

宋程,张永仙,周少辉,等. 2023. 2021年玛多 $M_s7.4$ 地震的PI热点特征回溯性预测研究[J]. 地震研究, 46(2): 226–236, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0027.

Song C, Zhang Y X, Zhou S H, et al. 2023. Retrospective study on the forecast of the 2021 Maduo $M_s7.4$ earthquake by PI method[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(2): 226–236, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0027.

2021年玛多 $M_s7.4$ 地震的PI热点特征 回溯性预测研究*

宋程¹, 张永仙^{2*}, 周少辉³, 毕金孟¹, 徐小远¹

(1. 天津市地震局, 天津 300201; 2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;
3. 山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要:应用图像信息(PI)方法研究2021年玛多 $M_s7.4$ 地震前后的热点特征变化。以8 a预测窗长、 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ 网格尺度为主要参数,获取2009—2028年逐年滑动的预测窗热点分布图像。结果显示:①在2009—2020年的5个连续回溯性预测窗口中,玛多地震的震中所在网格及其摩尔邻近网格持续存在密集热点,对发震地点指示作用较强。②2014—2028年,多数预测窗口内玛多地震震中或摩尔邻近网格出现过PI热点;在最后3个连续预测窗口内(2019—2026年、2020—2027年、2021—2028年),震中附近出现密集深色热点且呈逐渐收缩的趋势,对发震紧迫性具有一定的指示意义。③综合2009年以来的热点演化图像可知,巴颜喀拉地块、柴达木地块、祁连地块和羌塘地块内都出现过热点,出现在巴颜喀拉地块与柴达木地块交界玛多县附近的热点频次高、颜色深、覆盖面积较大,表明青藏块体内部巴颜喀拉地块中北缘地震活动性较强、相对发震风险较高。

关键词:玛多 $M_s7.4$ 地震;PI方法;热点;回溯性预测

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)02-0226-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0027

0 引言

2021年5月22日在青海省东部果洛州玛多县(34.59°N , 98.34°E)发生 $M_s7.4$ 地震,震源深度17 km。玛多 $M_s7.4$ 地震震中位于青藏块体内次级块体巴颜喀拉地块内部,距离块体北边界东昆仑断裂带以南约70 km(岳冲等, 2021; 詹艳等, 2021)。20世纪末以来,中国大陆7级以上地震主要分布在巴颜喀拉地块周缘,如1997年西藏玛尼

$M_s7.9$ 地震、2001年青海昆仑山口西 $M_s8.1$ 地震、2008年四川汶川 $M_s8.0$ 地震、2010年青海玉树 $M_s7.1$ 地震、2013年四川芦山 $M_s7.0$ 地震和2017年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震。自印度—欧亚板块新生代碰撞以来,青藏高原及其周缘山地不断隆升,构造变形及应力传递对整个东亚地区的构造也都带来了深远的影响(Yin, Harrison, 2000)。其中青藏高原中北缘巴颜喀拉地块及周缘地区构造变形强烈(李海兵等, 2021),除其边界断裂的持续变形外,其内部断裂系统也较为复杂,形成了一

* 收稿日期: 2022-04-07.

基金项目:震情跟踪定向任务(2021010104, 2021010128);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(2018YFE0109700);国家自然科学基金委地震联合基金“基于数值模拟的确定性——概率地震危险性分析方法研究(U2039207);天津市地震局局内重点科研项目(Zd202202, Zd202304)。

第一作者简介:宋程(1992-),工程师,主要从事地震预报分析相关研究.E-mail: nibushiwode798@163.com.

通讯作者简介:张永仙(1965-),研究员,主要从事地震预测理论与方法研究.E-mail: yxzhseis@sina.com.

个天然的构造地震研究试验场。地震目录是跟踪统计及研究天然地震的基础数据资料,前人曾结合地震目录将图像信息方法 (Pattern informatics method, 简称 PI 方法) 应用于青海地区及青藏块体的震例回溯研究 (Zhang *et al.*, 2013, 2017; 张小涛等, 2014; 夏彩韵等, 2015; 袁伏全等, 2016; 余娜等, 2021)。

PI 方法从时、空、强三要素上将一定区域内地震目录建模计算后以“热点”的形式呈现,是基于统计物理的地震预测方法 (Holliday *et al.*, 2007; 蒋长胜等, 2009; 蒋卉等, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Kawamura *et al.*, 2014; 张小涛等, 2014)。结合地质构造及断裂分布情况,分析热点分布、演化、迁移趋势等,可综合判断未来一定时段内可能的发震位置 (Kawamura *et al.*, 2013, 2014; Zhang *et al.*, 2013, 2017)。近 20 年来,PI 方法经过国内外众多学者在全球不同地域的应用和检验,充分验证了其良好的预测效果,如日本局部地区 (Nanjo *et al.*, 2006a, b; Kawamura *et al.*, 2013, 2014; 宋程等, 2017, 2018), 印度尼西亚爪哇岛地区 (Wibowo *et al.*, 2017), 中国川滇地区 (Jiang, Wu, 2010; 蒋卉等, 2013; Zhang *et al.*, 2013; 张小涛等, 2014)、华北地区 (张小涛, 2009; 孙丽娜等, 2012)、青藏地区 (Zhang *et al.*, 2013, 2017; 余娜等, 2021) 以及中国台湾地区 (Chen *et al.*, 2005; Chang *et al.*, 2016)。绝大多数回溯性震例检验结果显示,大地震前震中及其附近存在 PI 热点。无论是板间地震还是板内地震,在前人的研究中都验证了 PI 方法热点预测的效果明显优于随机预测 (张小涛等, 2014; 夏彩韵等, 2015; 尼鲁帕尔·买买吐孙等, 2018; 宋程等, 2018; 余娜等, 2021)。

针对不同的目标地震进行研究时,考虑到孕震环境的复杂性和地震活动性起伏等不同原因,应选择相对合理的模型参数,才能体现出更好的热点效果 (Zhang *et al.*, 2013; Kawamura *et al.*, 2013, 2014; 张小涛等, 2014; 宋程等, 2018)。在“大震”未发生之前,充分利用研究区内相对较小的地震“预判”后续中强震可能的发震情况,不失为一种震前提取异常的中长期方法。在前人的研究中,大面积的热点很可能覆盖了主震破裂

区 (蒋长胜, 2010), 这对于震前应急防御、震后应急救援具有一定的辅助作用。本文以 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震为主要研究对象,使用 PI 方法对玛多地震前后进行多窗口 PI 热点特征研究,通过不同预测窗时段内地震热点的变化特征,探索识别并捕捉未来可能发生强震的异常信息。

1 方法简介及参数设置

1.1 计算方法简介

前人的研究中对 PI 方法已有详细介绍,本文只简述其计算方法。主要分为 4 个步骤: ①首先对选定的研究区域进行时空网格化,参与计算的目录数据其截止震级 M_c 在不低于最小完备性震级的同时至少要小于“目标地震震级 M_T ”两个震级单位 (Holliday *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2013)。②对落入相应网格内的地震活动频度构建其时间序列,并定义为 3 个时段 (图 1)。通常设定研究资料起始时刻为 t_0 ; 滑动变化的时间序列起始时刻为 t_b ($t_b \geq t_0$), t_b 从 t_0 时刻向 $[t_1 - (t_2 - t_1)]$ 时刻滑动 ($t_b < t_1$); 背景参考时段为 $[t_b, t_1]$, 学习 (考察) 时段为 $[t_1, t_2]$, 预测时段为 $[t_2, t_3]$ 。背景参考时段通常要偏长一些,后两个时段通常取 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ 。③对每个网格的地震频度时间序列进行时空归一化处理并计算其相对于背景值的偏离程度。④用某个网格的发震概率减去所有网格发震概率的平均值即为对应网格的概率增益 ΔP_i 。利用 $\lg(\Delta P_i / \Delta P_{\max})$ 对概率增益进行归一化,获得“PI 热点图像”。最终以热点的形式表示出研究区域内预测窗时段内目标地震 ($M \geq M_T$) 可能发生的位置。根据 $\lg(\Delta P_i / \Delta P_{\max})$ 的下限值来约束热点数量 (Holliday *et al.*, 2005; Nanjo *et al.*, 2006a; Kawamura *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013)。在研究过程中所使用的地震数据资料,其背景参考时段和考察时段的地震目录一定是已实际监测到的,即 t_2 之前属于“过去式”。而 $[t_2 - t_3]$ 既可能是过去时段,也可能是未来时段。当预测窗 $[t_2 - t_3]$ 处于过去时段,则为回溯性预测研究 (可检验); 当 $[t_2 - t_3]$ 处于未来时段,则只能预测,并不能检验。

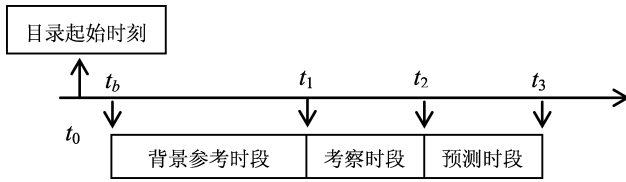


图1 PI方法时间序列节点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the nodes of time series of PI method

1.2 研究区及模型参数选取

针对2021年青海玛多 $M_s 7.4$ 地震，选取($30^\circ \sim 40^\circ \text{N}$, $94^\circ \sim 106^\circ \text{E}$)为研究区，并从中国地震台网中心获取1980年1月1日至2021年5月22日玛多地震前研究区的地震目录。近20年来中国大陆7级以上地震主要发生在巴颜喀拉地块周缘，但玛多 $M_s 7.4$ 地震发生于巴颜喀拉地块内部，本文主要针对研究区内4个二级块体（图2）进行分析讨论。由于PI方法计算中的各项参数对于热点效果都存在一定的影响，需要根据震例实际情况对参与计算的震级下限、震源深度、网格尺度、时间窗长等进行选择设置（Zhang *et al*, 2013；张小涛等，2014；宋程等，2018；余娜等，2021）。

在袁伏全等（2016）对青海地区 $M_s \geq 5.0$ 目

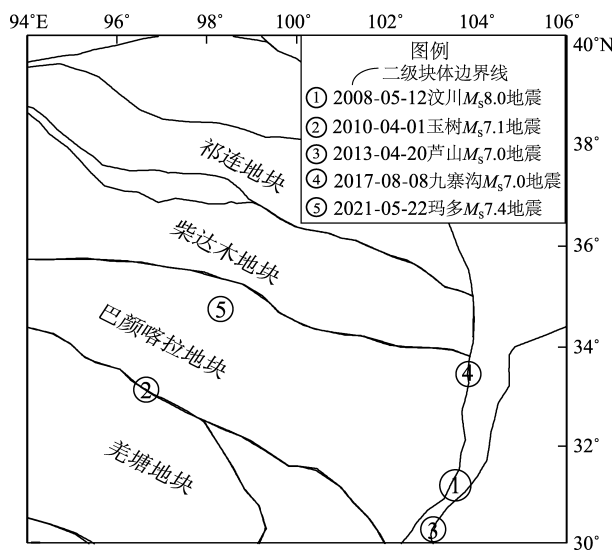


图2 研究区内二级块体及2008年以来7级以上地震分布

Fig. 2 Distribution of the secondary blocks and the $M_s \geq 7$ earthquakes in the study area since 2008

标地震和余娜等（2021）对青藏块体（ $30.0^\circ \sim 41.0^\circ \text{N}$, $88.0^\circ \sim 105.0^\circ \text{E}$ ） $M_s \geq 6.0$ 目标地震的回溯研究中，认为在网格尺度 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 、预测时间窗长3 a、截止震级 $M_c \geq M_L 2.8$ （1980年以来，满足不低于最小完备性震级）的参数组合下热点效能较好。最小完备性震级可以有效地反映地震台网的监测能力（Schaff, 2008；冯建刚等，2012），而输入目录数据的 M_c 是PI方法计算中直接影响热点效果的重要参数。 M_c 偏高会导致输入数据量不足，偏低则会导致输入量过多降低热点对于目标地震的敏锐性。蒋长胜（2010）研究表明，对于板内地震研究的模型参数选取中设定 M_c 低于“目标地震震级 M_T ”两个震级单位的常用标准可能会出现。而本文针对玛多 $M_s 7.4$ 地震预设目标地震下限为 $M_T = M_s 7.0$ ，明显高于5~6级震例，在保证 $M_c + 2 \leq M_T$ 的情况下理论上最高可取 $M_s 5.0$ （Rundle *et al*, 2002；Tiampo *et al*, 2002a；Holliday *et al*, 2005；Nanjo *et al*, 2006a）。为进一步选定合适的 M_c ，分时段画出1981年至2021年5月21日研究区的G-R关系图（图3），从图3中能够看到4个时段研究区内整体数据拟合较好。但图3b、d中在 $M_L 4.8$ 处局部拟合线与整体拟合线的斜率出现偏转，故综合考虑后本文选择输入震级下限为 $M_L 4.8$ ，亦可保证数据量充足。

前人应用PI方法研究中国西部强震用到的网格尺度参数各有不同，包括青藏地区 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ （夏彩韵等，2015；Zhang *et al*, 2017）和 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ （袁伏全等，2016；余娜等，2021）、新疆局部地区 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ （李志海，黄瑜，2010；尼鲁帕尔·买买吐孙等，2018）和 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ （尼鲁帕尔·买买吐孙，2020）、川滇地区 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ （蒋长胜等，2009；Zhang *et al*, 2013）和 $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ （张小涛等，2014）。参考前人在应用PI方法研究中国大陆西部及国内外7级以上震例时的参数设置（蒋长胜，2010；Zhang *et al*, 2013, 2017；蒋卉等，2013；张小涛等，2014；夏彩韵等，2015；宋程等，2018），通常网格尺度较大且预测窗长相对较长时，热点效果更为集中和显著（Zhang *et al*, 2013, 2017；张小涛等，2014；宋程等，2018）。蒋长胜（2010）对于2008年5月12日

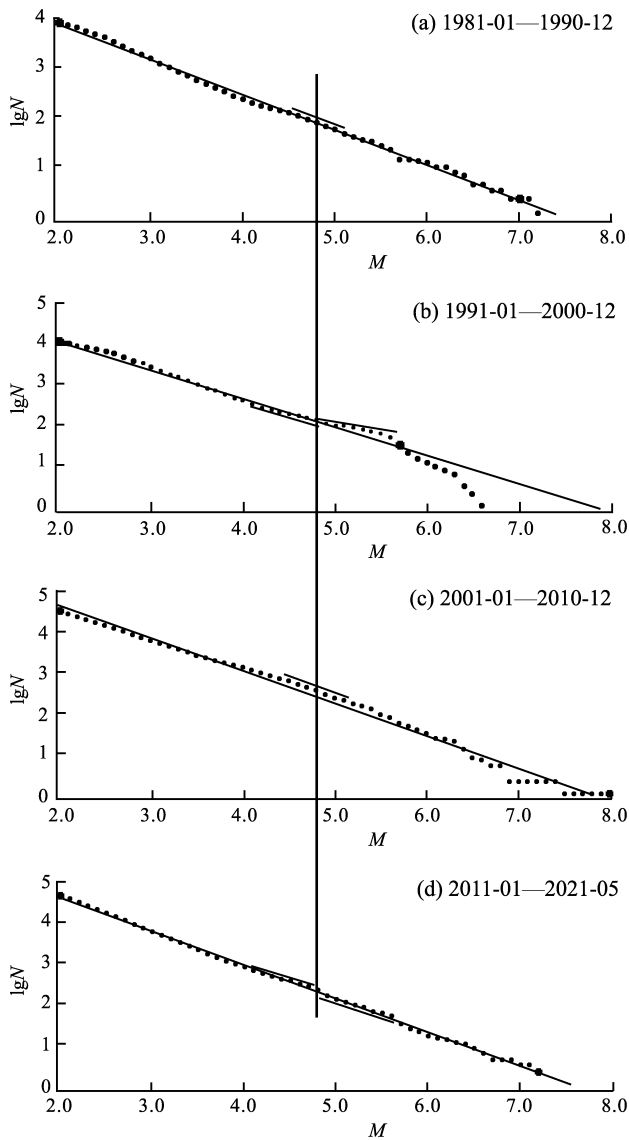


图3 1981-01-01—2021-05-21 研究区域内
分时段 G-R 关系图

Fig. 3 The G-R relation in different periods in the
study area from Jan. 1, 1991 to May 21, 2021

汶川 $M_s 8.0$ 地震的 PI 算法回溯性研究结果表明,震前 PI 热点会因为网格参数的变化而覆盖到主震破裂区,说明网格尺度要因地、因震制宜。在确定目标地震震级下限和截止震级后,考虑到玛多 $M_s 7.4$ 地震的位置特殊性、网格内计算数据量充足性以及热点迁移性,本文设定网格尺度为 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ 。

玛多地震距中国大陆上一次 7 级以上强震(2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 $M_s 8.0$ 地震)发震时间间隔 3.4 a,距青海省内上一次 7 级以上地震

(2010 年 4 月 14 日青海玉树 $M_s 7.1$ 地震)发震时间间隔 11.2 a。7 级地震孕震机制较为复杂,结合之前不同学者对于国内中强震例的研究经验(Zhang *et al*, 2013; 张小涛等, 2014; 夏彩韵等, 2015; Zhang *et al*, 2017; 宋程等, 2018),本文设定时间窗长为 8 a,阈值选择前人惯用的 $\lg(\Delta P_i/\Delta P_{\max}) = -0.6$ (Zhang *et al*, 2013; 张小涛等, 2014; 夏彩韵等, 2015; 宋程等, 2018)。

通常选取与研究的目标地震震源深度相接近的范围内的事件参与计算,更能符合其构造环境、孕震过程、热点追踪的目的和效果。考虑到本次玛多地震为浅缘地震(震源深度 17 km)以及保证数据量的充足,本文选择 60 km 以内的浅源地震事件参与计算。

考虑到余震也是应力释放的一种表现,删除余震可能会造成地震目录一定程度上的畸变(张小涛等, 2014),故本文并未将其删除。本次针对的目标地震震级为 $M_T \geq M_s 7.0$,参与计算地震的最小震级为 $M_L 4.8$,删除目录中的较小余震对于计算结果无实质性影响,删除 $M_L > 4.8$ 的所有余震则可能无法恰当的反应局部区域的热点特征。Tiampo 等(2002b)认为余震反映了局部区域应力的高水平释放;在物理上,较小的地震事件仍能携带较为丰富的强震危险性增强的信息(蒋长胜, 2010)。

2 PI 热点图多窗口连续演化特征分析

按照设定的时空参数,从 2009 年(即汶川 $M_s 8.0$ 大地震后)开始以年尺度向未来滑动,得到图 4、5 中连续的 PI 热点分布图,其中包含玛多地震发震年份的时间窗有 8 个(图 5)。摩尔邻近网格,指紧密包围在某一网格周围的 8 个网格(Moore, 1962; Wolfram, 2002)。当目标地震震中所在网格及其摩尔邻近网格存在热点时,认为目标地震可以被 PI 热点有效预测,则针对一个目标地震,有效热点数最多为 9 个。

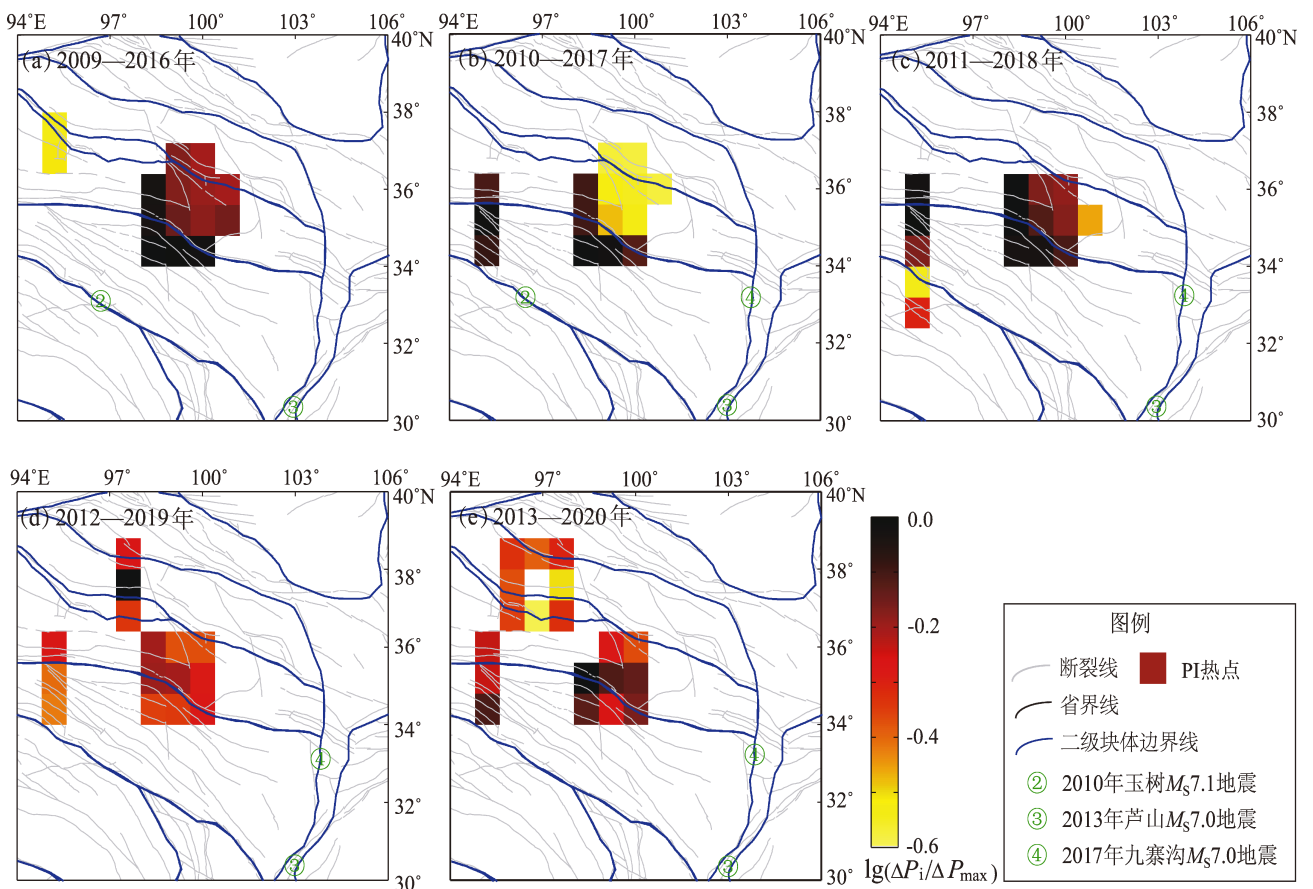
2.1 汶川地震后至玛多地震前年尺度热点演化特征分析

图 4 显示 2009—2020 年研究区内 5 个连续预测窗口中的热点变化情形,青海玛多县附近特

续出现成片密集热点。虽然玛多地震发生在 2021 年,但在 5 个预测窗口中,玛多地震震中所在网格及其 3 个摩尔邻近网格持续存在热点,即这 5 个回溯性预测窗口中显示了明确的高发震风险覆盖范围,具有强震发震危险性地点指示意义。

图 4 中分布于巴颜喀拉块体南边界的 2010 年青海玉树 $M_s7.1$ 地震、东边界的 2013 年四川芦山 $M_s7.0$ 地震和 2017 年四川九寨沟 $M_s7.0$ 地震并未出现过有效 PI 热点。甚至整个研究区内 34°N 以南地区几乎无热点,只在 2011—2018 年预测窗口内青海中南部出现过 2 个热点。Zhang 等 (2013) 对中国西部大陆 ($20^\circ \sim 50^\circ\text{N}$, $70^\circ \sim 110^\circ\text{E}$) 进行 PI 方法回溯性预测研究时,发现 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震和汶川 $M_s8.0$ 地震震中存在热点。张小涛等 (2014) 对川滇地区 ($21^\circ \sim 35^\circ\text{N}$, $97^\circ \sim 109^\circ\text{E}$) 进行 PI 方法热点回溯性预测研究得出,芦山地震震中落入热点网格内。而图 4 中芦山

地震和九寨沟地震未出现有效热点的原因,除了与所选择的研究区主体范围不同 (本文选择研究区相对较小) 外,还和 PI 方法对于模型参数的依赖性有关。张小涛等 (2014) 对芦山 $M_s7.0$ 地震前的 PI 热点特征研究中设置的主要参数为 $2^\circ \times 2^\circ / 1^\circ \times 1^\circ$ 网格尺度、9 a 预测时间窗长。Zhang 等 (2013) 针对 2008 年汶川 $M_s8.0$ 和于田 $M_s7.3$ 地震的 PI 热点回溯性研究中,选取的主要参数为 $2^\circ \times 2^\circ / 1^\circ \times 1^\circ$ 网格尺度,预测窗长为 4 ~ 8 a 的 ROC 检验效果较好。以上研究中截止震级皆为 $M_L4.5$,不低于区域最小完备性震级,但低于本文所选的最小输入震级 $M_L4.8$,数据量可能更大。本文所选的预测窗长为 8 a,跨度时长接近或重叠于上述时间参数。差异最大的参数为网格尺度,本文设定为 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ 。模型参数的差异性,可能是本文研究中其他 7 级以上地震缺少有效 PI 热点的主要原因。



注: 每个预测窗起止时间为起始年 1 月 1 日至结束年 12 月 31 日 (下同)

图 4 2009—2020 年研究区连续热点演化分布图

Fig. 4 Retrospective forecast of the hot spots distribution by PI method in the study area from 2009 to 2020

2.2 2014—2028年玛多 $M_s7.4$ 地震相关热点演化特征分析

按照相同的时空参数,从2014年开始向未来滑动,则包含玛多地震发震时间(2021年)的窗口有8个。从时间先后顺序来看,8个预测窗口中玛多地震的相关PI热点呈现为“出现—减弱—消失—强密集—收缩”的趋势变化。

在前3个窗口中(图5a~c)热点相对分散,且主要分布于研究区的西北部,但玛多地震震中或摩尔邻近网格出现了热点。相对于图4预测窗口

中部相对稳定连续的密集PI热点,图5中玛多地震附近的热点分布呈不连续、不稳定、丛集性不明显特征。在2017—2024年、2018—2025年2个预测窗口中(图5d、e),预测窗口起始时间距离发震年份为4~5a,即发震年份处于窗口近乎中间的年份,玛多地震及其摩尔邻近网格未出现相关热点,研究区内热点主要分布在青海最南部,玉树藏族自治州囊谦县及玉树县(青川藏交界附近)。在2019—2026年预测窗口中(图5f),玛多地震震中及其摩尔邻近网格出现明显密集深色热

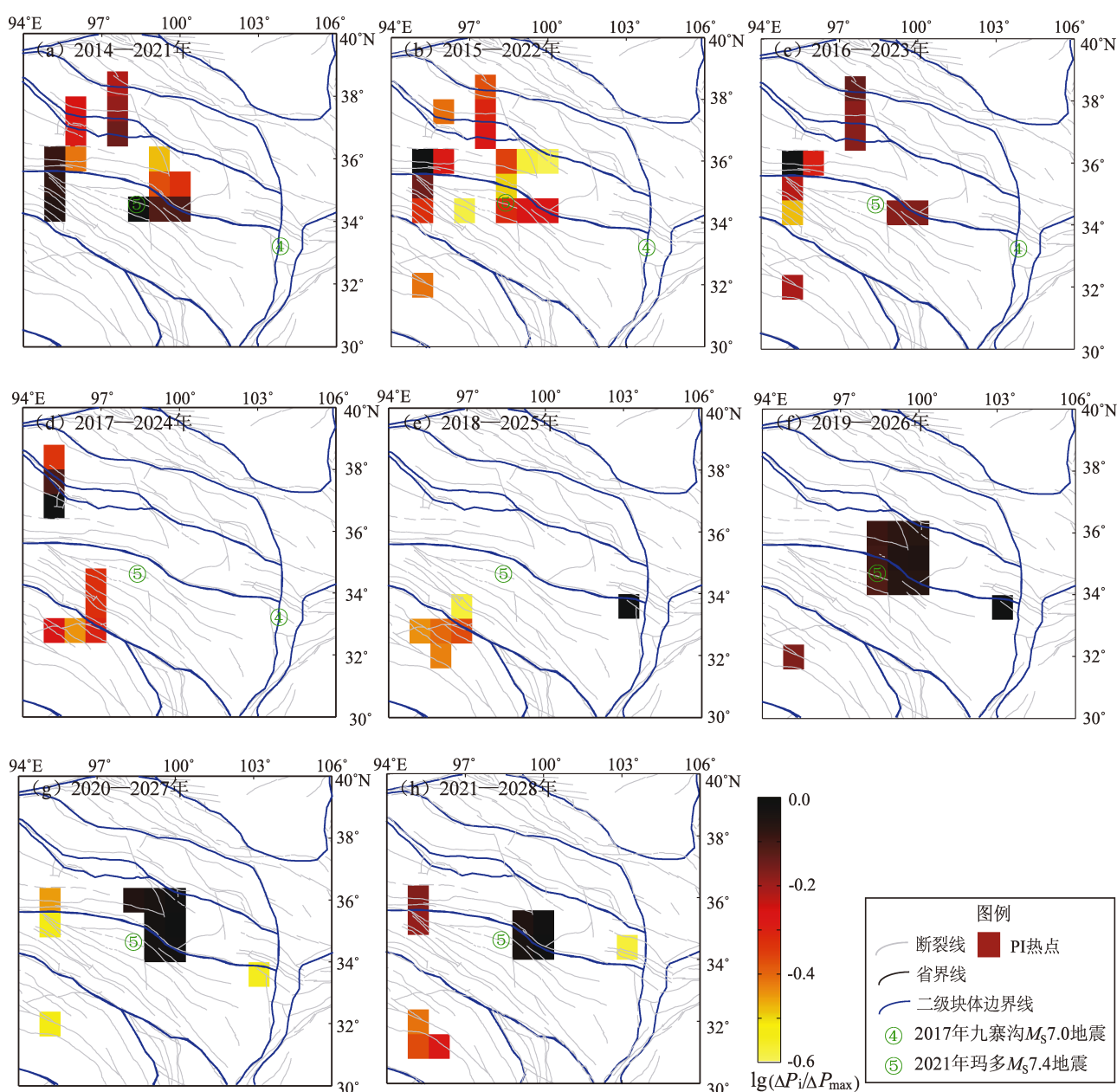


图5 2014—2028年研究区连续热点演化分布图

Fig. 5 Retrospective forecast of the hot spot distribution by PI method in the study area from 2014 to 2018

点,且只有2个零散热点,热点整体从集性较强。至最后2个窗口时段(5g、h),玛多地震摩尔邻近网格密集热点颜色几乎无变化但覆盖面积有所收缩,彰显了发震紧迫性的增强,对玛多地震的发震时间及位置具有一定的指示意义。

在研究区内13个连续滑动的预测窗热点图像中,只有2013—2020年预测窗口出现了19个热点,其余12个预测窗口中热点总数不超过15个。在图5中,只有2个窗口在玛多地震震中或摩尔邻近网格皆无热点,有效热点占比数最高的时段为2019—2026年预测窗。

表1 2014—2028年玛多地震相关热点统计

Tab.1 Statistics of the hot spots related to the Maduo earthquake from 2014 to 2028

序号	图号	预测时段/年	CH	MH	热点总数	有效热点数	有效热点占比
1	5a	2014—2021	是	是	15	3	20%
2	5b	2015—2022	是	是	15	3	20%
3	5c	2016—2023	否	是	10	1	10%
4	5d	2017—2024	否	否	8	0	0
5	5e	2018—2025	否	否	7	0	0
6	5f	2019—2026	是	是	11	4	36%
7	5g	2020—2027	否	是	11	2	18%
8	5h	2021—2028	否	是	10	2	20%

注:CH表示玛多地震的震中存在热点,MH表示玛多地震的摩尔邻近网格存在热点。

2.3 热点迁移分析

从2009年以来研究区内的13个连续滑动预测窗热点图像(图4、5)中可见,巴颜喀拉地块内部始终存在PI热点,说明其地震活跃程度相对于其他次级地块更为活跃。其中11个预测窗中,巴颜喀拉地块和柴达木地块交界处存在热点;在羌塘地块和祁连地块内,各有8个预测窗口出现过至少1个热点。在2009—2020年预测窗口中,5个滑动窗内巴颜喀拉地块和柴达木地块交界处青海玛多县附近持续存在密集热点(图4)。在2012—2019年、2013—2020年预测窗口中,祁连地块出现了明显热点,主要分布在青海海西州德令哈市附近。在2014—2021年、2015—2022年、2016—2023年3个预测窗口时段内(图5a~c),热点主要在南北向上跨巴颜喀拉地块、柴达木地块和祁连地块3个二级块体。

在2014—2021年预测窗口中(图5a)无零散热点,巴颜喀拉地块内玛多地震震中所在网格热点颜色最深,发震危险性最高。从2015—2022年预测窗口开始至2021—2028年窗口(图5b~h),在羌塘地块内始终存在热点。在2016—2023年预测窗口内(图5c),热点总数变少,羌塘地块以北的3个地块内热点数皆有减少。玛多地震东侧巴颜喀拉地块和柴达木地块交界处热点变少但颜色加深,危险性增强。至2017—2024年、2018—2025年预测窗口(图5d、e),玛多地震震中及其摩尔邻近网格不存在有效热点。在2017—2024年预测窗口中,柴达木地块和祁连地块的最北端热点延伸到了甘肃境内。至2018—2025年预测窗口中(图5e),巴颜喀拉地块以北的热点全部消失,浅色热点集中于巴颜喀拉地块和羌塘地块交汇处(青海南部),且在巴颜喀拉地块东北缘(四川北部甘川交界附近)出现了一个深色热点。

在最后3个连续的预测窗口中(图5f~h),玛多地震东侧巴颜喀拉地块(北部)和柴达木地块的交汇处存在密集深色热点,且热点个数逐渐减少。2019—2026年预测窗口(图5f),相对于前2个滑动窗,玛多地震震中及摩尔邻近网格出现深色密集热点,发震危险性显著增强。2020—2027年预测窗口(图5g),相对于上一个窗口热点总个数不变,但零散热点危险性降低。巴颜喀拉地块和柴达木地块的交汇处的密集热点危险性增强,玛多地震震中热点消失。至2021—2028年预测窗口(图5h),巴颜喀拉地块和柴达木地块的交汇处密集热点进一步收缩,体现了后续发生强震的危险性在向玛多地震的东侧迁移,并且可能和震源区及其附近仍然主要受到NEE向近水平挤压应力场的控制有关(吕苗苗等,2022)。

青藏高原具有持续变形的特点(许志琴等,2006),热点的迁移也是相对变化的,本文研究中没有任意2个预测窗口内热点的分布及发震概率是完全相同的。从2014—2021年预测窗口开始至2021—2028年预测窗口,玛多地震的有效热点的个数、分布位置和发震危险性并不具有稳定性、持续性,这体现了7级以上强震孕震物理过程的复杂性。研究区内所有热点在不同次级块体内的迁移也不具有明确的规律性,其内部地震的发生和区域构造应力背景与次级活动地块息息相关。徐志国等(2021)通过应力场反演结果得出,研究

区整体的背景应力场具有近 EW 向挤压应力场特征, 与巴颜喀拉块体的水平最大主应力方向总体上为 EW 向 (范桃园等, 2013) 具有较好的一致性。区域构造应力场能够影响震源区的变形和破裂, 本次玛多 $M_s7.4$ 地震为双侧破裂 (李智敏等, 2021; 王未来等, 2021), 但图 5 不同预测窗口中玛多地震的西侧并没有显著热点分布。中国大陆强震孕育发生的动力学环境整体呈“纵向分层、横向分块”的特征 (邵志刚等, 2022), 块体之间也存在一定的相互作用, 而块体运动受深部物质作用驱动。大型走滑型地震发生时, 复杂的平移错动引起的浅部破裂面和深部破裂面是存在差异的 (徐志国等, 2021), 其深部物质运移和深部地下结构异常会对后续地震产生影响 (许志琴等, 2006; 王椿镛等, 2008; 嘉世旭等, 2017; 宋向辉等, 2021)。用 PI 方法计算得到的热点对局部区域某个时段的发展范围具有参考作用, 但不能精准预测发震地点和震源深度。研究区内的热点分布与迁移和浅层破裂展布并不完全对应, 可能和强震孕育过程、深部动力、地下深部结构等因素存在一定关系。

3 讨论

在本次研究中, 我们注意到 3 个值得思考的问题。第一, 虽然玛多地震震级高达 $M_s7.4$, 但在 2014 年以来向未来滑动的连续预测窗内, 并不是每个预测窗图像都能提取到与玛多地震相关的有效 PI 热点信息。这不仅和 PI 方法对于数据的依赖性以及模型参数的选取有关, 更与青藏块体构造环境特点和 7 级强震的孕震复杂性有关。第二, 在回溯性预测 PI 热点图像中, 虽然玛多地震附近存在密集 PI 热点, 但玛多地震的震中并不位于成片密集热点的“中心”, 这个结果显示预测目标地震发震地点及破裂区范围存在困难。多数学者认为左旋走滑的昆仑山口—江措断裂为玛多 $M_s7.4$ 地震的发震断裂 (李经纬等, 2021; 李智敏等, 2021; 潘家伟等, 2021; 宋向辉等, 2021; 谈洪波等, 2021; 王未来等, 2021; 姚生海等, 2021; 尹欣欣等, 2021; 岳冲等, 2021; 赵韬等, 2021), 玛多 $M_s7.4$ 地震为双侧破裂 (李智敏等, 2021), 但其相关热点主要分布于震中及东侧, 未能完全覆盖住破裂区及余震区。第三, 在不包含玛多地

震发震年份的回溯性预测窗口内, 玛多地震震中及邻近网格存在热点, 但在包含目标地震年份的预测窗口中, 有效热点是间歇性存在的, 这进一步增加了判定发震年份的难度。

印度板块与欧亚板块碰撞后持续向北推挤, 在青藏块体内部形成了若干构造块体分别沿大型走滑断裂带向东和南东方向“逃逸”的构造环境 (陈兵等, 2003)。作为晚新生代以来从青藏高原朝东和东南方向“逃逸”的活动地块之一 (闻学泽, 2018), 巴颜喀拉块体东边界带及其邻近地区的活动构造作用以及地震动力源, 均来自该块体的“逃逸”运动 (Zhang *et al.*, 2004; 闻学泽等, 2011; Zhang, 2013)。2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震是巴颜喀拉地块最新活动的体现, 表明中国大陆 7 级地震主体活跃区域依然是巴颜喀拉块体 (姚生海等, 2021), 亦表明巴颜喀拉块体具有向东走滑的特性且东向运动仍在持续中 (Xu *et al.*, 2013; 闻学泽, 2018; 尹海权等, 2020), 这可能正是热点在后续的“未来窗口”中向东收缩的内在原因。

4 结论

本文利用 PI 方法, 参考前人对中强震震例的研究经验, 对 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震进行回溯性预测研究, 选取计算参数为空间网格 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$, 预测窗长 8 a, 震源深度 60 km 以内 $M_L \geq 4.8$ 的地震事件参与 PI 方法计算, 主要得到以下结论:

(1) 在玛多地震发生前的 5 个预测时间窗中, 玛多地震震中所在网格及摩尔邻近网格持续存在热点, 且在巴颜喀拉地块和柴达木地块交界处始终存在成片密集热点, 这对发震地点指示作用较强。

(2) 在包含 2021 年的 8 个预测窗热点图像中, 玛多地震震中及摩尔邻近网格热点形态变化并不稳定, 出现了断续起伏的情形。

(3) 在 2018 年之后的 3 个预测窗口中, 玛多地震震中附近热点颜色逐渐加深且出现了向东收缩的趋势, 这对玛多县附近的发震危险性具有一定的指示意义。

(4) 在 2014—2021 年、2015—2022 年、2016—2023 年 3 个窗口中, 热点主要分布在巴颜喀拉地块、柴达木地块和祁连地块内; 在 2019—2026 年、2020—2027 年和 2021—2028 年预测窗口中, 深色

密集热点主要分布在巴颜喀拉地块和柴达木地块的交界处。

中国地震台网中心提供地震目录数据, 本文图件使用 Matlab 和 GMT 软件绘制, 在此一并表示感谢!

参考文献:

- 陈兵, 江在森, 车时, 等. 2003. 玛尼 7.9 级地震对昆仑山口西 8.1 级地震的触发作用及动力背景初探[J]. 中国地震, 19(1): 1-7.
- 范桃园, 陈群策, 吴中海, 等. 2013. 青藏高原东缘活动构造与现今地应力场三维粘弹性模拟研究[J]. 地球物理学进展, 28(3): 1140-1149.
- 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 2012. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J]. 地震学报, 34(5): 646-658.
- 嘉世旭, 林吉焱, 郭文斌, 等. 2017. 巴颜喀拉块体地壳结构多样性探测[J]. 地球物理学报, 60(6): 2226-2238.
- 蒋长胜, 吴忠良, 马宏生, 等. 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.
- 蒋长胜. 2010. 川滇地区地震活动的统计物理特征[J]. 国际地震动态, (2): 44-45.
- 蒋卉, 吴忠良, 马腾飞, 等. 2013. 对图像信息学(PI)算法的一个回溯性预测检验: 四川芦山 7.0 级地震[J]. 物理, 42(5): 334-340.
- 李海兵, 潘家伟, 孙知明, 等. 2021. 大陆构造变形与地震活动——以青藏高原为例[J]. 地质学报, 95(1): 194-213.
- 李经纬, 陈长云, 占伟, 等. 2021. 青海玛多 7.4 级地震 GNSS 同震水平位移的快速获取[J]. 地震地质, 43(5): 1073-1084.
- 李志海, 黄瑜. 2010. 兴都库什—帕米尔—新疆中南部地区 PI 算法的回溯性研究[J]. 内陆地震, 24(3): 208-214.
- 李智敏, 李文巧, 李涛, 等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震的发震构造和地表破裂初步调查[J]. 地震地质, 43(3): 722-737.
- 吕苗苗, 常利军, 鲁来玉, 等. 2022. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震余震序列震源机制解及其发震构造特征[J]. 地球物理学报, 65(6): 1991-2005.
- 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, 135(3): 215-222.
- 尼鲁帕尔·买买吐孙, 张小涛, 张永仙, 等. 2018. PI 算法用在天山地震带的回溯性研究[J]. 地震工程学报, 40(S1): 45-52.
- 潘家伟, 白明坤, 李超, 等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震地表破裂带及发震构造[J]. 地质学报, 95(6): 1655-1670.
- 邵志刚, 王武星, 刘琦, 等. 2022. 活动地块理论框架下的地震物理预报展望[J]. 科学通报, 67(13): 1362-1377.
- 宋程, 张永仙, 夏彩韵, 等. 2017. 基于图像信息方法的日本东北 $M_w9.0$ 大地震回溯性预测研究[J]. 地震, 37(2): 47-56.
- 宋程, 张永仙, 夏彩韵, 等. 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.
- 宋向辉, 王帅军, 潘素珍, 等. 2021. 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震的深部构造背景[J]. 地震地质, 43(4): 757-770.
- 孙丽娜, 齐玉妍, 温超, 等. 2012. 中长期地震预测中的 PI 算法改进研究及应用[J]. 地震, 32(4): 44-52.
- 谈洪波, 王嘉沛, 杨光亮, 等. 2021. 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震的震后效应模拟[J]. 地震地质, 43(4): 936-957.
- 王椿镛, 楼海, 吕智勇, 等. 2008. 青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构——下地壳流的深部环境[J]. 中国科学: 地球科学, 38(1): 22-32.
- 王未来, 房立华, 吴建平, 等. 2021. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震序列精定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1193-120.
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 等. 2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性 & 2008 年汶川地震[J]. 地球物理学报, 54(3): 706-716.
- 闻学泽. 2018. 巴颜喀拉块体东边界千年破裂历史与 2008 年汶川、2013 年芦山和 2017 年九寨沟地震[J]. 地震学报, 40(3): 255-267.
- 夏彩韵, 张永仙, 张小涛, 等. 2015. 利用两次新疆于田 7.3 级地震对图像信息(PI)方法可预测性的检验[J]. 地震学报, 37(2): 312-322.
- 徐志国, 梁姗姗, 张广伟, 等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震发震构造分析[J]. 地球物理学报, 64(8): 2657-2670.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 2006. 青藏高原与大陆动力学: 地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. 中国地质, 33(2): 221-238.
- 姚生海, 盖海龙, 殷翔, 等. 2021. 青海玛多 $M_s7.4$ 地震地表破裂带的基本特征和典型现象[J]. 地震地质, 43(5): 1060-1072.
- 尹海权, 郭祥云, 常明, 等. 2020. 跨断层与 GPS 地壳形变数据联合反演鲜水河断裂地震危险性[J]. 地质学报, 94(8): 2487-2499.
- 尹欣欣, 王维欢, 蔡润, 等. 2021. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震精定位和发震构造初探[J]. 地震工程学报, 43(4): 834-839.
- 余娜, 张晓清, 袁伏全, 等. 2021. 基于 PI 算法的青藏块体强震回溯性研究[J]. 地震地磁观测与研究, 42(1): 35-41.
- 袁伏全, 孙世瑞, 王小玲. 2016. PI 算法用于青海地区中强震危险性预测的回溯性检验研究[J]. 地震研究, 39(S1): 76-82.
- 岳冲, 屈春燕, 牛安福, 等. 2021. 玛多 $M_s7.4$ 地震对周边断层的应力影响分析[J]. 地震地质, 43(5): 1041-1059.
- 詹艳, 梁明剑, 孙翔宇, 等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震深部环境及发震构造模式[J]. 地球物理学报, 64(7): 2232-2252.
- 张小涛, 张永仙, 夏彩韵, 等. 2014. 利用图像信息方法研究芦山 $M_s7.0$ 地震前川滇及附近地区的图像异常[J]. 地震学报, 36(5): 780-789.
- 张小涛. 2009. 图像信息(PI)方法在我国大陆部分地区的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 29-35.
- 赵韬, 王莹, 马冀, 等. 2021. 2021 年青海玛多 7.4 级地震序列重定位和震源机制特征[J]. 地震地质, 43(4): 790-805.
- Chang L Y, Chen C C, Wu Y H, et al. 2016. A strategy for a routine pat-

- tern informatics operation applied to Taiwan[J]. Pure and Applied Geophysics, 173(1): 235–244.
- Chen C C, Rundle J B, Holliday J R, *et al.* 2005. The 1999 Chi – Chi, Taiwan, earthquake as a typical example of seismic activation and quiescence[J]. Geophysical Research Letters, 32(22): L22315.
- Holliday J R, Chen C C, Tiampo K F, *et al.* 2007. A RELM earthquake forecast based on pattern informatics [J]. Seismological Research Letters, 78(1): 87–93.
- Holliday J R, Nanjo K Z, Tiampo K F, *et al.* 2005. Earthquake forecasting and its verification[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 12(6): 965–977.
- Jiang C S, Wu Z L. 2010. PI forecast for the Sichuan-Yunnan region; Retrospective test after the May 12, 2008, Wenchuan earthquake[J]. Pure and Applied Geophysics, 167(6/7): 751–761.
- Kawamura M, Wu Y H, Kudo T, *et al.* 2013. Precursory migration of anomalous seismic activity revealed by the pattern informatics method; A case study of the 2011 Tohoku earthquake, Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(2B): 1171–1180.
- Kawamura M, Wu Y H, Kudo T, *et al.* 2014. A statistical feature of anomalous seismic activity prior to large shallow earthquakes in Japan revealed by the pattern informatics method[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14(4): 849.
- Mohanty W K, Mohapatra A K, Verma A K, *et al.* 2016. Earthquake forecasting and its verification in northeast India[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7(1): 194–214.
- Moore E F. 1962. Machine models of self – reproduction [C]//Proceedings of the Fourteenth Symposium on Applied Mathematics, American Mathematical Society, 14: 17–33.
- Nanjo K Z, Holliday J R, Chen C C, *et al.* 2006b. Application of a modified pattern informatics method to forecasting the locations of future large earthquakes in the central Japan[J]. Tectonophysics, 424(3): 351–366.
- Nanjo K Z, Rundle J B, Holliday J R, *et al.* 2006a. Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan [J]. Pure and Applied Geophysics, 163(11–12): 2417–2432.
- Radan M Y, Hamzehloo H, Peresan A, *et al.* 2013. Assessing performances of pattern informatics method; A retrospective analysis for Iran and Italy[J]. Natural Hazards, 68(2): 855–881.
- 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[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2514–2521.
- Schaff D P. 2008. Semiempirical statistics of correlation-detector performance[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(3): 1495–1507.
- Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S A, *et al.* 2002a. Pattern dynamics and forecast methods in seismically active regions[J]. Pure and Applied Geophysics, 159(10): 2429–2467.
- Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S A, *et al.* 2002b. Mean – field threshold systems and phase dynamics; An application to earthquake fault systems[J]. Europhysics Letters, 60(3): 481.
- Wibowo A, Insani A, Nurdianto S. 2017. Modifikasi pattern informatics untuk prediksi hotspot aktivitas seismik pada gempa di pulau jawa [J]. Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTE-TI), 6(2): 121–126.
- Wolfram S. 2002. A new kind of science [M]. Champaign IL: Wolfram Media, Inc, 1197.
- Xu X W, Tan X B, Yu G H, *et al.* 2013. Normal- and oblique-slip of the 2008 Yutian earthquake; Evidence for eastward block motion, northern Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 584: 152–165.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211–280.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, *et al.* 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. Geology, 32(9): 809–812.
- Zhang P Z. 2013. A review on active tectonics and deep crustal processes of the Western Sichuan Region, eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonophysics, 584: 7–22.
- Zhang Y X, Xia C Y, Song C, *et al.* 2017. Test of the predictability of the PI method for recent Large earthquakes in and near the Tibetan Plateau[J]. Pure and Applied Geophysics, 174: 2411–2426.
- Zhang Y X, Zhang X T, Wu Y J, *et al.* 2013. Retrospective study on the predictability of pattern informatics to the Wenchuan $M 8.0$ and Yutian $M 7.3$ earthquakes[J]. Pure and Applied Geophysics, 170(1–2): 197–208.

Retrospective Study on the Forecast of the 2021 Maduo $M_s7.4$ Earthquake by PI Method

SONG Cheng¹, ZHANG Yongxian², ZHOU Shaohui³, BI Jinmeng¹, XU Xiaoyuan¹

(1. *Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China*)

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

(3. *Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, Shandong, China*)

Abstract

In this paper, the Pattern Informatics (PI) method was applied to the retrospective study on the forecast of the 2021 Maduo $M_s7.4$ earthquake. The local area ($30.0^\circ\text{N} - 40.0^\circ\text{N}$, $94.0^\circ\text{E} - 106.0^\circ\text{E}$) of Qinghai-Tibet tectonic block was chosen as the study region. With parameters of the 8-year-long forecasting window and the $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ -sized grid, successive forecasting hotspot diagrams were obtained in the period from 2009 to 2028. The results showed that: ① In five successive forecasting windows covering the period from 2009 to 2020, continuous dense hotspots appeared in the grid in which the Maduo epicenter located and in its neighboring Moore grids. These hotspots strongly indicated the location of the Maduo earthquake. ② In the period from 2014 to 2028, PI hotspots appeared in the grid in which the Maduo epicenter located or in its neighboring Moore grids in most forecasting windows. In the three continuous forecasting windows after 2018 (2019 – 2026, 2020 – 2027 and 2021 – 2028), dark hotspots appeared near the epicenter of the Maduo $M_s7.4$ earthquake and showed a gradual tendency of contraction, which indicated the impending occurrence of the Maduo $M_s7.4$ earthquake. ③ According to the continuous hotspot diagrams since 2009, hotspots appeared in the Bayankala block, the Qaidam block, the Qilian block and the Qiangtang block. Relatively, hotspots appearing at the junction of the Bayankala block and the Qaidam block near Maduo county had higher frequency, darker color, larger coverage. The results indicates that the middle part of the northern margin of the Bayankala block in the Qinghai-Tibet tectonic block has stronger seismicity and higher potential earthquake risk.

Keywords: the Maduo $M_s7.4$ earthquake; the Pattern Informatics (PI) method; hotspot; retrospective forecast