



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

区域选取对图像信息法可预测性的影响

田唯熙 张永仙 张盛峰 张小涛

Effect on the predictability of pattern informatics method related to selection of studied regions

Tian Weixi, Zhang Yongxian, Zhang Shengfeng, Zhang Xiaotao

引用本文:

田唯熙, 张永仙, 张盛峰, 张小涛. 2024. 区域选取对图像信息法可预测性的影响. *地震学报*[J], 46(2): 208–225.

DOI: 10.11939/jass.20220113

Tian W X, Zhang Y X, Zhang S F, Zhang X T. 2024. Effect on the predictability of pattern informatics method related to selection of studied regions. *Acta Seismologica Sinica*[J], 46(2): 208–225. DOI: 10.11939/jass.20220113

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220113>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

日本东北 M_w 9.0地震的PI模型参数设置与预测效能回溯性检验

Retrospective test on the forecasting efficacy of PI models with different parameters for the Tohoku–Oki M_w 9.0 earthquake
地震学报. 2018, 40(4): 491–505 <https://doi.org/10.11939/jass.20170170>

短期地震预测准确性的定量评价方法

The evaluation method for the accuracy of short-term earthquake prediction
地震学报. 2019, 41(3): 399–409 <https://doi.org/10.11939/jass.20190001>

鄂尔多斯地块北缘 b 值的时空特征及其地震预测效能分析

Spatio-temporal characteristics of b value in the northern margin of Ordos block and its earthquake prediction efficiency
地震学报. 2018, 40(6): 785–796 <https://doi.org/10.11939/jass.20180020>

南北地震带区域构造应力场反演

Inversion for regional tectonic stress field in the North–South Seismic Belt of China
地震学报. 2019, 41(2): 219–229 <https://doi.org/10.11939/jass.20180073>

南北地震带地震台网监测能力评估的不同方法比较研究

Comparison among different methods for assessing monitoring capability of seismic station in North–South Seismic Belt
地震学报. 2017, 39(3): 315–329 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.03.002>

南北地震带北段的地壳速度结构及其构造启示

Crustal velocity structure beneath the northern North–South Seismic Zone from local seismic tomography and its tectonic implications
地震学报. 2018, 40(5): 547–562 <https://doi.org/10.11939/jass.20180006>

田唯熙, 张永仙, 张盛峰, 张小涛. 2024. 区域选取对图像信息法可预测性的影响. 地震学报, 46(2): 208–225. doi: 10.11939/jass.20220113.
Tian W X, Zhang Y X, Zhang S F, Zhang X T. 2024. Effect on the predictability of pattern informatics method related to selection of studied regions. *Acta Seismologica Sinica*, 46(2): 208–225. doi: 10.11939/jass.20220113.

区域选取对图像信息法可预测性的影响*

田唯熙¹⁾ 张永仙^{1), †} 张盛峰¹⁾ 张小涛²⁾

1) 中国北京1000036 中国地震局地震预测研究所
2) 中国北京100045 中国地震台网中心

摘要 图像信息(PI)法是一种基于统计物理学的地震预测方法, 因其对中长期地震预测有较好的效果已在国内外广泛应用. PI方法在计算过程中对选取区域的所有网格参量进行了归一化, 因此不同的区域选取会产生PI热点结果的变化. 本文基于中国地震台网中心自1970年以来的全国 $M_S \geq 3.0$ 地震目录, 采用5年尺度的“异常学习时段”和“预测时间窗”以及1年尺度的滑动时间步长, 以南北地震带2016年以来发生的 $M_S \geq 6.0$ 地震的回溯性预测检验为例, 研究了不同空间范围的选取对PI方法地震预测效能的影响. 地震预测效能检验采用R值评分法和受试者工作特征(ROC)检验方法. 结果显示: ①在其它计算参数相同的情况下, 不同的区域选取对PI预测结果有较大影响; ②利用R值评分和ROC检验方法对不同研究区的预测效能进行评估时, 区域内部地震活动性差异小的区域预测效果较好, 而对于地震活动性存在较大差异的区域, 地震活动性高的区域内发生的地震更容易被预测, 推测导致这一结果的可能原因是地震活动性较强的区域出现的异常更显著, 而算法里的归一化过程会抑制地震活动性较低区域出现的异常, 从而造成漏报; ③对于具体的目标地震, 震中附近的PI热点图像会经历演化, 因此利用PI方法向前预测时要结合多个时间窗口进行综合预测; ④不同于其它天然构造地震的热点演化趋势, 2019年四川长宁 $M_S 6.0$ 地震和2021年四川泸县 $M_S 6.0$ 地震震中附近热点反复出现、消失, 可能与人工活动有关; ⑤滇西南地区、海原断裂中东部附近、小江断裂中部地区、龙门山断裂南部和小江断裂东北部地区存在持续出现的PI热点, 这些区域为值得关注的 $M_S \geq 6.0$ 地震发震区域.

关键词 图像信息(PI)法 南北地震带 地震可预测性 强震预测 R值评分 ROC检验
doi: 10.11939/jass.20220113 中图分类号: P315.08 文献标识码: A

Effect on the predictability of pattern informatics method related to selection of studied regions

Tian Weixi¹⁾ Zhang Yongxian^{1), †} Zhang Shengfeng¹⁾ Zhang Xiaotao²⁾

1) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China
2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

* 基金项目 国家重点研发计划项目(2018YFE0109700)、国家自然科学基金委地震联合基金(U2039207)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务费(CEAIEF2022030206)共同资助.

收稿日期 2022-06-24 收到初稿, 2022-09-27 决定采用修改稿.

作者简介 田唯熙, 在读硕士研究生, 主要从事地震前兆方面的研究, e-mail: tianweixi20@mails.ucas.ac.cn; †通信作者: 张永仙, 博士, 研究员, 主要从事地震活动性、地震前兆机理及预测方法的研究, e-mail: [yxzhs@sina.com](mailto:yxzhs@ sina.com)



Abstract: The Pattern Informatics (PI) method is a approach for earthquake forecasting based on statistical physics, and has been widely applied both at home and abroad due to its good performance in medium to long term earthquake forecasting. The algorithm of PI method includes the process of normalization of all grid parameters in the selected region, so the distribution of PI hotspots might be different with the different selected studied regions theoretically. However, the predictability of PI due to the selection of studied regions has not been systematically studied so far. We performed the retrospective forecasting for seven earthquakes above $M_S6.0$ in the North-South Seismic Zone since 2016 under different size regions. The earthquake catalogue since 1970 is taken from the China Earthquake Networks Center. Both the anomaly learning period and forecast interval are fixed as five years and the moving step is taken as one year in this study. The forecasting efficiency of PI is tested by R score and ROC (receiver operating characteristic) test. The results showed that different region selection might lead to different forecasting results with the same calculation parameters. The R score and ROC tests results for the selected regions with lower seismicity-difference are better than those with higher seismicity-difference. In the selected regions with higher seismicity-difference, target earthquakes in the areas with higher seismicity tend to be predicted more easily than those in the areas with lower seismicity, which is supposed to be caused by the fact that PI hotspots are more obvious in the areas with higher seismicity and they will suppress the anomalous signal detected by PI algorithm in the areas with lower seismicity, resulting in the missing prediction for the target earthquakes in the areas with lower seismicity. For a specific target earthquake, the imagine of PI hotspot around the epicenter will evolve, so the combination of multiple forecasting windows should be considered when the forward events are predicted using PI method. Different from the hotspots evolution trend of other natural tectonic earthquakes, the hotspots of 2019 $M_S6.0$ Changning and 2021 $M_S6.0$ Luxian earthquakes in Sichuan appeared and disappeared repeatedly near their epicenters, which may be related to human activities. There are continuous PI hotspots at the boundary of southwestern Yunnan, middle and eastern section of Haiyuan fault, the middle Xiaojiang fault, the southern Longmenshan fault and the north-eastern Xiaojiang fault, suggesting that there will be seismic potentials with $M_S6.0$ or above in these regions.

Key words: pattern informatics (PI); North-South Seismic Zone; earthquake predictability; strong earthquake forecasting; R score; ROC test

引言

图像信息(pattern informatics, 简称为PI)法是一种研究地震活动模式的统计方法. 该方法是在希尔伯特(Hilbert)空间创建一个与时间相关的代表地震活动性的系统状态向量, 该空间中单位矢量随时间的变化确定了小地震在大地震之前随着时间从一个地点转移到另一个地点的特征模式, 在对各个模式学习后, 识别一定时间内可能的地震活动模式并给出强震的发生概率, 最终输出包含地震发生概率的“热点”图(Rundle *et al*, 2000a, b, 2002; Tiampo *et al*, 2002). 该方法经过多次改进(Chen *et al*, 2005; Holliday *et al*, 2005)后, 被Holliday等(2006)正式命名为图像信息法, 后在多个国家得到应用. PI方法相对于空间非均匀的泊松模型相对强度(relative intensity, 简称RI)法和均匀泊松模型(随机预测)具有更好的预测效能(蒋长胜, 吴忠良, 2008), 且在中长期的地震预测研究中表现优异(Chen *et al*, 2006; Holliday *et al*,

2006; Nanjo *et al.*, 2006a, b; Radan *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013, 2017; Mohanty *et al.*, 2016; 宋程等, 2018; 尼鲁帕尔·买买吐孙, 余怀忠, 2020; 余怀忠等, 2020; Chang *et al.*, 2020).

图像信息法在我国大陆中部地区的强震预测研究中也得到了很好的应用(蒋长胜, 吴忠良, 2008; Zhao *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013, 2017; 张小涛等, 2014). 蒋长胜等(2009)将强震频发的川滇地区以及安达曼—苏门答腊地区组成统一的强震预测区并对该区域进行回溯性研究, 结果显示汶川 $M_S 8.0$ 地震前震中附近出现了中长期尺度的地震活动异常. Zhao 等(2010)结合 PI 和前兆逆向追踪方法(Keilis-Borok *et al.*, 2004)研究了川滇地区长期的地震活动性, 为中国地震局年度会商工作(郑兆苾等, 2000; Shi *et al.*, 2001; 张国民等, 2002; 马宏生等, 2004; Wu *et al.*, 2007)采用 PI 方法作了一定贡献. Zhang 等(2013)对 2008 年汶川 $M_S 8.0$ 地震和于田 $M_S 7.3$ 地震进行回溯性研究, 结果表明对于较长的时间窗以及较大的网格, 大地震的预测效果更好. 张小涛等(2014)对川滇地区进行的回溯性检验显示 2013 年芦山 $M_S 7.0$ 地震发震前存在热点信息的演化过程, 同时还对该地区进行向前预测, 并提出“2022 年前川滇菱形地块南部热点地区发生 $M_L \geq 6.5$ 地震的概率较高”, 实际上 2021 年的漾濞 $M_S 6.4$ 地震即发生在这一预测区内, 显示了该方法的有效性. 张盛峰(2015)对 PI 方法在南北地震带的适用性进行了检验, 结果表明 PI 算法在南北地震带地区的预测效果优于仅考虑丛集性的“相对强度”RI 算法和随机预测. Zhang 等(2017)对青藏高原及周边地区进行了回溯性研究, 其结果表明, PI 方法在 7—10 年的中长期预测上具有更好的预测效能, 文中讨论部分提出区域的选择可能会影响预测效能, 需后续研究.

2016 年 1 月 31 日至 2022 年 1 月 31 日在南北地震带发生了 7 次 $M_S \geq 6.0$ 地震(不含余震), 为我们研究 PI 方法的可预测性提供了震例条件. 由于 PI 方法的计算过程涉及所选取区域内所有网格参量的归一化处理, 所以不同的选取范围在理论上会产生不同的计算结果. 但前人尚未针对选取范围对预测结果的影响进行系统研究, 因此, 本文将选取不同的地理范围对上述 7 次 $M_S \geq 6.0$ 地震进行回溯性预测研究, 并利用 R 值评分法(许绍燮, 1989)和受试者工作特征(receiver operating characteristic, 缩写为 ROC)检验方法(Swets, 1973; Molchan, 1997)进行地震预测效能检验, 以期获得不同的区域选取对图像信息法可预测性影响的认识.

1 PI 方法

PI 方法的计算过程具体如下:

1) 将研究区划分为 N 个边长为 L 的网格, 网格中心点 X_i 代表该网格, 对每个网格内的地震事件构建一维向量 $\mathbf{N}_i(t)$, 其中 $\mathbf{N}_i(t)$ 是第 i 个网格及其最近邻的 8 个网格[(摩尔(Moore)近邻)]内每单位时间大于截止震级 M_C 的地震数量.

2) 定义五个时刻, t_0, t_b, t_1, t_2, t_3 , 并基于这五个时刻划分三个时段: 背景时段 $[t_b, t_1]$, t_b 在所使用目录的起始时刻 t_0 与 t_1 之间滑动; 异常学习时段 $[t_1, t_2]$, $t_2 > t_1$; 预测时段 $[t_2, t_3]$.

3) 定义第 i 个网格的地震活动强度为 $I_i(t_b, t)$, 求取网格 i 和摩尔近邻网格在背景时段 $[t_b, t_1]$ 内震级 $M > M_C$ 的地震数量的均值.

$$I_i(t_b, t) = \frac{1}{t - t_b} \sum_{t'=t_b}^t N_i(t') \quad (1)$$

4) 对整个研究区所有网格的地震活动强度 $I_i(t_b, t)$ 进行标准化, 定义为:

$$\hat{I}_i(t_b, t) = \frac{I_i(t_b, t) - \langle I_i(t_b, t) \rangle}{\sigma(t_b, t)}, \quad (2)$$

式中, $\langle I_i(t_b, t) \rangle$ 是所有网格的平均地震活动强度, $\sigma(t_b, t)$ 是所有网格地震活动强度的标准差;

5) 定义第 i 个网格的异常地震活动性为异常学习时段偏离背景时段的差值

$$\Delta I_i(t_b, t_1, t_2) = \hat{I}_i(t_b, t_2) - \hat{I}_i(t_b, t_1). \quad (3)$$

6) 计算异常地震活动性的平均变化量, 以减少噪声对结果造成的影响.

$$\overline{\Delta I_i(t_b, t_1, t_2)} = \frac{1}{t_1 - t_0} \sum_{t_b=t_0}^{t_1} \Delta I_i(t_b, t_1, t_2) \quad (4)$$

7) 求取平均异常地震活动性的平方, 并将其定义为发震概率函数 $P_i(t_0, t_1, t_2)$:

$$P_i(t_0, t_1, t_2) = \overline{\Delta I_i(t_0, t_1, t_2)}^2. \quad (5)$$

8) 计算各网格相对于整个区域的发震概率, 将研究区所有网格的平均发震概率作为背景概率:

$$\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) = P_i(t_0, t_1, t_2) - \langle P_i(t_0, t_1, t_2) \rangle, \quad (6)$$

热点定义为 $\Delta P_i(t_0, t_1, t_2)$ 为正值区域, 即发震概率函数 $P_i(t_0, t_1, t_2)$ 高于背景概率的区域.

Rundle 等(2002)提出了“阈值 ω ”的概念, $\omega = \lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$, 其中 ΔP 为第 i 个网格概率与背景概率的差值, ΔP_{\max} 为所有网格概率增益的最大值. 由式(1)–(6)可知, PI 算法以地震目录为输入, 对研究区域划分网格后计算出各网格的地震活动强度, 后续通过标准化、均值计算以及去除背景概率得到“热点”区域, 整个计算过程基于地震活动强度进行, 也因此区域地震活动性的不同对 PI 方法的预测性能会产生影响.

2 研究区域及计算参数选取

2.1 研究区域

本文所选的研究区域为大陆中部地区(21.0°N—41.5°N, 96.0°E—110.0°E), 涉及南北地震带及其周边区域(图 1). 虽然对于南北地震带展布的范围认识不一(康来迅, 1991; 杨兴悦等, 2012; 张盛峰, 2015), 但都包含于本文所选的研究区域. 图 1 中黄色边框矩形是张盛峰(2015)提到的南北地震带(21°N—41.5°N, 97.5°E—107.5°E)范围, 包括我国内蒙古、四川、重庆、云南、贵州、宁夏、甘肃、陕西等多个省市. 根据发震构造不同, 南北地震带分为南段(28°N 以南)、北段(34°N 以北)以及中段(28°N—34°N)三段(杨兴悦等, 2012). 南北地震带历史上共记录到 $M_S \geq 7.0$ 地震 67 次, 包括 7 次 $M_S \geq 8.0$ 地震, 其中北段 4 次, 中段 2 次, 南段 1 次, 这些大震对我国的经济、民生都造成了巨大的损失. 从 1970 年以来的资料来看, 该区域共发生 $M_S 6.0—6.9$ 地震 73 次, $M_S 7.0—7.9$ 地震 18 次, $M_S \geq 8.0$ 地震 1 次(2008 年汶川 $M_S 8.0$ 地震), 即平均一年发生近 2 次 $M_S \geq 6.0$ 地震, 3 年发生 1 次 $M_S \geq 7.0$ 地震, 50 年 1 次 $M_S \geq 8.0$ 地震.

为了获得因区域选取不同对图像信息法可预测性的影响, 本文设计了 6 个不同的研究区域, 内含全部或部分 2016 年以来发生在南北地震带的 $M_S \geq 6.0$ 地震, 通过 ROC 检验方法评估区域的选取对图像信息法地震预测效能的影响. 研究区域列于表 1, 并示于图 1.

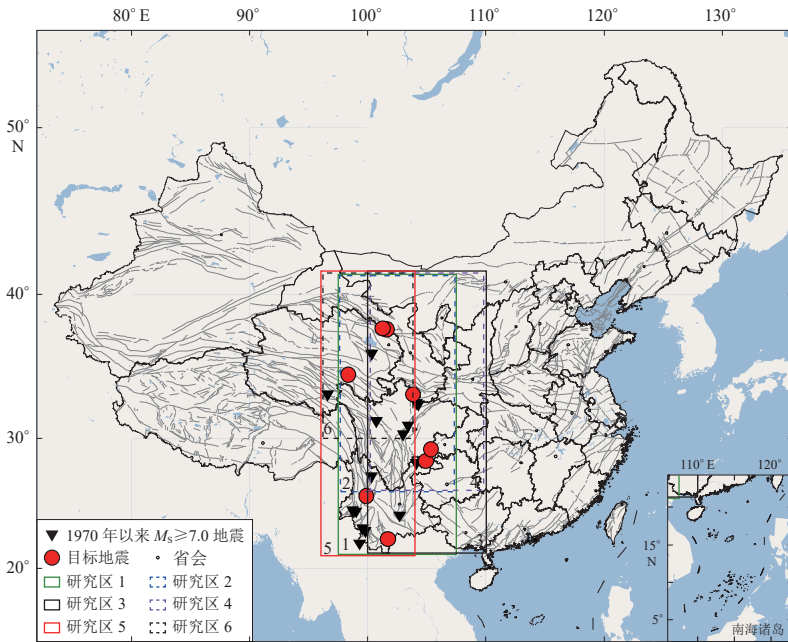


图 1 本文研究区域和相关目标地震图示

Fig. 1 The regions designed and related target earthquakes in this study

表 1 本文研究区域

Table 1 Regions designed in this study

研究区域序号	经纬度范围	网格(1°×1°)数
1	(21°N—41.5°N, 97.5°E—107.5°E)	205
2	(26°N—41.5°N, 97.5°E—107.5°E)	155
3	(21°N—41.5°N, 100°E—110°E)	205
4	(26°N—41.5°N, 100°E—110°E)	155
5	(21°N—41.5°N, 96°E—104°E)	164
6	(30°N—41.5°N, 96°E—104°E)	92

设计的 6 个研究区分别编号 1—6, 其中: 研究区 1 范围为南北地震带区域, 自北向南依次包括阿拉善、祁连、鄂尔多斯、柴达木、巴颜喀拉、川滇、华南、滇南等 8 个二级地块; 研究区 2 相对研究区 1 去除了滇南和部分华南、川滇地块区域; 研究区 3 自北向南依次包括阿拉善、燕山、祁连、鄂尔多斯、柴达木、巴颜喀拉、川滇、华南、滇南等 9 个二级地块, 相对研究区 1 去除了阿拉善、巴颜喀拉、川滇地块的部分地区, 新增了鄂尔多斯、华南地块的部分区域; 研究区 4 相对研究区 3 去除了滇南地块、华南、川滇地块部分地区; 研究区 5 自北向南依次包括阿拉善、祁连、柴达木、巴颜喀拉、川滇、华南、滇西、滇南等 8 个二级地块, 相对研究区 1 和 3 去除了鄂尔多斯地块和华南地块部分地区, 新增了滇西地块, 扩大了位于阿拉善、祁连、柴达木、巴颜喀拉、川滇地块的区域; 研究区 6 相对研究区 5 去除了川滇、华南、滇西、滇南地块以及巴颜喀拉的部分区域.

总的来看, 研究区域按照 1 与 2, 3 与 4, 5 与 6 分为三组, 其中研究区 2, 4, 6 与 1, 3, 5 在东西向上具有相同的经度范围, 但在南北向上不同程度地去除了南部部分地区. 这样设计便于对比区域变化对预测效能的影响.

2.2 用于回溯性 PI 预测检验的目标地震

前人曾利用 PI 方法对南北地震带及周边区域进行强震回溯性检验预测研究(蒋长胜, 吴忠良, 2008; 蒋长胜等, 2009; Zhao *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2013, 2017; 张小涛等, 2014; 张

盛峰, 2015), 针对 2008 年汶川 $M_S 8.0$ 、2013 年芦山 $M_S 7.0$ 、2014 年鲁甸 $M_S 6.5$ 等多次地震都取得了较好的回溯性检验预测效果. 2016 年以来南北地震带地震频发, 因此选取 2016 年 1 月 31 日至 2022 年 1 月 31 日期间的 $M_S \geq 6.0$ 地震作为回溯性检验研究的震例.

本文研究区域中, 2016 年 1 月 31 日至 2022 年 1 月 31 日共发生 7 次 $M_S \geq 6.0$ 地震, 其中 2019 年四川长宁 $M_S 6.0$ 地震和 2021 年四川泸县 $M_S 6.0$ 地震的发震构造被认为与工业开采有关(易桂喜等, 2019, 2021), 但无论是天然构造地震, 还是水库诱发地震、注水诱发地震等人工诱发地震, 地震的发生归根结底是沿某一构造面或结构面发生破裂所致(常祖峰等, 2020). 因此, 本文将上述两震例纳入目标地震, 并通过 PI 图像的演化过程观察天然构造地震与人工活动所引起的地震 PI 图像演化过程是否存在差异. 所选目标地震的空间分布见图 1, 具体信息见表 2.

表 2 本文研究的震例
Table 2 Earthquake cases in this study

序号	发震时间(北京时间) 年-月-日	震中	北纬 $^{\circ}$	东经 $^{\circ}$	M_S
1	2017-08-08	四川九寨沟	33.20	103.82	7.0
2	2019-06-17	四川长宁	28.34	104.90	6.0
3	2021-05-21	云南漾濞	25.67	99.87	6.4
4	2021-05-22	青海玛多	34.59	98.34	7.4
5	2021-09-16	四川泸县	29.20	105.34	6.0
6	2021-12-24	老挝	22.33	101.69	6.0
7	2022-01-08	青海门源	37.77	101.26	6.9

2.3 PI 计算参数的设定

由 PI 方法原理可知, 其算法运行需要进行截止震级 M_C 、目标震级 M_T 、地震事件深度、网格尺度 Δx 、滑动步长 Δt 以及三个时间段(t_b-t_1 , t_1-t_2 , t_2-t_3)等参数的设定.

对于截止震级 M_C 的设定, 首先需要考虑目录的完备性. 本文使用的目录由中国地震台网中心提供. 在 1970 年 1 月 1 日至 2022 年 1 月 31 日期间, 研究区域共记录到 $M_S 3.0-3.9$ 地震 5 763 次, $M_S 4.0-4.9$ 地震 1 153 次, $M_S 5.0-5.9$ 地震 357 次, $M_S 6.0-6.9$ 地震 145 次, $M_S 7.0-7.9$ 地震 26 次, $M_S 8.0-8.9$ 地震 3 次. 利用地震目录绘制 G-R 关系图, 见图 2. 该图显示该地区的完备震级为 $M_S 2.0$. Holliday 等(2005)的研究表明, PI 方法的预测目标震级 $M_T \geq M_C + 2.0$, 因此本文使用的截止震级 M_C 和目标震级 M_T 分别为 4.0 和 6.0. 根据前人经验, 热点显示的阈值参数取 $\lg(\Delta P/\Delta P_{\max}) = -0.6$ (Zhang *et al.*, 2013).

对于网格大小的选取, Zhang 等(2017)对青藏高原及周边地区的研究表明, 预测时间窗为 8—10 年时, 网格为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 效果更佳, 预测

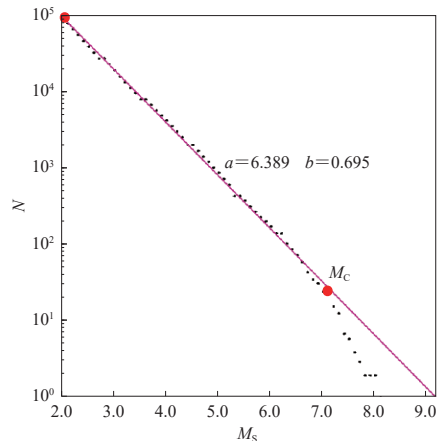


图 2 研究区地震目录完整性分析
Fig. 2 Analysis of the seismic catalogue completeness in study area

时间窗为 7—10 年时网格为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 效果更佳. 张小涛等(2014)对川滇地区 9 年预测时间窗的回溯性研究表明, $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 具有更好的预测效能. 夏彩韵等(2015)对新疆两次于田 $M_S 7.3$ 地震进行回溯性研究发现, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 在该地区的预测效能更好. 由于本研究所选择的部分区域较小, 网格划分为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 时网格数偏少, 会对结果稳定性有一定影响, 因此, 本文采用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格划分, 并系统地研究选取不同区域对图像信息方法可预测性的影响. PI 算法适用 5—10 年的中长期预测, 针对 $M_S \geq 7.0$ 地震, 较长的时间窗会取得更好的预测效果(Zhang *et al.*, 2017), 本文研究区域主要是 $M_S \geq 6.0$ 地震, 因此选取 5 年时间窗、1 年滑动步长进行回溯性检验. 三个时段的选择详列于表 3.

表 3 本研究的时间窗选取

Table 3 Time windows designed in this study

序号	t_0	t_1	t_2	t_3
1	1970	2011-01-31	2016-01-31	2021-01-31
2	1970	2012-01-31	2017-01-31	2022-01-31
3	1970	2013-01-31	2018-01-31	2023-01-31
4	1970	2014-01-31	2019-01-31	2024-01-31
5	1970	2015-01-31	2020-01-31	2025-01-31
6	1970	2016-01-31	2021-01-31	2026-01-31
7	1970	2017-01-31	2022-01-31	2027-01-31

注: 表中 t_0 , t_1 , t_2 和 t_3 为 PI 算法的时间点, 其中背景时段为 $[t_0, t_1]$, 异常学习时段为 $[t_1, t_2]$, 预测时段为 $[t_2, t_3]$, 详见第一节. 共得到 7 个不同的时间段用于 PI 计算.

3 计算结果及分析

3.1 区域选取不同对 PI 预测效能的影响

3.1.1 计算结果分析

根据设定的 PI 参数以及六个研究区进行 PI 计算, 得到 6 (区域数) \times 7 (预测时段数) 共 42 幅 PI 热点图, 这里仅对部分图幅进行分析.

由于所计算的 7 个预测时段中仅时段 1 和 2 所覆盖的预测时间已经结束, 可以进行统计检验, 因此下文基于预测时段 2 (2017-01-31—2022-01-31) 对 6 个研究区的结果进行分析. 图 3 为 6 个研究区域在 2017 年 1 月 31 日至 2022 年 1 月 31 日的 PI 预测图以及在相同时段内研究区实际发生的 $M_S \geq 6.0$ 地震 (蓝色圆圈) 分布. 图 3a 中只有南北地震带南部的滇西南地区出现热点, 2021 年 12 月 24 日老挝 $M_S 6.0$ 地震所在网格的西北摩尔邻近网格出现热点, 整个区域的北部在预测时段发生的 3 次 $M_S \geq 6.9$ 地震却没有热点出现.

区域 2 (图 3b) 是在区域 1 (图 3a) 的基础上去除了滇南和部分华南、川滇地块区域. 这个区域为南北地震带的中段、北段. 在图 3a 中, 南北地震带北段没有热点. 在其它计算参数相同的情况下, 去除了图 3a 南部部分区域后的图 3b 研究区就出现了较多 PI 热点. 2019 年 6 月 17 日长宁 $M_S 6.0$ 地震、2021 年 9 月 16 日泸县 $M_S 6.0$ 地震以及 2022 年 1 月 8 日门源 $M_S 6.9$ 地震都位于新增热点附近, 但 $M_S \geq 7.0$ 地震均未报准. 由图 3a 与图 3b 的对比结果可以看出, 区域选择不同会造成 PI 热点图的不同.

区域 3 (图 3c) 去除了区域 1 (图 3a) 中的阿拉善、巴颜喀拉、川滇地块的部分地区, 新加了鄂尔多斯、华南地块的部分区域. 由图 3c 可见: 该研究区域在中部、南部出现了较多的

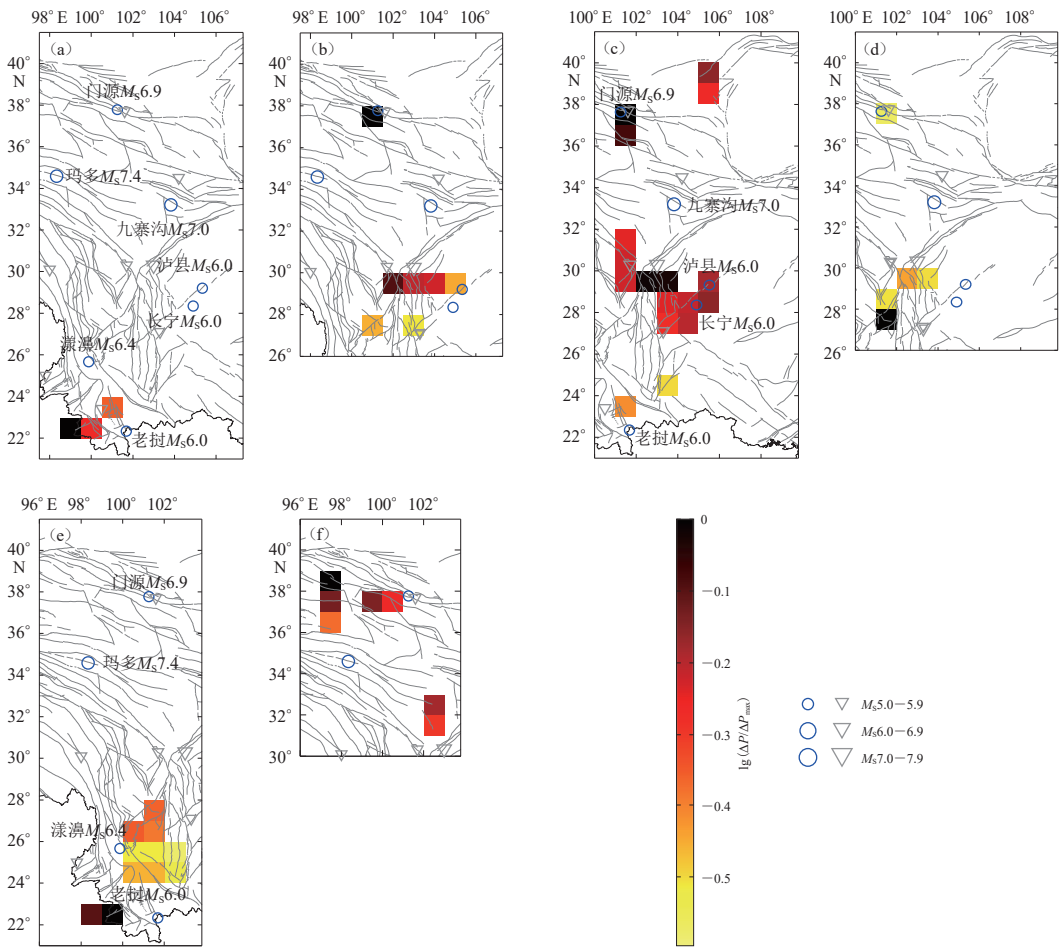


图 3 6 个研究区在 2017 年 1 月 31 日至 2022 年 1 月 31 日预测时段的 PI 热点图

蓝色圆圈表示预测时段内发生的地震, 灰色倒三角表示异常学习时段内发生的地震

(a) 研究区 1; (b) 研究区 2; (c) 研究区 3; (d) 研究区 4; (e) 研究区 5; (f) 研究区 6

Fig. 3 PI seismic hotspots maps in the period from 31 January 2017 to 31 January 2022 for six regions

Blue circles indicate earthquakes that occurred during the prediction period, and gray inverted triangles

represent earthquakes that occurred during the anomaly learning period

(a) Region 1; (b) Region 2; (c) Region 3; (d) Region 4; (e) Region 5; (f) Region 6

PI 热点, 且 2021 年 12 月 24 日老挝 $M_S6.0$ 地震和 2021 年 9 月 16 日泸县 $M_S6.0$ 地震均落在 PI 热点内, 2019 年 6 月 17 日长宁 $M_S6.0$ 地震所在网格的摩尔邻近网格也有热点, 算报准地震.

区域 4 (图 3d) 是把区域 2 (图 3b) 的研究区边界整体向东平移了 2.5° . 由图 3d 可以看到热点的空间分布图有部分相同的, 但热点颜色(发震概率越高的地方越深)有变化, 例如: 图 3d 中发震概率最高的地方在南部的西昌至盐源一带, 但图 3b 中发震概率最高的地方在甘肃祁连到青海门源一带. 与图 3b 相比, 图 3d 的热点减少并相对集中. 从地震的对应情况看, 图 3b 可报准 3 次地震, 图 3d 可报对 2 次地震.

区域 5 (图 3e) 的研究区域是把区域 1 (图 3a) 研究区域的左边界向西平移 1.5° , 右边界向西平移 3.5° . 两个区域的 PI 热点在滇西南地区大致相同, 但图 3e 中川滇交界和云南中部出

现了新的PI热点. 2021年5月21日的漾濞 $M_S6.4$ 地震在图 3e 的研究区域可被预测, 但在图 3a 中被漏报.

区域 6 (图 3f) 是在区域 5 (图 3e) 基础上去除了川滇、华南、滇西南地块以及巴颜喀拉部分区域. 在区域 5 中, 30°N 以北地区 (图 3e) 并没有热点, 但研究区在图 3e 的基础上仅保留 30°N 以北地区后, PI 热点就出现了, 主要集中在四川松潘、理县一带和青海德令哈至都兰一带, 以及青海祁连至甘肃山丹一带. 且除了 2022 年 1 月 8 日门源 $M_S6.9$ 地震报准, 其它热点所在网格及其摩尔邻近网格均未发生 $M_S \geq 6.0$ 地震, 属于虚报热点.

上述结果表明, 在其它参数一致但研究区不同的情况下, PI 预测结果会有很大的差异. 这主要是因为研究区域的变化会导致地震活动性的不同, 若将地震活动性高的区域和地震活动性低的区域一起计算, 会使得后者的异常很难识别.

表 4 是图 3 中各研究区域内发生在预测时间窗内 $M_S \geq 6.0$ 地震的预测检验情况. 可见, 不同区域对同一次地震的预测情况是不同的. 例如, 在包含泸县 $M_S6.0$ 地震的 4 个研究区域内, 研究区 1 和 4 漏报, 而研究区 2 和 3 报准.

表 4 2017 年 1 月 31 日至 2022 年 1 月 31 日预测时段不同区域的预测结果与地震的对应关系

Table 4 The corresponding relationship between the earthquake prediction results and earthquakes in different regions during the prediction period from January 31, 2017 to January 31, 2022

研究区	不同区域的预测与地震的对应关系						各研究区的 地震报准率
	四川九寨沟 $M_S7.0$	四川长宁 $M_S6.0$	云南漾濞 $M_S6.4$	青海玛多 $M_S7.4$	四川泸县 $M_S6.0$	老挝 $M_S6.0$	
1	0	0	0	0	0	1	0.17
2	0	1	/	0	1	/	0.50
3	0	1	/	/	1	1	0.75
4	0	1	/	/	0	/	0.33
5	0	/	1	0	/	0	0.25
6	1	/	/	0	/	/	0.50
各地震的报准比例	0.16	0.75	0.50	0	0.50	0.67	

注: 表中“1”表示报准地震, “0”表示漏报地震, “/”表示该地震未落在该区域的预测时段.

对于不同的研究区域, 预测时间窗内发生的地震报准比例也不同. 由表 4 可见, 研究区 3 能报准 75% 的地震, 研究区 2 和 6 能报准 50% 的地震, 研究区 4 能报准 33% 的地震, 研究区 5 能报准 25% 的地震, 而研究区 1 的地震报准率最低, 只有 17%.

从表 4 还看到: 6 次 $M_S \geq 6.0$ 地震中, 四川九寨沟 $M_S7.0$ 地震和青海玛多 $M_S7.4$ 地震在这一时间窗的预测效果较差; 对于九寨沟 $M_S7.0$ 地震, 除了研究区 6 能预测外, 其它 5 个研究区都漏报; 对于玛多 $M_S7.4$ 地震, 包含该地震的 4 个研究区在这一时间窗均漏报; $M_S6.0$ 地震在各研究区都有较好的对应效果. 这很可能与本研究设置的 PI 参数有关, 这是下一步需要研究的问题.

3.1.2 R 值评分和 ROC 检验

地震预测方法的预测效能需要经过统计检验, 本文参考前人做法 (Holliday *et al.*, 2005), 采用 R 值评分法和 ROC 检验进行效能评估.

1) R 值评分检验. R 值评分法是由许绍燮 (1989) 提出, 本文采用 Shi 等 (2001) 的算法. 其主要步骤是: 将研究区域网格化, 计算报准率减去预报网格数与总网格数之比. 随机预测时

$R=0$, 当 R 大于 0 时表示该方法的预测效能高于随机预测。

$$R = \frac{\text{有震报准数}}{\text{总震数}} - \frac{\text{预报网格数}}{\text{总网格数}} \quad (7)$$

将图 3 中的 6 个研究区域在 2017 年 1 月 31 日至 2022 年 1 月 31 日预测时间窗的 R 值计算出来, 列于表 5。可以看出: 所有研究区的 R 值评分都大于 0, 这表明 PI 方法对 $M_S \geq 6.0$ 地震预测总体上是有效的; 研究区 3 的预测效能最高, R 值评分达到 0.71; 研究区 6 的预测效能次之, R 值评分为 0.60。从图 1 可见, 这两个区域的共同特点是去除了地震活动性偏高的云南及附近地区, 这样就不会出现区域内地震活动差异导致高活动性地区孕震信息压制低活动性地区孕震信息的问题。

2) ROC 检验. ROC 检验主要是通过计算不同阈值 ω 下的获得的“命中率”(纵轴)和“虚报率”(横轴)并绘制 ROC 曲线的评估方法 (Swets, 1973; Molchan, 1997)。Zhang 等 (2013) 将 ROC 检验图的预测检验线与随机预测检验线所包络的面积定义为有效预测系数 E_f , E_f 值介于 0 与 0.5 之间, E_f 值越大, 预测效果越好。预测时段为 2017 年 1 月 31 日至 2022 年 1 月 31 日 PI 算法的 ROC 曲线如图 4 所示, E_f 值列于表 5。

由表 5 和图 4 可得, PI 方法在所有区域的预测效能都高于均匀泊松模型 (随机预测), 其

表 5 各区域统计检验结果

研究区	R 值评分	有效预测系数 E_f
1	0.13	0.377 3
2	0.55	0.463 9
3	0.71	0.403 5
4	0.46	0.420 7
5	0.13	0.331 0
6	0.60	0.287 0

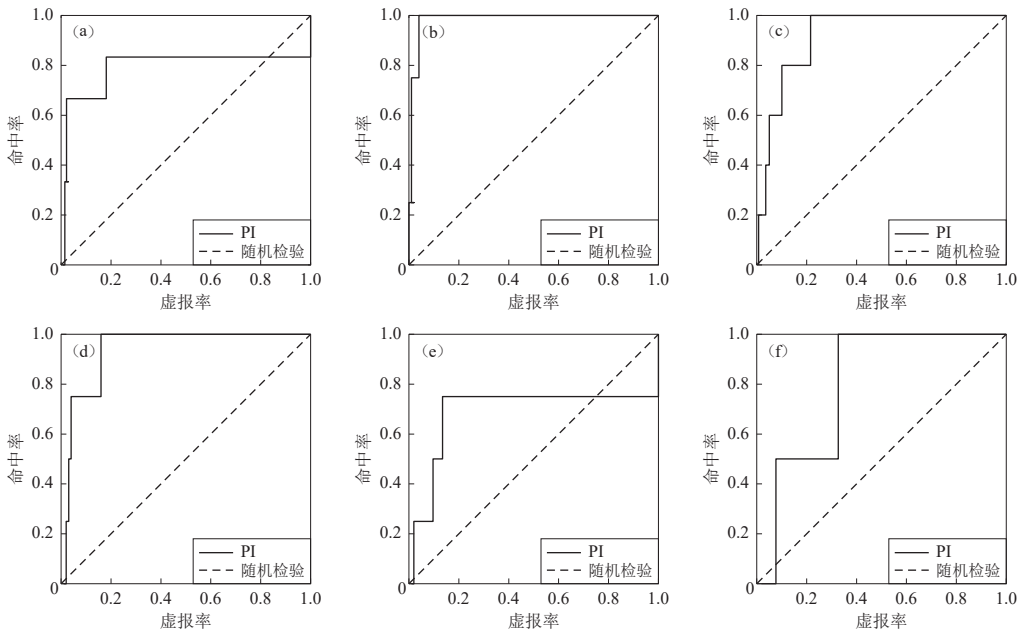


图 4 6 个区域的 PI 算法回溯性研究的 ROC 检验

(a) 研究区 1; (b) 研究区 2; (c) 研究区 3; (d) 研究区 4; (e) 研究区 5; (f) 研究区 6

Fig. 4 ROC test of the PI forecasting for the six selected regions

(a) Region 1; (b) Region 2; (c) Region 3; (d) Region 4; (e) Region 5; (f) Region 6

中研究区 2 的 E_f 值最高, 接近最大值, 之后依次为研究区 4, 3, 1, 5, 6. 研究区 2, 3, 4 的 R 值检验和 ROC 检验得分较高, 这显示以上研究区域用于向前预测时能得到较好效果. 研究区 6 的 R 值评分与 ROC 检验得分差异较大, 表明该区域向前预测具有不稳定的特征, 可能是由于参数等原因, 后续可深入研究. 研究区域 1 和 5 的预测效果在 6 个区域中排倒数, 不适用于向前预测.

3.2 PI 热点图的时空演化趋势

图 3 仅显示了单一预测时段的结果, 实际上可以通过多个预测时段的结果来获取热点异常的演化趋势, 继而进行地震预测. 下面将以三个典型区域为例来分析讨论. 第一个为研究区 1; 第二个为研究区 3, 从表 5 给出的结果看该区和研究区 2 在图 3 预测窗内的预测效能最优; 第三个为研究区 6, 从表 5 给出的结果看该区在图 3 预测窗内的预测效能稳定性最差.

3.2.1 研究区 1 的 PI 热点演化与强震活动分析

图 5 为研究区 1 在 7 个预测时间窗的 PI 预测图像.

图 5b 即图 3a. 在图 3a 预测时间窗时, 2021 年漾濞 $M_S6.4$ 地震、2021 年泸县 $M_S6.0$ 地震震中附近并未出现“热点”, 因此在表 5 中评估预测效能时, 为漏报地震. 但在图 5d, 5e 和图 5f 这三个时间窗内, 这两次地震震中附近就出现了 PI 热点, 并且随时间发震概率增高, 显示这两次地震可以在这三个时间窗口报准.

但 2021 年玛多 $M_S7.4$ 地震震中附近无论在哪一个时间窗口的 PI 热点预测图上均未出现热点, 不能被预测出来. 这个研究区的 PI 时空演化图显示南北地震带南段的 $M_S \geq 6.0$ 地震可以在震前作出预测. 但北段基本未出现 PI 热点, 发生在北段的 2017 年九寨沟 $M_S7.0$ 地震、2021 年玛多 $M_S7.4$ 地震和 2022 年 M_S 门源 6.9 地震都未能作出预测. 本文参考前人 (Holliday *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2013) 的研究结果, 所选的震级下限为 $M4.0$, 所预测的目标震级为 $M6.0$ 以上, 预测时间窗为 5 年, 网格尺寸为 $1^\circ \times 1^\circ$. 从检验结果看, 此套参数对 $M_S6.0$ 地震的预测效果较好, 但对 $M_S7.0$ 地震的预测效果较差, 这表明对于 $M7.0$ 以上地震的预测还需要优化参数. 同时况春利等 (2019) 研究显示, 二十世纪以来南北地震带中南段的中强震显著多于北段, 认为中段和南段的地震分布较为相似, 与北段存在明显差异. 因此若同时分析南北地震带中、南段和北段, 则北部相对较弱的地震异常信息会被掩盖. 本研究认为是以上原因导致了北段的地震预测效果较差.

3.2.2 研究区 3 的 PI 热点演化与强震活动分析

图 6 为研究区 3 在 7 个预测时间窗的 PI 预测图像.

图 6a 即图 3c. 在图 3c 时间窗口中, 2021 年长宁 $M_S6.0$ 、2021 年泸县 $M_S6.0$ 以及 2021 年老挝 $M_S6.0$ 地震的震中及其摩尔近邻网格都出现了“热点”, 但热点对应的发震概率较低. 在图 6d, 6e 和图 6f 三个时间窗中, 上述三次地震震中对应的 PI 热点值随着时间推移逐渐升高, 同时 PI 热点对应的网格数减少且更加集中于地震震中位置.

2022 年门源 $M_S6.9$ 地震震中在图 6b-f 这 5 个时间窗中都位于 PI 热点内, 且 PI 热点呈现一个“出现→达到峰值→逐渐降低”的演化过程, 该地震的预测效果很好.

2017 年九寨沟 $M_S7.0$ 地震只存在于图 6a 和 6b 的时间窗, 且该地震震中都没有 PI 热点产生, 现有结果不能预测该地震. 针对本文设计的 5 年预测时间窗, 若深入研究需给出剩下包含该地震的预测时间窗的 PI 预测图像. 这个研究区的 PI 时空演化图显示该区域的 $M_S6.0$ 地震都可以在震前作出预测.

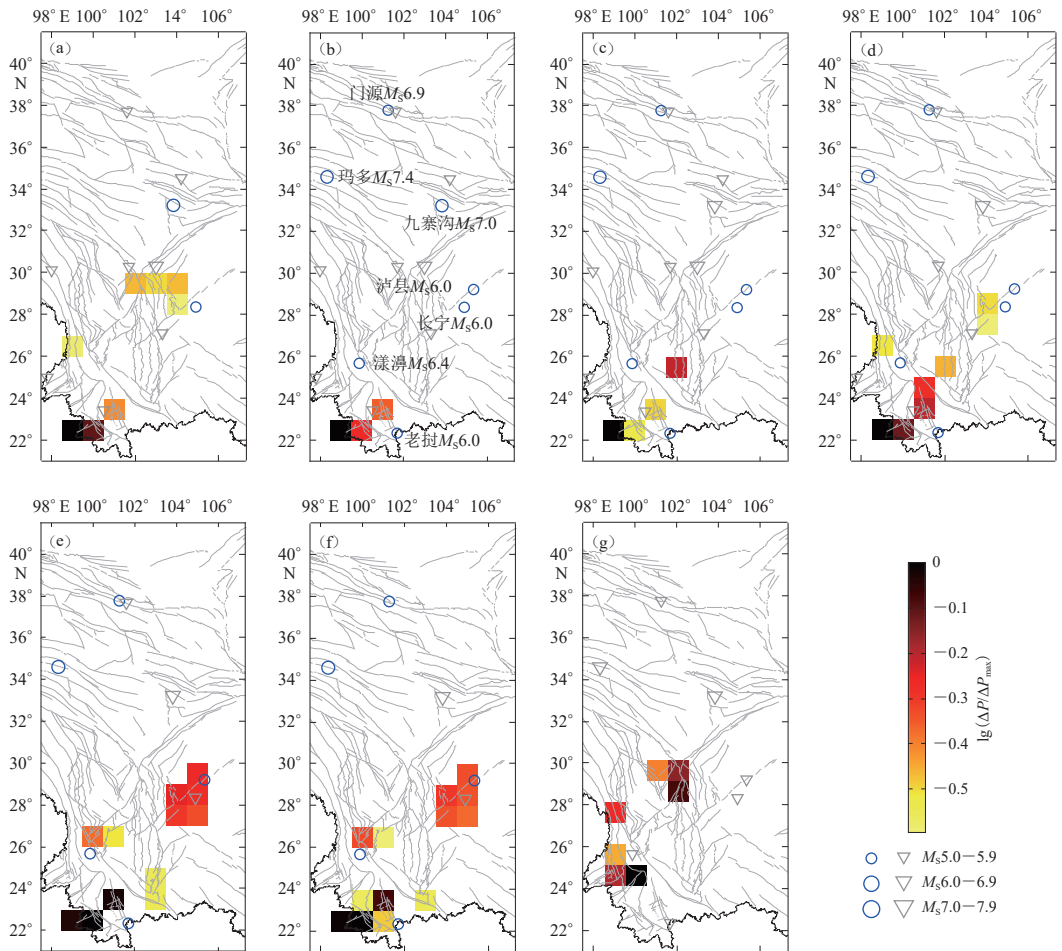


图5 研究区1内不同预测时间窗口的PI地震热点演化

蓝色圆圈表示预测时段内发生的地震, 灰色倒三角表示异常学习时段内发生的地震

Fig. 5 Evolution of PI seismic hotspots for different time windows in region 1

Blue circles indicate earthquakes that occurred during the prediction period, and gray inverted triangles represent earthquakes that occurred during the anomaly learning period

(a) 2016—2020; (b) 2017—2021; (c) 2018—2022; (d) 2019—2023; (e) 2020—2024; (f) 2021—2025; (g) 2022—2026

3.2.3 研究区6的PI热点演化与强震活动分析

图7为研究区6在7个预测时间窗的PI预测图像。

图7b即图3f. 在图3f时间窗口中, 2021年玛多 $M_s7.4$ 地震震中附近并未出现热点, 因此在表5中评估预测效能时, 为漏报地震. 且在后续的时间窗口中, 该地震周围始终未出现热点, 不能被预测出来. 但图7b-7f中2022年门源 $M_s6.9$ 地震却始终位于PI热点及其摩尔邻近网格内, 说明该区域对于 $M_s \geq 6.0$ 地震可以在震前作出预测.

3.3 研究区综合分析

对计算所得的43幅PI热点图进行分析, 得出以下认识:

1) 在2017年1月31日至2022年1月31日预测时段, 除去研究区6对2017年 $M_s7.0$ 九寨沟地震有一定的预测效能, 其它区域针对 $M_s \geq 7.0$ 的地震预测效能较差. 可能是因为本文

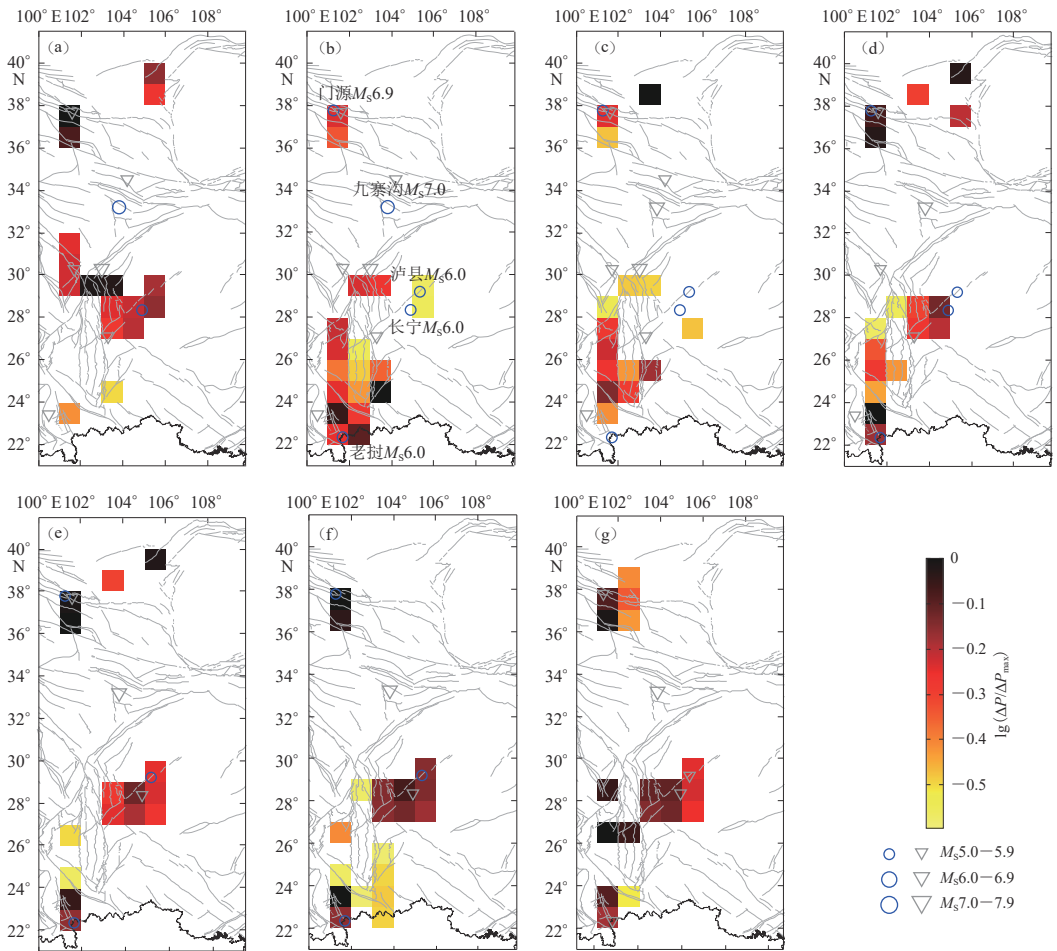


图 6 研究区 3 不同预测时间窗口的 PI 地震热点演化图

蓝色圆圈表示预测时段内发生的地震，灰色倒三角表示异常学习时段内发生的地震

Fig. 6 Evolution of PI seismic hotspots for different time windows in region 3

Blue circles indicate earthquakes that occurred during the prediction period, and gray inverted triangles represent earthquakes that occurred during the anomaly learning period

(a) 2016—2020; (b) 2017—2021; (c) 2018—2022; (d) 2019—2023; (e) 2020—2024; (f) 2021—2025; (g) 2022—2026

的 PI 参数适合 $M_S6.0$ 地震的预测，后续可根据 Zhang 等(2017)的研究结果探究 PI 方法针对 $M_S \geq 7.0$ 的参数设定。

2) 一般情况下，强震发生后震中附近的热点会逐渐消失，震后震中附近如果持续存在热点，后续还可能发生强震。例如：2016 年 1 月 21 日门源发生 $M_S6.4$ 地震，但研究区域 1—4 显示地震发生后，该地区的地震热点始终存在，之后发生了 2022 年门源 $M_S6.9$ 地震。

3) 对各研究区的热点演化过程的分析可知：① 在研究区 1 中南部滇西南地区始终存在热点且在 2021 年漾濞 $M_S6.4$ 地震、2021 年老挝 $M_S6.0$ 地震发生后，高概率热点依然存在；② 研究区 2 中海原断裂中东部附近存在逐渐演化的高概率热点；③ 在研究区 3 和 4 中可以看到 2021 年泸县 $M_S6.0$ 地震发生前有一个明显的热点概率逐渐增加达到峰值再衰减的演化过程，但是地震发生后龙门山断裂南部和小江断裂东北部地区的地震热点对应概率反而达到

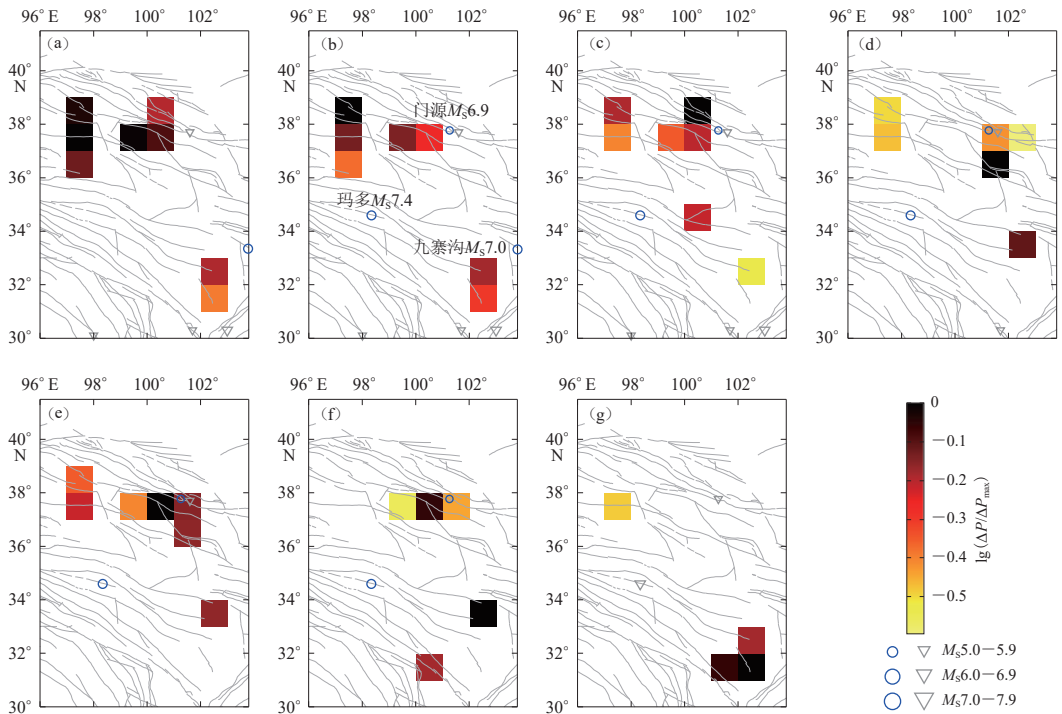


图 7 研究区 6 不同预测时间窗口的 PI 地震热点演化图

蓝色圆圈表示预测时段内发生的地震, 灰色倒三角表示异常学习时段内发生的地震

Fig. 7 Evolution of PI seismic hotspots for different time windows in region 6

Blue circles indicate earthquakes that occurred during the prediction period, and gray inverted triangles represent earthquakes that occurred during the anomaly learning period

(a) 2016—2020; (b) 2017—2021; (c) 2018—2022; (d) 2019—2023; (e) 2020—2024; (f) 2021—2025; (g) 2022—2026

了一个极高值. 此外, 研究区 5 中小江断裂处同样出现了高概率热点; ④长宁 $M_S 6.0$ 地震震中附近热点趋势呈现“出现→概率降低或消失→震前再现”的演化趋势, 泸县地震震中附近热点演化在研究区 1 和 3 却呈现两种不同的趋势, 在研究区 1 中为“逐渐出现→概率升高→逐渐消失”的演化趋势, 在研究区 3 中呈现“逐渐出现→消失→再次出现→概率升高→震后热点持续存在”的演化趋势. 两次地震均出现了热点反复“出现→消失”的过程, 相比于门源、漾濞等天然构造地震呈现的“震前逐渐出现→达到峰值→逐渐消失”的热点演化过程具有一定的差异性.

根据前文 PI 热点演化与强震之间的关系, 上述地区为 $M_S \geq 6.0$ 地震值得关注的发震区域.

4 讨论与结论

本文以中国大陆中部地区(南北地震带及周边区域)为研究范围, 通过划分 6 个不同的研究区, 开展了不同空间范围的选取对地震预测效果的影响研究, 并基于 ROC 和 R 值评分方法进行了统计检验, 得到的结论如下:

1) 相比于地震活动强度差异较大的区域, 图像信息方法在地震活动强度存在差异的区

域具有更好的预测效能. 这可能是导致 PI 方法对南北地震带南部的地震具有较好预测效果, 但是对北部地区的地震预测效果则较差的原因.

2) 根据对所有研究区的“热点”时空演化趋势分析, 2027 年以前滇西南地区、海原断裂中东部附近、小江断裂中部地区以及龙门山断裂南部和小江断裂东北部地区存在的“热点”地区发生 $M_S \geq 6.0$ 地震的概率较高.

PI 方法在实际的地震预报过程中仍然存在许多局限性:

1) 进行回溯性研究时, 往往会通过参数调整以突出震前热点, 具有较强的主观性, 在实际的预测过程中需提前分析选定研究区域的最优参数设置以确保 PI 方法预测的稳定性. 根据 Zhang 等 (2013) 的结果, 本文选定的时间窗尺度为 5 年, 后续可深入研究不同时间窗尺度的 PI 方法的预测效能, 以将该方法用于年度危险区判定和地震大形势预测.

2) 在本文的研究结果中, 所有的研究区域对于 2021 年玛多 $M_S 7.4$ 地震都未呈现较好的预测效果, 推测原因有以下几点: ① 震前没有出现偏离平衡态的异常地震活动是可能的, 玛多地震可能属于此类地震, 需后续综合各因素深入研究; ② 玛多地震的震中位于青藏地块内次级地块巴颜喀拉地块内部, 本文主要针对南北地震带整体进行研究, 后续可以针对巴颜喀拉地块对玛多地震进行深入研究; ③ 本文所采用的截止震级和目标震级为 $M_C 4.0$ 和 $M_T 6.0$, 针对 $M_S 7.0$ 地震, 后续可选定合适的截止震级进行研究; ④ 针对大地震, 相对大的网格和较长的时间窗会取得更好的效果 (Zhang *et al.*, 2013). 本文主要采用的是 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格以及 5 年的时间窗, 后续可选择更大的网格以及更长的时间窗进行研究.

3) 在目标震例中, 本文选取了被认为与工业开采有关的两次地震, 分别为 2019 年长宁 $M_S 6.0$ 地震和 2021 年泸县 $M_S 6.0$ 地震. 在 PI 图像演化的分析过程中, 两地震震中附近都出现了热点反复出现→消失的现象, 相比于门源、漾濞等天然构造地震的热点演化过程具有一定的差异性. 推测认为这两次地震的 PI 图像演化区别于构造地震, 可能主要受人工开采活动的影响, 但还需后续对相关地区活动深入调查分析.

本文中还有一个值得探讨的现象: 在 2016 年的门源 $M_S 6.0$ 地震发生以后, 该地区的热点并未消失, 而是始终处于一个发震概率的高值, 之后 2022 年门源 $M_S 6.9$ 地震发生. 夏彩韵等 (2015) 针对两次新疆于田 $M_S 7.3$ 地震进行了检验, 其结果表明它们都发生在发震概率的峰值处. 后续可深入研究两次门源地震的关联性.

中国地震台网中心提供了地震目录数据, 中国地震局地球物理研究所张琰博士在作图方面提供了帮助, 作者在此谨表谢意.

参 考 文 献

- 常祖峰, 张艳凤, 王光明, 张世民, 毛泽斌, 刘昌伟. 2020. 2019 年四川长宁 $M_S 6.0$ 地震的地质构造成因: 区域性构造节理贯通、破裂结果 [J]. *地球学报*, **41**(4): 469–480.
- Chang Z F, Zhang Y F, Wang G M, Zhang S M, Mao Z B, Liu C W. 2020. The geological genesis of the 2019 Changning $M_S 6.0$ earthquake in Sichuan: Connecting and rupturing of regional structural joints [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, **41**(4): 469–480 (in Chinese).
- 蒋长胜, 吴忠良. 2008. 对地震预测的一个统计物理算法在川滇地区的回溯性预测检验 [J]. *中国科学(D 辑)*, **38**(7): 852–861.
- Jiang C S, Wu Z L. 2008. Retrospective forecasting test of a statistical physics model for earthquakes in Sichuan-Yunnan

- region[J]. *Science in China: Series D*, **51**(10): 1401–1410.
- 蒋长胜, 吴忠良, 马宏生, 周龙泉. 2009. PI 算法用于川滇-安达曼-苏门答腊地区 7.0 级以上强震危险性预测的回溯性检验[J]. *地震学报*, **31**(3): 307–318.
- Jiang C S, Wu Z L, Ma H S, Zhou L Q. 2009. Sichuan-Yunnan versus Andaman-Sumatra: PI approach and retrospective forecast test[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(3): 307–318 (in Chinese).
- 康来迅. 1991. 中国南北地震带的基本特征及其形成机理之探讨[J]. *地壳形变与地震*, **11**(4): 76–85.
- Kang L X. 1991. Discussion on the basic characteristics and formation mechanism of the South-North Seismic Zone in China[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **11**(4): 76–85 (in Chinese).
- 况春利, 唐新功, 于恒达, 杨士达, 胡家文, 任子钧. 2019. 南北地震带地震活动特征[J]. *国际地震动态*, (7): 2–8.
- Kuang C L, Tang X G, Yu H D, Yang S D, Hu J W, Ren Z J. 2019. Study on the seismic distribution and migration law of North-South Seismic Belt in China[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (7): 2–8 (in Chinese).
- 马宏生, 刘杰, 吴昊, 李杰飞. 2004. 基于 R 值评分的年度地震预报能力评价[J]. *地震*, **24**(2): 31–37.
- Ma H S, Liu J, Wu H, Li J F. 2004. Scientific evaluation of annual earthquake prediction efficiency based on R -value[J]. *Earthquake*, **24**(2): 31–37 (in Chinese).
- 尼鲁帕尔·买买吐孙, 余怀忠. 2020. 利用图像信息方法研究库车 $M_S5.6$ 、于田 $M_S6.4$ 地震前异常演化[J]. *内陆地震*, **34**(3): 215–222.
- Maimaitusun N, Yu H Z. 2020. Anomalous evolution before Kuche $M_S5.6$ and Yutian $M_S6.4$ earthquake by pattern informatics method[J]. *Inland Earthquake*, **34**(3): 215–222 (in Chinese).
- 宋程, 张永仙, 夏彩韵, 张盛峰, 高冰莹, 郑世禄. 2018. 日本东北 $M_w9.0$ 地震的 PI 模型参数设置与预测效能回溯性检验[J]. *地震学报*, **40**(4): 491–505.
- Song C, Zhang Y X, Xia C Y, Zhang S F, Gao B Y, Zheng S L. 2018. Retrospective test on the forecasting efficacy of PI models with different parameters for the Tohoku-Oki $M_w9.0$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **40**(4): 491–505 (in Chinese).
- 夏彩韵, 张永仙, 张小涛, 吴永加. 2015. 利用两次新疆于田 $M_S7.3$ 地震对图像信息方法可预测性的检验[J]. *地震学报*, **37**(2): 312–322.
- Xia C Y, Zhang Y X, Zhang X T, Wu Y J. 2015. Predictability test for pattern information method by two $M_S7.3$ Yutian, Xinjiang, earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(2): 312–322 (in Chinese).
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分[G]//地震预报方法实用化攻关文集(测震分册). 北京: 地震出版社: 586–589.
- Xu S X. 1989. The evaluation of earthquake prediction ability[G]//*The Practical Research Papers on Earthquake Prediction Methods (Seismicity Section)*. Beijing: Seismological Press: 586–589 (in Chinese).
- 杨兴悦, 杨立明, 陈继峰, 张辉, 王燕, 李冬梅. 2012. 南北地震带南北段地震迁移现象[J]. *地震地磁观测与研究*, **33**(5/6): 7–12.
- Yang X Y, Yang L M, Chen J F, Zhang H, Wang Y, Li D M. 2012. Discussion on earthquake migration phenomenon of northern and southern zone in North-South Seismic Belt[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **33**(5/6): 7–12 (in Chinese).
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 赵敏, 王思维, 宫悦, 乔慧珍, 苏金蓉. 2019. 2019年6月17日四川长宁 $M_S6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. *地球物理学报*, **62**(9): 3432–3447.
- Yi G X, Long F, Liang M J, Zhao M, Wang S W, Gong Y, Qiao H Z, Su J R. 2019. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019 $M_S6.0$ Sichuan Changning earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(9): 3432–3447 (in Chinese).
- 易桂喜, 龙锋, 赵敏, 梁明剑, 王明明, 周荣军, 王思维. 2021. 2021年9月16日四川泸县 $M_S6.0$ 地震序列特征及孕震构造环境[J]. *地球物理学报*, **64**(12): 4449–4461.
- Yi G X, Long F, Zhao M, Liang M J, Wang M M, Zhou R J, Wang S W. 2021. Characteristics of the seismic sequence and seismogenic environment of the $M_S6.0$ Sichuan Luxian earthquake on September 16, 2021[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **64**(12): 4449–4461 (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_S 6.4 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科学评价[J]. *地震学报*, **24**(5): 525–532.
- Zhang G M, Liu J, Shi Y L. 2002. An scientific evaluation of annual earthquake prediction ability[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **15**(5): 550–558.
- 张盛峰. 2015. “地震可预测性合作研究”计划(CSEP)南北地震带试验区地震活动的一些统计地震学特征及其在地震预测中的应用[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 28–34, 77–80.
- Zhang S F. 2015. *Statistical-Seismological Features of Seismicity in the CSEP Testing Region of the Central China South-North Seismic Zone With Implications for Earthquake Predictability*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 28–34, 77–80 (in Chinese).
- 张小涛, 张永仙, 夏彩韵, 吴永加, 余怀忠. 2014. 利用图像信息方法研究芦山 M_S 7.0 地震前川滇及附近地区的图像异常[J]. *地震学报*, **36**(5): 780–789.
- Zhang X T, Zhang Y X, Xia C Y, Wu Y J, Yu H Z. 2014. Anomalous seismic activities in the Sichuan-Yunnan region and its adjacent areas before the Lushan M_S 7.0 earthquake by the pattern informatics method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(5): 780–789 (in Chinese).
- 郑兆苾, 刘杰, 李罡风, 钱家栋, 汪雪泉. 2000. 全国年度地震重点危险区与地震相关性的统计模拟分析[J]. *地震学报*, **22**(5): 538–546.
- Zheng Z B, Liu J, Li G F, Qian J D, Wang X Q. 2000. Statistical simulation analysis of the correlation between the annual estimated key regions with a certain seismic risk and the earthquakes in China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **13**(5): 575–584.
- Chang L Y, Chen C C, Telesca L, Li H C, Cheong S A. 2020. Pattern informatics and the soup-of-groups model of earthquakes: A case study of Italian seismicity[J]. *Pure Appl Geophys*, **177**(9): 4089–4096.
- Chen C C, Rundle J B, Holliday J R, Nanjo K Z, Turcotte D L, Li S C, Tiampo K F. 2005. The 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake as a typical example of seismic activation and quiescence[J]. *Geophys Res Lett*, **32**(22): L22315.
- Chen C C, Rundle J B, Li H C, Holliday J R, Nanjo K Z, Turcotte D L, Tiampo K F. 2006. From tornadoes to earthquakes: Forecast verification for binary events applied to the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Terr, Atmos Ocean Sci*, **17**(3): 503–516.
- Holliday J R, Nanjo K Z, Tiampo K F, Rundle J B, Turcotte D L. 2005. Earthquake forecasting and its verification[J]. *Nonlin Processes Geophys*, **12**(6): 965–977.
- Holliday J R, Rundle J B, Tiampo K F, Klein W, Donnellan A. 2006. Systematic procedural and sensitivity analysis of the pattern informatics method for forecasting large ($M>5$) earthquake events in southern California[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(11/12): 2433–2454.
- Keilis-Borok V, Shebalin P, Gabrielov A, Turcotte D. 2004. Reverse tracing of short-term earthquake precursors[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **145**(1/2/3/4): 75–85.
- Mohanty W K, Mohapatra A K, Verma A K, Tiampo K F, Kislay K. 2016. Earthquake forecasting and its verification in north-east India[J]. *Geomatics, Nat Hazards Risk*, **7**(1): 194–214.
- Molchan G M. 1997. Earthquake prediction as a decision-making problem[J]. *Pure Appl Geophys*, **149**(1): 233–247.
- Nanjo K Z, Rundle J B, Holliday J R, Turcotte D L. 2006a. Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(11/12): 2417–2432.
- Nanjo K Z, Holliday J R, Chen C C, Rundle J B, Turcotte D L. 2006b. Application of a modified pattern informatics method to forecasting the locations of future large earthquakes in the central Japan[J]. *Tectonophysics*, **424**(3/4): 351–366.
- Radan M Y, Hamzehloo H, Peresan A, Zare M, Zafarani H. 2013. Assessing performances of pattern informatics method: A retrospective analysis for Iran and Italy[J]. *Nat Hazards*, **68**(2): 855–881.
- Rundle J B, Klein W, Tiampo K, Gross S. 2000a. Linear pattern dynamics in nonlinear threshold systems[J]. *Phys Rev E*, **61**(3): 2418–2431.

- Rundle J B, Klein W, Turcotte D L, Malamud B D. 2000b. Precursory seismic activation and critical-point phenomena[J]. *Pure Appl Geophys*, **157**(11/12): 2165–2182.
- Rundle J B, Tiampo K F, Klein W, Martins J S S. 2002. Self-organization in leaky threshold systems: The influence of near-mean field dynamics and its implications for earthquakes, neurobiology, and forecasting[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, **99**(S_1): 2514–2521.
- Shi Y L, Liu J, Zhang G M. 2001. An evaluation of Chinese annual earthquake predictions, 1990–1998[J]. *J Appl Probab*, **38**(A): 222–231.
- Swets J A. 1973. The relative operating characteristic in psychology: A technique for isolating effects of response bias finds wide use in the study of perception and cognition[J]. *Science*, **182**(4116): 990–1000.
- Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S A, Klein W. 2002. Pattern dynamics and forecast methods in seismically active regions[J]. *Pure Appl Geophys*, **159**(10): 2429–2467.
- Wu Z L, Liu J, Zhu C Z, Jiang C S, Huang F Q. 2007. Annual consultation on the likelihood of earthquakes in continental China: Its scientific and practical merits[J]. *Earthquake Research in China*, **21**(4): 365–371.
- Zhang Y X, Zhang X T, Wu Y J, Yin X C. 2013. Retrospective study on the predictability of pattern informatics to the Wenchuan M8.0 and Yutian M7.3 earthquakes[J]. *Pure Appl Geophys*, **170**(1/2): 197–208.
- Zhang Y X, Xia C Y, Song C, Zhang X T, Wu Y J, Xue Y. 2017. Test of the predictability of the PI method for recent large earthquakes in and near Tibetan Plateau[J]. *Pure Appl Geophys*, **174**(6): 2411–2426.
- Zhao Y Z, Wu Z L, Jiang C S, Zhu C Z. 2010. Reverse tracing of precursors applied to the annual earthquake forecast: Retrospective test of the annual consultation in the Sichuan-Yunnan region of southwest China[J]. *Pure Appl Geophys*, **167**(6): 783–800.