系统偏离稳态时，加载响应大于卸载响应， $LURR > 1$ 。

依据 LURR 的计算规则，编制完成可在 Linux 下运行的 LURR 模块（图 2）Python 程序。以地震目录为基础，利用 LURR 方法可执行程序，产出 LURR 时序曲线和异常的空间分布。可实现未来数天、数周、数月 and 数年多时间尺度的地震预测。



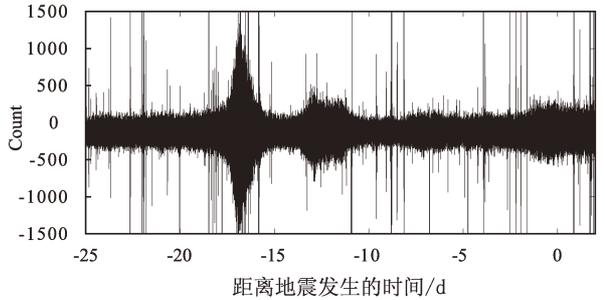
图 2 LURR 计算模块

Fig. 2 The calculation module of LURR

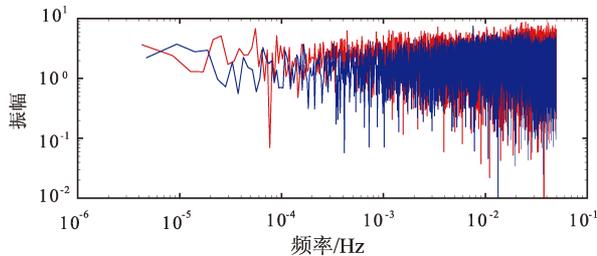
3.2 地壳振动模块

Chen 等 (2020) 在国内外多个强震前, 通过地震仪资料和 GPS 资料, 发现地壳振动信号在特定频段出现显著增强的现象 (图 3a)。图 3b 中, 红色为

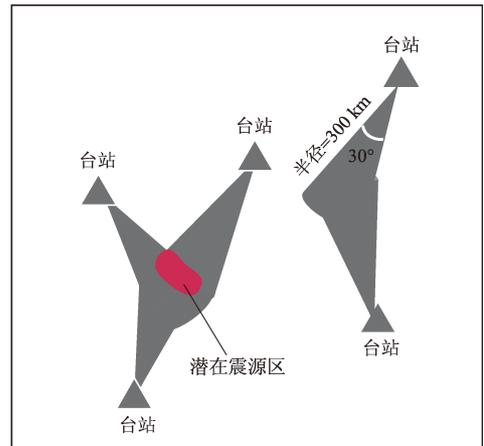
异常时段的分析结果, 即震前 5 ~ 10 d 的频谱, 蓝色为背景时段的分析结果, 即震前 2 个月的频谱。由图可见, 在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ Hz 的频带范围内, 震前 5 ~ 10 d 振幅比背景振幅明显增强 (于晨等, 2021)。



(a) 2014年云南景谷6.6级地震前景谷台的振动波形



(b) 异常信号的频谱分析



(c) 异常信号源的定位方法

图3 地壳振动方法定位过程

Fig. 3 Positioning process of the crustal vibration method

本模块以识别 0.2 Hz、0.05 Hz 和 0.0001 Hz 3 个频段 (可根据实际应用情况进行调节) 地壳振动信号为目的进行开发, 当增强幅度超过背景值 20% 时, 则认为记录到地壳振动信号。采用 Tanimoto 等 (2006) 提出的单台连续波形地震信号源定位法, 通过对多个台站的单台法定位结果综合分析, 判定地震发生位置。将水平方向的 2 个信号投射到正交轴上, 并按照顺时针旋转叠加, 确定最大振幅对应的方向为信号源方位。以信号源方向为中心, 构造角度为 30° 、半径为 300 km 的扇形区域中, 当至少 3 个台站出现重叠区域时, 该区域为潜在的地震源 (图 3c)。

城大地震等进行了研究, 发现大地震前态矢量参数有显著的变化, 因而认为态矢量的特征变化可能是一种地震前兆。

按照上述思路, 通过设定背景观测时段和变化时段, 产出异常分布图和异常来源分布图。目前该模型已经实现川滇地区地震危险性的实时跟踪。

将研究区域剖分成 n 个子区域 (图 4), 通过子区域内小震活动在一定时期内的变化预测地震。具体方法为: 将子区域 i 内对应的地震活动参量 V_i 看做 n 维矢量的一个分量, 可以得到任意 t 时刻的 n 维态矢量:

3.3 态矢量模块

态矢量概念来源于统计物理学, 是一种对连续场进行粗粒化描述的方法。尹祥础等 (2004) 引入态矢量方法对 1976 年唐山大地震、1975 年海

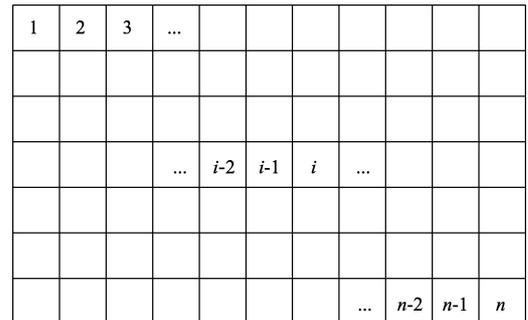


图4 研究区域的 n 个子区域划分

Fig. 4 Division of the study area in n sub-regions

$$\mathbf{V}_t = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)] \quad (1)$$

其增量为：

$$\Delta \mathbf{V}_{t-\Delta t, t} = \mathbf{V}_t - \mathbf{V}_{t-\Delta t} \quad (2)$$

分别计算态矢量的模：

$$M = |\mathbf{V}_t| \quad (3)$$

$\mathbf{V}_{t-\Delta t}$ 和 \mathbf{V} 之间的夹角为：

$$\varphi_{t-\Delta t, t} = \arccos \left(\frac{\mathbf{V}_{t-\Delta t} \cdot \mathbf{V}_t}{|\mathbf{V}_{t-\Delta t}| |\mathbf{V}_t|} \right) \quad (4)$$

增量的模为：

$$\Delta M = |\Delta \mathbf{V}_{t-\Delta t, t}| \quad (5)$$

态矢量 \mathbf{V}_t 与单位矢量 \mathbf{V}_e 之间的转角关系如下：

$$\varphi_e = \arccos \left(\frac{\mathbf{V}_e \cdot \mathbf{V}_t}{|\mathbf{V}_e| |\mathbf{V}_t|} \right) \quad (6)$$

式中：单位矢量 \mathbf{V}_e 表示各个分量相同的矢量。

本模块以地震目录数据为基础，产出态矢量时序曲线和对应数据。可实现未来数天、数周、数月 and 数年多时间尺度的地震预测。

3.4 地震综合概率模块

地震综合概率模块是为了整合各种预测方法的预测结论，以风险概率的形式给出危险区域的空间分布和危险程度，推进地震综合预报由定性预报向定量预报的转变。它兼顾地震背景发生概率和每种预测方法的历史预测效能，采用贝叶斯公式计算综合概率 (Field, 2007)：

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3) \dots \quad (7)$$

式中： P 为综合概率； P_1 、 P_2 、 $P_3 \dots$ 为通过不同方法计算得到的对同一地点的地震概率。

在实际预测时，将各种方法评价所得的 R 值评分作为权重，综合概率 P 可改写为：

$$P = 1 - \prod_{i=0}^N (1 - cR_i) \quad (8)$$

式中： N 表示所选用的预测方法的个数； R_i 是第 i 种方法的 R 值； c 定义为：

$$c = \frac{1 - (1 - \bar{P}_0)^{1/N}}{\bar{R}} \quad (9)$$

式中： \bar{P}_0 是平均概率； \bar{R} 是平均 R 值。

本模块以地震目录和各种算法的预测结果为输入，能够产出地震综合概率预测分布图和对应网格概率值，实现不同时间尺度的向前地震预测功能。

3.5 PI 模块

按照 PI 方法 (Rundle *et al*, 2003)，地震活动可以作为受稳恒速度连续驱动的阈值系统，系统中的能量耗散在长期平均的意义上接近稳定。PI 算法假定中小地震活动异常是中等以上地震的前兆现象，考虑地震活动的增强与平静。具体步骤为：①对研究区进行空间网格划分，以落入每一网格中的地震事件个数构建时间序列；②给定滑动时间窗，通过时空变化计算每个网格未来发生显著地震的可能概率，再减去地震背景概率，将发震概率高的网格以深浅不一的暖色块的形式呈现出来，即热点分布图。

PI 方法使用 Matlab 语言编写，可在 Linux 下运行。以地震目录为输入数据，产出图像信息空间分布图，实现未来数天、数周、数月 and 数年多时间尺度的地震预测。

3.6 ETAS 模块

ETAS 模型描述了地震活动时空丛集的自激发点过程 (蒋长胜, 庄建仓, 2010)，可以应用于研究区域地震活动时空特征和余震活动特征分析。

按照 ETAS 模型，每次地震都会触发余震且余震活动在时间域内遵循 Omori - Utsu 公式，单位时间 t 内的余震发生次数为：

$$n_i(t) = K \exp[\alpha(M_i - M_c)] / (t - t_i + c)^p \quad (10)$$

式中： M_c 为下限震级； M_i 、 t_i 分别为第 i 次地震的震级和发震时刻； K 、 α 、 c 、 p 是常量。 t 时刻的地震发生率为：

$$\lambda(t) = \mu + \sum_i n_i(t) \quad (11)$$

本模块输入的是地震目录数据，可以产出未来一定时间、空间、震级窗内的预测结果。

3.7 RI 模块

RI 是基于统计学原理构造的地震预测模型，

通过学习历史地震数据,预测未来将要发生的给定震级范围内的地震次数。将研究区域按经纬度划分为规则网格,以网格为单位统计给定震级条件下的历史地震次数,根据已发生的地震次数预测未来地震的发生次数,最后累加得到研究区域的预测值 (Rundle *et al*, 2000)。通过遍历搜索适应研究区地震活动特征的最优模型参数,进行地震危险性预测,绘制 RI 预测热点分布图。

本模块以地震目录数据为输入,产出 RI 热点空间分布图,可实现未来数天、数周、数月 and 数年多时间尺度的地震预测。

3.8 地震发生率指数 (SRI) 模块

SRI 基于统计学模型,定量识别地震活动显著增强与减弱两种典型异常。计算方法为:分别给定背景时段: $T_b = t_2 - t_0$, 研究时段: $T_w = t_2 - t_1$ 。根据背景时段 T_b 内发生的地震个数 N , 给定 T_w 时间内的平均地震发生率:

$$\lambda = \frac{N}{T_b} T_w \quad (12)$$

根据泊松分布, T_w 时间内发生 k 次地震的概率为:

$$p(k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!} \quad (13)$$

根据 T_w 内实际发生的地震数 n , 定义地震发生率指数 SRI 为:

$$SRI = P(X \leq n) = \sum_{k=0}^n e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!} \quad (14)$$

本模块以地震目录数据为输入,可以产出未来数天、数周、数月 and 数年 SRI 预测的异常空间分布图。

3.9 b 值模块

根据 Gutenberg - Richter 定律, b 值大小与应力水平呈反比,可以用来指示区域地震危险性水平,且一般选取低 b 值区域作为发生地震的危险区域 (易桂喜等, 2008)。

b 值用最大似然法估算为:

$$b = \frac{1}{\ln(10) \left[\bar{M} - \left(M_c - \frac{dM}{2} \right) \right]} \quad (15)$$

式中: \bar{M} 为计算选用目录的平均震级; M_c 为地震目录的最小完备震级; dM 为地震记录的最小标

度,一般为 0.1,通常地震总数 N 大于 30。

在实际预测中,对研究区域进行网格划分,然后依次以各个网格节点为中心,筛选给定边长的区域内、给定时段内的地震目录,计算各节点处的 b 值。本模块以地震目录数据为输入,可以产出不同时段 b 值异常的预测结果。

3.10 小震调制比模块

小震调制比是地震学预测中的常用方法之一。当构造应力接近临界状态时,地震活动会受到固体潮调制 (韩颜颜等, 2017)。

本模块首先将研究区域进行网格化,依次以各个网格节点为中心,筛选一定半径、时段内的地震目录,按照农历初一和初二 (朔),初七至初九 (上弦),十五至十七 (望),廿二至廿五 (下弦) 作为调制时间,计算相应节点的调制比,产出不同时段小震调制比异常的空间分布图。

4 检验模块的集成

中国 CSEP 检验中心软件系统集成了 Molchan、 R 值评分、 N 值和 ROC 预测效能检验模型,对各种方法的预测效能进行评价。依据预测效能检验模块的要求,对每个效能检验和预测模块指定标准数据接口,按照效能检验算法的输入要求,完成预测和检验两大模块的对接,并制定容错机制保证程序模块的实时调用。

选择上述 4 种预测效能检验模型的主要原因包括 2 个方面:一是要能够对检验中心运行的各种预测模型进行检验,二是要能够对目前主流的预测方法进行检验。当然,随着未来平台预测功能模块的发展,中心软件系统必然会引入更多的检验模型完善检验功能模块。检验功能模块的集成首先要与预测功能模块对接,以各种预测模型的输出结果为输入,落实各种检验方法的功能,并能够动态链接地震目录数据库,实现对预测结果的评价。

4.1 R 值模块

R 值评分是我国地震工作者普遍使用的地震预报效能评价方法 (许绍燮, 1989; Yu *et al*, 2022), 计算公式为:

$$R = \frac{H}{N} - \frac{S_p}{S_T} \quad (16)$$

式中： S_p 和 S_T 分别表示预测区域面积和整个研究区域面积； H 和 N 分别表示一定时间窗内命中的地震数和地震总数。

当 $R > 0$ 时，表示预报有效，且 R 值越大效果越好，最大值为 1； $R = 0$ 表示预报无意义； $R < 0$

表示预报无效。结合统计分布检验，利用报准、漏报地震的个数，可以计算出大于 97.5% 置信度的临界值 R_0 ，当 $R > R_0$ 时，其预测的有效性高于自然发生概率，该预测结果具有较高的效能（图 5a）。

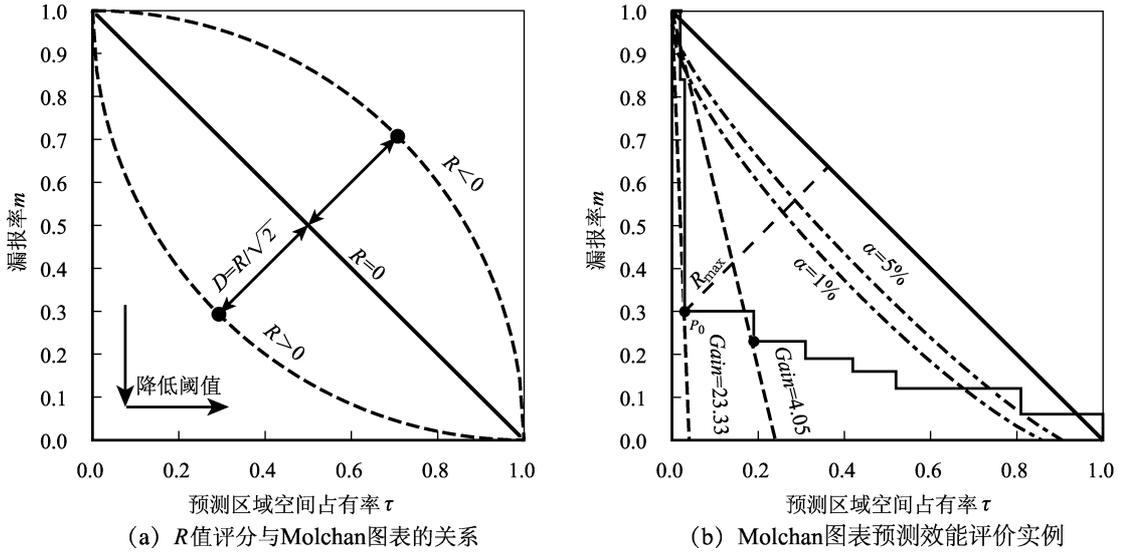


图 5 Molchan 图表检验原理及其与 R 值评分的关系

Fig. 5 The principle of Molchan chart test and its relationship with the R - score

4.2 Molchan 模块

R 值评分类似于 Molchan 图表法的一种特例，表达为：

$$L = 1 - \tau - \nu \tag{17}$$

式中： τ 和 ν 分别表示误报率和漏报率。

对于空间占有的预测方法，异常识别阈值降低，预测区域面积增大，同时命中率增加，其变化即 Molchan 曲线 (Molchan *et al*, 2008)。如图 5b 所示，图中任意点 P_0 (τ_0, m_0)，由于其与直线 $\tau + m - 1 = 0$ ，即直线 $R = 0$ 的距离，结合 R 值计算公式可推导出，Molchan 图表中每个点与直线 $\tau + m - 1 = 0$ 的距离 D 与 R 值评分成正比，二者可以相互转换。以直线 $\tau + m - 1 = 0$ 为分界线，其左下方区域的 $R > 0$ ，右上方区域的 $R < 0$ 。

假设地震的发生是相互独立的，一定时段内发生的地震个数符合 n 重伯努利分布 (泊松分布的离散化表达)，该时段内单个地震的发生概率用预测区域的空间占有率表示，相应的显著性水平满足以下公式：

$$\alpha = \sum_{i=H}^N \left[\binom{N}{i} \tau^i (1 - \tau)^{N-i} \right] \tag{18}$$

$$\binom{N}{i} = \frac{N!}{i!(N-i)!}$$

式中： N 表示地震总数； H 表示报准地震的个数； α 表示置信度。例如取 $\alpha = 5\%$ ，根据 τ 值反算伯努利分布下的报准率 h ，进而得出 Molchan 图表的显著性曲线。该方法还定义了概率增益参数 (Zechar, Jordan, 2008)：

$$Gain = \frac{1 - m}{\tau} = \frac{h}{\tau} \tag{19}$$

4.3 N - test 模块

N - test 是以目标地震数目与实发地震数是否一致的统计检验方法 (Schorlemmer *et al*, 2007)。根据泊松分布、泊松累积分布函数，即发生不超过 ω 个事件的概率，可表示为：

$$F(\omega | \lambda) = \exp^{-\lambda} \sum_{i=0}^{\omega} \frac{\lambda^i}{i!} \tag{20}$$

使用评分变量 δ_1 和 δ_2 来定量表达发生“至少”和

“不超过” N_{obs} 个地震事件的概率，计算公式为：

$$\delta_1 = 1 - F((N_{obs} - 1) | N_{fore}) \tag{21}$$

$$\delta_2 = F(N_{obs} | N_{fore}) \tag{22}$$

当 $\delta_1 < \alpha_{eff}$ 时，表明预测的地震数目过少；当 $\delta_2 < \alpha_{eff}$ 时，表明预测的地震数目过多，其中 $\alpha_{eff} = 0.5\alpha_0$ 。

4.4 ROC 模块

ROC 检验与 R 值评分有共同之处，在表现形式上给出不同危险概率阈值下各命中率与失败率的比值来描述预测的优劣程度 (Holliday *et al*, 2005)。变量 a 表示报准地震的格点个数，即预报有震的格点个数；变量 b 表示误报地震的格点个数，即预报无震的格点个数；变量 c 表示有地震无异常的格点个数，即未报有震的格点个数；变量 d 表示无地震无异常的格点个数，即未报无震的格点个数。则 $a + c$ 表示总地震个数， $b + d$ 表示无地震的格点个数。定义报准率 $H = a / (a + c)$ ，虚报率 $F = b / (b + d)$ 。定义预测 ROC 折线与随机预测直线所包络的面积 E_f 为有效预测系数， E_f 值越大，表明 ROC 曲线越靠近图的左上部分，即在相同的报准率下付出的“虚报率”越低，预测效果越好，反之预测效果越差 (图 6)。

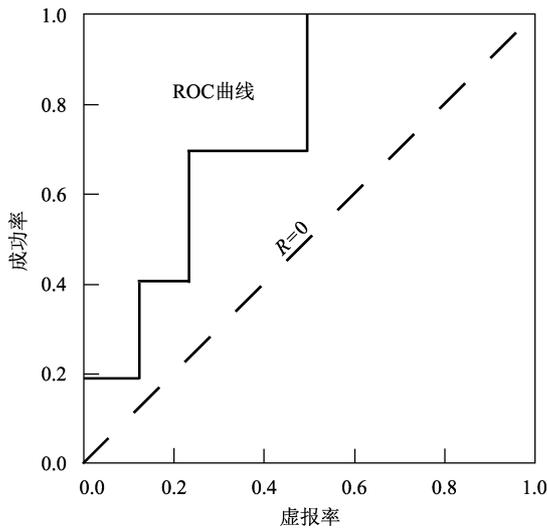


图 6 ROC 评价方法原理

Fig. 6 The principle of ROC evaluation method

5 应用示例

中国 CSEP 检验中心的建立有助于预测方法应

用和评价的标准化。 b 值方法是一种研究较为深入的地震预测方法，能够实现震前数年、数月、数周、数天的预测，理论模型的认可度高，且对于检验中心平台的预测模块和检验模块的使用具有代表性。因此，我们以 b 值为例，介绍预测模块的标准计算流程。首先，选定 b 值预测模型，其次，按照输入参数界面配置计算参数，计算时段为 2021 年 1 月 1 日至 12 月 31 日，研究区域范围为 ($67^\circ \sim 136^\circ E$, $15^\circ \sim 55^\circ N$)，滑动步长为 0.5° ，计算空间窗为 $180 \text{ km} \times 180 \text{ km}$ ；震级下限为 2.0。提取的 b 值预测区面积约占研究区域总面积的 25%。

在 b 值计算结果的基础上，检验中心将自动匹配 Molchan 检验或 R 值检验模块 (图 7)，根据设置的检验时段进行预测效能评价。2022 年中国大陆共发生 5 级以上地震 27 次，其中 20 次发生在 b 值预测的危险区域内，命中率达到 74%。对应的最佳预测结果的 R 值评分为 0.49，结果优于 $\alpha = 1.0\%$ 的显著性。相关分析结果将自动推送并产出 b 值模型的预测效能评价报告。类似地，检验中心还能够产出未来数天至数年的 b 值预测和检验结果，并形成预测检验报告。



图 7 b 值模型及其匹配的 Molchan 检验方法
Fig. 7 b -value model and the corresponding Molchan test method

6 结论

我国是世界上地震灾害最严重的国家之一。地震预报是实现防震减灾的重要途径，但我国地

震预报的服务能力与日益增长的社会公共安全需求存在较大矛盾。CSEP 检验中心代表了当前国际地震学界对地震预测预报研究现状的客观和全面认识下的新思路, 可为地震学家对地震的物理机制、演化过程及规律提供新的认识。CSEP 检验中心目前已在统计预测模型的构建和检验中心的建设等方面取得了阶段性的进展, 标志着地震预测预报研究从追求“终极目标”转变为循序渐进的思路。

中国 CSEP 检验中心已经实现与该项目全球网络基础设施的对接, 结合中国地震科学实验场项目的实施, 可以带动和鼓励地震预测预报模型的自主研发, 通过地震可预测性研究实践, 提高地震工作者对地震可预测属性的科学认识。CSEP 检验中心是开放性的, 可以通过注册用户使用平台资源, 中心对地震预测方法也持开放态度, 任何方法都可以吸纳到平台进行预测效能检验和评价。CSEP 检验中心的建设和研究计划的实施将成为中国地震预测预报理论研究的孵化器, 并为推进地震预测研究与科技创新提供场所和科技支撑条件。

此外, CSEP 检验中心的建立还有助于推进综合地震预报由定性向量化的转变。中心在加强各种地震预测方法效能评价的基础上, 逐步尝试发展地震综合概率预测模块, 以效能评价为权重, 通过贝叶斯公式整合得到各种方法的预测结果, 量化确定地震危险区域, 这项研究尚处于发展过程, 还需要在检验中心补充更多预测模型, 实现合理的综合概率输出。目前主要是采用将各种方法的预测结果(包括非本平台的预测方法产出结果)作为输入量进行计算和分析的方式, 即模型的输入量还未实现完全的标准化, 因此, 分析结果不在这里进行展示。事实上, 中国 CSEP 检验中心的建立, 有助于推进我国的地震预报业务, 结合检验中心对 PI、LURR、地震调制比、 b 值等方法的评价, 进一步加强对现有预测方法的评价, 通过对比发现, 中国大陆 2022 和 2023 年度危险区预测结果明显优于往年的平均预测水平。

中国 CSEP 检验中心软件系统虽然已经初步建立, 但要真正实现推进地震预报工作的目的, 还需要更多预测方法和检验方法的投入, 以及大量的数据检验。

感谢为中国 CSEP 检验中心建设提供软件和数据支持的专家和单位。

参考文献:

- 陈丽娟, 陈学忠, 龚丽文, 等. 2022. 2021 年泸县 $M_s 6.0$ 地震前视应力和 b 值以及中小地震与地球自转相关性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 42(11): 1133 - 1137.
- Chen L J, Chen X Z, Gong L W, et al. 2022. The apparent stress and b value and the relation between Earth's rotation and small and medium earthquakes before the 2021 $M_s 6.0$ Luxian Earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 42 (11): 1133 - 1137. (in Chinese)
- 程佳, 姚生海, 刘杰, 等. 2018. 2017 年九寨沟地震所受历史地震黏弹性库仑应力作用及其后续对周边断层地震危险性的影响[J]. 地球物理学报, 61(5): 2133 - 2151.
- Cheng J, Yao S H, Liu J, et al. 2018. Viscoelastic Coulomb stress of historical earthquakes on the 2017 Jiuzhaigou earthquake and the subsequent influence on the seismic hazards of adjacent faults [J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(5): 2133 - 2151. (in Chinese)
- 高雅婧, 孙云强, 罗纲. 2022. 1999 年集集地震前后台湾地区地震 b 值及应力场时空演化特征[J]. 地球物理学报, 65(6): 2137 - 2152.
- Gao Y J, Sun Y Q, Luo G. 2022. Temporal and spatial evolution characteristics of b value and stress field in Taiwan before and after the 1999 Chi - Chi Earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(6): 2137 - 2152. (in Chinese)
- 韩颜颜, 孟令媛, 刘桂萍, 等. 2017. 西北地区中强震前固体潮调制比时空特征分析[J]. 地震学报, 39(5): 738 - 750.
- Han Y Y, Meng L Y, Liu G P, et al. 2017. The spatial - temporal characteristics of earth tide modulation ratio before moderate earthquakes in northwest China [J]. Acta Seismologica Sinica, 39(5): 738 - 750. (in Chinese)
- 蒋长胜, 庄建仓. 2010. 基于时 - 空 ETAS 模型给出的川滇地区背景地震活动和强震潜在危险区[J]. 地球物理学报, 53(2): 305 - 317.
- Jiang C S, Zhuang J C. 2010. Evaluation of background seismicity and potential source zones of strong earthquakes in the Sichuan-Yunnan region based on the space - time ETAS model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(2): 305 - 317. (in Chinese)
- 李兵, 谢富仁, 黄金水, 等. 2022. 龙门山断裂带大邑地震空区地应力状态与地震危险性[J]. 中国科学: 地球科学, 52(7): 1409 - 1418.
- Li B, Xie F R, Huang J S, et al. 2022. In situ stress state and seismic hazard in the Dayi seismic gap of the Longmenshan thrust belt [J]. Scientia Sinica Terrae, 52(7): 1409 - 1418. (in Chinese)
- 马茹莹, 王培玲, 刘文邦, 等. 2021. 2018 年 2 月—2019 年 4 月青海 $M_1 4.0$ 地震条带异常特征及指示意义[J]. 地震地磁观测与研究, 42(2): 121 - 122.

- Ma R Y, Wang P L, Liu W B, *et al.* 2021. Anomaly characteristics and indicative significance of $M_L 4.0$ seismic belt in Qinghai from February 2018 to April 2019[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 42(2):121–122. (in Chinese)
- 邵志刚, 武艳强, 季灵运, 等. 2022. 中国大陆活动地块边界带主要断层的强震震间晚期综合判定[J]. *地球物理学报*, 65(12):4643–4658.
- Shao Z G, Wu Y Q, Ji L Y, *et al.* 2022. Comprehensive determination for the late stage of the interseismic period of major faults in the boundary zone of active tectonic blocks in Chinese mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(12):4643–4658. (in Chinese)
- 王芃, 邵志刚, 刘晓霞, 等. 2022. 中国陆区活动地块边界带主要断层10年尺度强震发生概率[J]. *地球物理学报*, 65(10):3829–3843.
- Wang P, Shao Z G, Liu X X, *et al.* 2022. Ten-year probability of strong earthquakes on major faults in boundaries of active blocks in Chinese continent[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(10):3829–3843. (in Chinese)
- 王未来, 房立华, 吴建平, 等. 2021. 2021年青海玛多 $M_S 7.4$ 地震序列精定位研究[J]. *中国科学:地球科学*, 51(7):1193–1202.
- Wang W L, Fang L H, Wu J P, *et al.* 2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 $M_S 7.4$ Maduo Earthquake, Qinghai, China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 51(7):1193–1202. (in Chinese)
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分[C]//地震预报方法实用化研究文集地震学专辑. 北京:地震出版社, 586–589.
- Xu S X. 1989. Earthquake prediction ability score[C]//Seismic prediction method practical research collection; seismological album. Beijing: Seismological Press; 586–589. (in Chinese)
- 易桂喜, 闻学泽, 苏有锦. 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研究[J]. *地球物理学报*, 51(6):1719–1725.
- Yi G X, Wen X Z, Su Y J. 2008. Study on the potential strong-earthquake risk for the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan active faulted-block, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(6):1719–1725. (in Chinese)
- 尹祥础, 陈学忠, 宋治平. 1994. 加卸载响应比理论及其在地震预测中的应用研究进展[J]. *地球物理学报*, 37(1):223–230.
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P. 1994. The development of Load-Unload Response Ratio theory and its application to earthquake prediction[J]. *Acta Geophysica*, 37(1):223–230. (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—a new method to analysis seismicity[J]. *Earthquake Research in China*, 20(1):73–79. (in Chinese)
- 于晨, 王淑艳, 陈界宏, 等. 2021. 2019年6月17日长宁 $M_S 6.0$ 地震前后地壳振动异常分析[J]. *中国地震*, 37(1):84–94.
- Yu C, Wang S Y, Chen J H, *et al.* 2021. Anomalies of ground vibrations before and after the June 17, 2019 Sichuan Changning $M_S 6.0$ earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, 37(1):84–94. (in Chinese)
- Chen C H, Lin L C, Yeh T K, *et al.* 2020. Determination of epicenters before earthquakes utilizing far seismic and GNSS data: Insights from ground vibrations[J]. *Remote Sensing*, 12:3252.
- Field E D. 2007. Special issue: regional earthquake likelihood models[J]. *Seism Res Lett*, 78(1):1–140.
- Holliday J R, Rundle J B, Tiampo K F, *et al.* 2005. Systematic procedural and sensitivity analysis of the Pattern Informatics method for forecasting large earthquake events in Southern California[J]. *Pure Appl Geophys*, 163:2433–2454.
- Jordan T H, Jones L M. 2010. Operational earthquake forecasting: Some thoughts on why and how[J]. *Seismological Research Letters*, 81(4):571–574.
- Jordan T H, Marzocchi W, Michael A J, *et al.* 2006. Operational earthquake forecasting can enhance earthquake preparedness[J]. *Seismological Research Letters*, 77(5):955–959.
- Molchan G, Keilis-Borok V. 2008. Earthquake prediction: probabilistic aspect[J]. *Geophysical Journal International*, 173(3):1012–1017.
- Rundle J B, Klein W, Tiampo K, *et al.* 2000. Linear pattern dynamics in nonlinear threshold systems[J]. *Phys Rev*, E61:2418–2431.
- Rundle J B, Turcotte D L, Shcherbakov R, *et al.* 2003. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems[J]. *Rev Geophys*, 41(4):1019.
- Schorlemmer D, Gerstenberger M C, Wiemer S. 2007. Earthquake likelihood model testing[J]. *Seismological Research Letters*, 78(1):17–29.
- Schorlemmer D, Werner M, Marzocchi W, *et al.* 2018. The collaboratory for the study of earthquake predictability: achievements and priorities[J]. *Seismological Research Letters*, 89(4):1305–1313.
- Tanimoto T, Ishimaru S, Alvizuri C. 2006. Seasonality in particle motion of microseisms[J]. *Geophys Journal International*, 166(1):253–266.
- Wu Y Q, Jiang Z S, and Yang G H. 2011. Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability[J]. *Geophysical Journal International*, 185(2):703–717.
- Yu H Z, Cheng J, Zhang X T, *et al.* 2013. Multi-methods combined analysis of future earthquake potential[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 170:173–183.
- Yu H Z, Yan R, Deng S G, *et al.* 2024. Improved medium-to-short-term earthquake predictions in China in 2022[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Doi:10.1080/19475705.2024.2350482.
- Yu H Z, Yu C, Ma Y C, *et al.* 2021. Determining stress state of source media with identified difference between groundwater level during loading and unloading induced by earth tides[J]. *Water*, 13:2843.
- Yu H Z, Yuan Z Y, Yu C, *et al.* 2022. The medium-to-short-term earthquake predictions in China and their evaluations based on the R

- Score[J]. *Seismol Res Lett*,93(2A):840-852.
Zechar J D, Jordan T H. 2008. Testing alarm - based earthquake predictions[J]. *Geophysical Journal International*,172(2):715-724.

Zhao J, Yuan Z Y, Ren J W, *et al.* 2022. Acceleration of deep slip along the Longmenshan fault plane before the 2008 M8.0 Wenchuan earthquake[J]. *Frontiers in Earth Science*,10:830317.

Construction of Software Systems of the CSEP Testing Center in China

YU Huaizhong, YU Chen, ZHANG Xiaotao, YUAN Zhengyi, ZHONG Jun,
XIE Mengyu, LI Zeping, ZHANG Jingxue
(*China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*)

Abstract

In order to improve standardization of evaluation of earthquake prediction methods, we have attempted to transplant the Collaboration for the Study of Earthquake Prediction (CSEP) to China based on the support of the National Key Research and Development Project, and established a platform for testing earthquake prediction methods. We have developed the prediction modules of Load/Unload Response Ratio (LURR), crustal vibration, state vector, and earthquake comprehensive probability, meanwhile, we have introduced the pattern information (PI), the relative intensity (RI), and the infectious aftershock sequence (ETAS) prediction models. In addition, four earthquake prediction performance evaluation methods, including the Molchan, R -score, N -score, and ROC techniques, were adopted to test above prediction methods. As an open system, we have also incorporated the methods that commonly used prediction practice in China, such as the earthquake occurrence rate, earthquake modulation ratio, and b -value into the testing center. The testing center can perform both retrospective predictive tests and prospective predictive analysis, providing an operating environment and technical support for existing prediction methods. The software system of our testing center helps to systemically test the existing earthquake prediction methods and achieve standardized application. In addition, through comprehensive probability prediction, the quantification of earthquake prediction is promoted and decision-making is optimized. Relevant research results might be gradually applied to the medium-to-short-term prediction work in China.

Keywords: CSEP testing center; prediction modules; testing modules; integrated functionality; openness