

尼鲁帕尔·买买吐孙,张小涛,张永仙,等.PI算法用在天山地震带的回溯性研究[J].地震工程学报,2018,40(增刊):45-52.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.045

NILUPAER Maimaitusun,ZHANG Xiaotao,ZHANG Yongxian,et al.Retrospective Study on the Application of Pattern Informatics Method in Tianshan Seismic Zone[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(Supp):45-52.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.045

PI 算法用在天山地震带的回溯性研究

尼鲁帕尔·买买吐孙¹,张小涛²,张永仙²,夏彩韵³

(1.新疆维吾尔自治区地震局,新疆乌鲁木齐830011;2.中国地震台网中心,北京100045;
3.辽宁省地震局,辽宁沈阳110034)

摘要:以天山地震带为研究区域,以该地区1994—2014年发生的 $M_s6.0$ 以上强震为研究对象进行回溯性研究。以截止震级 M_c 为 $M_s4.0$,空间网格间距 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$,异常学习时间窗为15年,预测时间窗为4年,系统计算天山地震带1994年以来的“地震热点”图像,分析研究时段内强震前后的PI图像演化过程,并采用ROC方法和R值评分检验,对图像信息方法在天山地区的预测效能进行评分。结果表明:(1)在回溯性研究时段内发生的强震都分布在地震热点上;(2)研究时段内发生的6次6.5级以上地震前均出现不同程度的连续热点异常演化过程;(3)ROC检验和R值评分结果显示,PI算法优于随机预测,PI算法在文章中采用的模型参数对天山地震带 $M_s \geq 6.0$ 地震具有较好的中长期预测效果。

关键词:图像信息(PI)方法;地震热点;天山地震带;回溯性研究;地震可预测性

中图分类号:P315

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2018)增刊-0045-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.Supp.045

Retrospective Study on the Application of Pattern Informatics Method in Tianshan Seismic Zone

NILUPAER Maimaitusun¹, ZHANG Xiaotao², ZHANG Yongxian², XIA Caiyun³

(1. Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China;

3. Earthquake Agency of Liaoning Province, Shenyang 110034, Liaoning, China)

Abstract: Pattern informatics (PI) method is an earthquake prediction method based on statistical physics, which has been an active research area in recent years. This method can help to determine whether the seismicity in a grid during a time period deviates from its history and from the average state of the selected study region. In this paper, earthquakes above $M_s6.0$ during 1994—2014 in the Tianshan seismic zone are retrospectively analyzed with the PI method. The results show that (1) most of the studied earthquakes occurred in the seismic regions (hotspots); (2) six earthquakes above $M_s6.5$ have obvious continuous evolution process; (3) the PI method results

收稿日期:2017-11-07

基金项目:新疆地震科学基金(201602,201702)

第一作者简介:尼鲁帕尔·买买吐孙(1986—),女(维吾尔族),新疆喀什人,硕士,主要从事数字地震学和地震综合预测研究工作。

E-mail:nilupar86@163.com.

in reasonable medium and long term prediction of $M_s \geq 6.0$ earthquakes in the Tianshan seismic zone.

Keywords: pattern informatics (PI) method; hotspot; Tianshan seismic zone; retrospective study; earthquake predictability

0 引言

PI算法(Pattern Informatics Method)是 Rundle 等^[1-2]提出的应用于地震活动研究的地震统计物理方法,是近年来地震预测研究中的一个热点。此方法通过识别某研究区域在一定时段内的地震活动性是否显著偏离该区域及其周围历史平均状态,并把显著偏离该区域及其周围历史状态的区域定义为“地震热点”,即发生强震概率较高的地区。此方法最初被称为“相位动力学概率变化”(Phase Dynamical Probability Change,简称“PDPC”),并被用来计算了南加州地区中2000年1月—2009年12月有可能发生5级以上地震的地区,研究结果表明此方法在地震中长期预测中有较高的分辨率。Holliday 等^[3]利用PI算法对全球2000—2009年间发生7级以上地震的可能性进行了预测,研究结果表明,2004年12月23日麦阔里岛8.1级地震和2004年12月26日苏门达腊9.0级地震的震中位于“地震热点”上或其附近。

Chen 等^[4-5]利用PI算法研究台湾地区($21^\circ \sim 26^\circ \text{N}$, $119^\circ \sim 123^\circ \text{E}$)地震危险性,回溯性研究结果显示,1999年9月21日台湾集集7.6级地震的震中位于计算所得到的“地震热点”内。蒋长胜等^[6]利用PI算法对川滇地区中强地震进行回溯性研究,结果显示PI算法对该地区的中长期地震活动具有一定的预测能力。张小涛^[7]利用PI方法对我国云南、大华北等地区的中长期地震危险性进行了研究,通过多次回溯性检验筛选出适合研究区域的计算参数,对研究区域的地震危险性进行了向前预测,并取得了较好的预测效果。李志海等^[8]对兴都库什—帕米尔—新疆中南部地区进行了PI算法检验。Zhang 等^[9]以2008年于田7.3级地震和汶川8.0级地震为例,对中国西部地区($20^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $70^\circ \sim 110^\circ \text{E}$)7级以上地震进行了回溯性预测检验,研究中通过改变计算参数的范围,分别利用ROC图表法和R值评分两次地震预测效果,进一步对PI算法计算参数的合理选取做了深入研究,为PI算法在中国西部的应用提供了参考经验。张小涛等^[10]、夏彩韵等^[11]利用图像信息方法计算了庐山7.0级地震、两次于田7.3级地震前后的图像信息演化过程,

并得到了良好的预测效果。

利用PI算法对天山地震带进行回溯性研究,考察基于PI算法的地震中长期预测效能,对天山地震带中长期地震预测研究和地震危险性分析具有重要的现实意义和科学价值。本文选取天山地震带为研究区域,采用 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ 的网格尺度,预测时间窗为4年,系统研究天山地震带1994年以来的PI“地震热点”图像,特别研究图像信息演化过程,并通过ROC方法检验和R值评分,对PI算法在研究区的预测效能进行评价;并在此基础上尝试对天山地震带的6.0级以上地震危险区进行预测。

1 PI算法简介及其实现过程

PI算法的基本原理是把研究区域进行时空网格划分,对每个网格的地震活动构建其频度时间序列,形成地震活动的时空演化图像,然后通过时空变化计算空间上每个网格显著地震事件发生的概率,再减去背景概率,检测发震概率高的网格,即“地震热点”^[2-3,7,11]。

PI算法的具体实现过程如下:

(1) 构建时间序列 $N_i(t)$: 对研究区域进行网格化,将其划分为 N_b 个边长为 Δx 的网格(图1)。对每个网格创建一个时间序列 $N_i(t)$,即第 i 个网格单位时间发生的震级大于震级 M_0 的地震数量,其中 M_0 的取值需大于完备地震目录的下限震级。

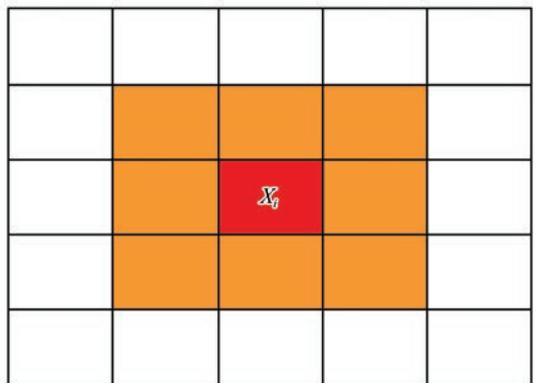


图1 热点(红色)及其邻近的八个方框(橘色)

(2) 定义三个时间段:

定义背景参考时间段 $t_b \sim t_1$ 、变化时间段 $t_1 \sim$

t_2 、预测时间段 $t_2 \sim t_3$ 三个时间段(图 2)。其中, t_0 为研究资料的起始时刻, t_b 自 t_0 至 $t_1 - (t_2 - t_1)$ 时刻以 Δt 为步长滑动, 一般情况下取 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ 。

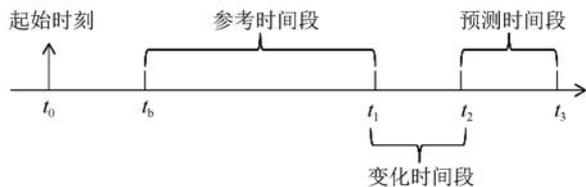


图 2 PI 方法计算所用时刻示意图^[7]

(3) 计算地震强度函数 $I_i(t_b, t)$: 在两个时刻 t_b 和 t 之间(其中 $t_b < t$)，地震强度函数 $I_i(t_b, t)$ 定义为: 从 t_b 到 t 的单位时间内发生在网格 i 中震级大于 M_0 的地震数目。其表达式为:

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

(4) 将地震强度函数 $I_i(t_b, t)$ 标准化: 为了对不同时段的地震强度函数进行比较, 需要这些地震强度函数具有相同的统计属性。因此对地震活动强度函数进行标准化处理:

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

其中: $\langle I_i(t_b, t) \rangle$ 为所有网格在 t 时刻地震活动强度函数的平均值; $\sigma(t_b, t)$ 是所有网格在 t 时刻地震活动强度函数的标准偏差。

(5) 判断地震活动是否异常: 利用标准化强度函数之差来判断网格 i 内的地震活动是否异常:

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

(6) 计算 $\Delta I_i(t_b, t_1, t_2)$ 的平均变化: 为了减少地震活动随机波动(噪声)的影响, 需要计算所有网格的标准化地震强度函数的变化量在 t_0 至 t_1 时间段的平均值:

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

(7) 求发震的概率函数: 定义未来地震发生在第 i 个网格内的概率函数为: $P_i(t_0, t_1, t_2)$, 即地震强度函数平均变化的平方:

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

(8) 求概率增益: 强地震发生在第 i 个网格内的概率增益为该网格的概率值减去所有网格概率值的平均值:

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

其中: $\langle \Delta P_i(t_0, t_1, t_2) \rangle$ 为所有网格发震概率的平均值。

将 $\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) > 0$ 的网格(地区)命名为热点(危险区), 并假设在 t_2 到 t_3 的时间段内, 热点区将发生 $M_f (M_f \geq M_0 + 2.0)$ 以上的地震。

此外, 本文参照前人的计算方法引入“阈值”的概念^[2-4], 其值等于 $\lg_{10}(\Delta P / \Delta P_{\max})$, 其中 ΔP 为第 i 个网格的概率增益, ΔP_{\max} 为所有网格概率增益的最大值。阈值的大小最终决定预测热点数的多少, 一般根据实际需求或回溯性检验得到的最佳结果来确定阈值下限。

2 研究区域及计算参数选取

2.1 研究区域

天山位于新疆的中部, 由西段乌兹别克斯坦境内的费尔干纳盆地向东延伸到中国的吐鲁番盆地, 呈楔状分布, 东西向绵延 2 500 km, 宽为 300 ~ 400 km, 平均海拔 2 500 m^[12]。天山构造经历了极其复杂的演变过程, 最早可追溯到中晚元古代, 这个时期是天山地震构造运动最为强烈的时期。天山地震带从新生代开始复活, 主要表现为大规模地壳缩短和褶皱冲断推翻构造的广泛发育^[13]。天山的地震活动具有强度大、频度高, 且不均匀分布的特点。天山山体内部虽然有一些中强地震发生, 但大地震主要分布在天山南、北两侧, 据此把天山地震带分为南天山地震带和北天山地震带^[14-15]。本文选取天山地震带(38.0°~46.0°N, 70.0°~90.0°E)为主要研究对象(图 3)。1994 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日, 该研究区域记录到 6.0~6.9 级地震 20 次, 其中 6.5 级以上地震 6 次(地震目录来源于新疆地震台网)。震例详细信息列于表 1。

2.2 PI 算法计算参数的设定

本文使用的地震目录来源于新疆地震台网中心。由于本文研究方法需使用 1970 年以来的地震目录, 对研究区域(38.0°~46.0°N, 70°~95°E)1970 年以来的地震目录做 $G-R$ 关系图(图 4), 显示该区的完备震级下限为 $M_L 3.0$ 。在 PI 算法中, 选取的地震目录下限 M_0 与预测的目标地震震级 M_f 有关 ($M_f = M_0 + 2$)^[2-3]。由于研究区地震台站分布不均匀, 因此采用 $M_C = M_S 4.0$ 为研究区域的震级下限不仅可以满足选取地震目录完备性的要求, 还满足研究区域 6.0 级以上地震预测的需求。计算过程中, 本文计算参数阈值取为 0.5, 空间网格间距 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$, 异常学习时间窗为 15 年, 预测时间窗为 4 年。

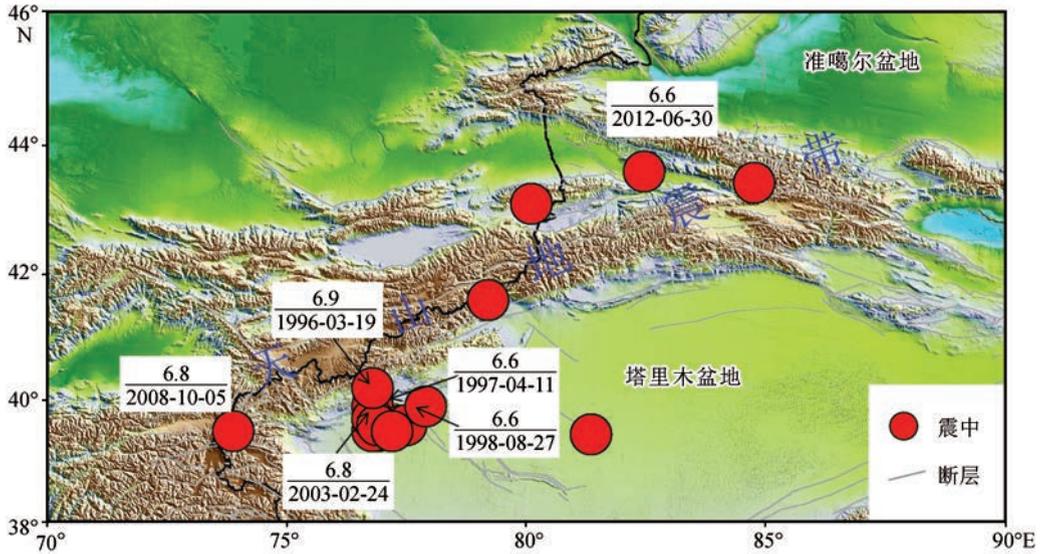


图3 研究区1994—2014年 $M_s \geq 6.0$ 地震分布

表1 本文研究震例信息

序号	发震时间	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ M_s	发震地点
1	1996-03-19T23:05:25	40.13	76.63	6.9	新疆阿图什
2	1997-01-21T09:47:13	39.6	77.04	6.0	新疆伽师、阿图什
3	1997-01-21T09:48:21	39.59	77.06	6.2	新疆伽师、阿图什
4	1997-03-01T14:04:13	39.57	76.96	6.0	新疆伽师
5	1997-04-06T07:46:16	39.52	77.04	6.4	新疆伽师
6	1997-04-06T12:36:32	39.56	77.04	6.2	新疆伽师
7	1997-04-11T13:34:43	39.60	76.97	6.6	新疆伽师
8	1997-04-16T02:19:09	39.69	76.97	6.2	新疆伽师
9	1998-03-19T21:51:33	40.12	76.82	6.0	新疆阿图什
10	1998-08-02T12:40:40	39.72	77.06	6.1	新疆伽师
11	1998-08-27T17:03:33	39.82	77.14	6.6	新疆伽师、巴楚间
12	2003-02-24T10:03:41	39.62	77.27	6.8	新疆巴楚、伽师间
13	2003-12-01T09:38:30	42.99	80.47	6.0	中、哈交界
14	2005-02-15T07:38:07	41.72	79.37	6.3	新疆乌什
15	2008-10-05T23:52:50	39.46	74.04	6.8	新疆乌恰
16	2008-10-06T00:11:04	39.40	73.69	6.2	新疆乌恰
17	2011-11-01T08:21:25	43.65	82.38	6.0	新疆尼勒克
18	2012-03-09T06:50:08	39.42	81.32	6.0	新疆洛浦
19	2012-06-30T05:07:34	43.43	84.77	6.6	新疆新源
20	2013-01-29T00:38:52	42.62	79.63	6.4	哈萨克斯坦

为了检验地震热点的稳定演化过程,以1年为步长向前滑动,给出了1994—2014年的地震热点图像,探索天山地震带长时间的PI图像演化过程与强震关系。

3 计算结果分析

依据2.2节的计算参数,我们获得了18个预测时间段的PI地震热点分布图(图5)。在这些预测时段内,研究区域发生了20次6.0级以上地震(表1),每个预测时段内发生的6.0级以上地震均标注

于预测图中(图5中蓝色圆圈)。

分析图5地震热点的演化图像与预测时段发生的6级以上地震,可以得到以下认识:

(1) 图5所示的地震热点主要分布在阿尔泰山地震带和天山地震带上。本文研究的20次6级以上地震大部分落在地震热点或其附近位置。研究时段内发生的6次6.5级以上地震(含伽师震群)前均出现不同程度的连续的热点异常演化过程。从图5中可以看出,PI算法具有较好的中长期预测效果。

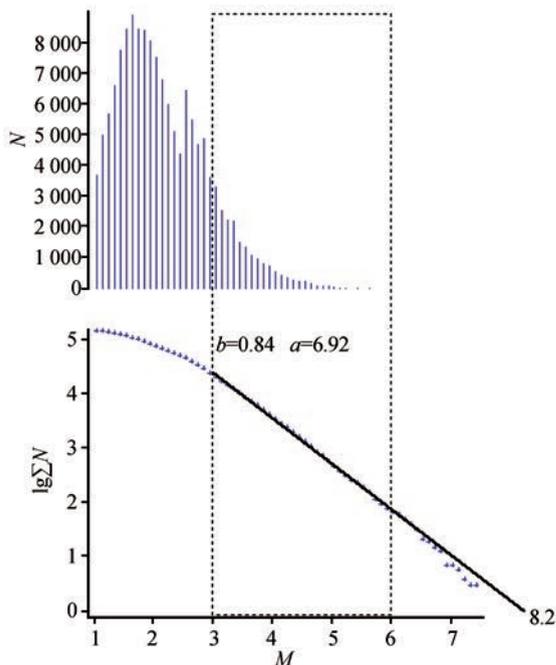


图 4 研究区域地震目录 G-R 关系图

(2) 图 5(a) 预测时段为 1994-01-01—2001-12-31, 这段时间内南天山西段发生了 11 次 6 级以上地震(表 1)。其中 1997 年伽师震群发生在 1996 年 3 月 19 日阿图什 6.9 级地震以南约 30 km 处。从图 5(a) 可以看到, 南天山西段, 即震群的西北角出现了地震热点。按照摩尔原则, 热点周围 9 个格子内发生地震, 都算是预测成功的。自图 5(a) 开始, PI 异常图像显示出喀什—乌恰交汇区存在地震热点, 将预测时间向后推移[图 5(b)~(d)], 交汇区的地震热点分布增加, 发震概率增强, 图 5(e) 后交汇区地震热点分布减少。图 5(a)~(d) 的预测时段都包括了 1997 年伽师震群时段, 该区域的热点异常的演化过程对该震群的发生有指示意义。

(3) 图 5(g) 预测时段为 1996-01-01—2000-01-01—2003-12-31, 这段时间内发生了巴楚—伽师 6.8 级地震(2003 年 2 月 24 日), 图 5(g)~(i) 展示了震中附近地震热点增强至减弱的演化过程。

(4) 2008 年 10 月 5 日新疆乌恰发生了 6.8 级强震。从图 5(k)~(p) 可以看见, 乌恰 6.8 级地震震中附近所在网格及其邻近网格出现了“从不存在热点[图 5(k)]—出现热点[图 5(l)]—热点增强[图 5(o)]—热点减弱至消失[图 5(p)]”的演化过程。

(5) 2012 年新源, 和静交界 6.6 级地震前震中所在网格及邻近网格均出现地震热点。自图 5(n) 开始, PI 异常图像显示出北天山地区存在地震热

点, 将预测时间向后推一年[图 5(o)], 该处的地震热点分布增加, 且发震概率增强, 将预测时间窗继续向后逐年类推[图 5(p)~(r)], 该处地震热点分布有所变化, 但震中附近仍存在地震热点。从图像变化中可以明显看出, 2012 年 6 月 30 日新源、和静交界 6.6 级地震前的“PI 热点”的演化过程对本次地震的发生具有指示意义。

4 PI 预测效能检验

为了定量评价 PI 算法在不同预测时间窗的预测效能, 本文采用 ROC 曲线方法^[16] 和 R 值评分^[17] 进行统计检验。

(1) 接收者操作特性 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 方法是用在设定的危险性概率阈值下预测结果的“命中率”和“虚报率”, 以评估计算方法的预测效能。“命中率”由预测“有震”而实际发震的空间网格数与总的实发地震所占空间网格数之比表示; “虚报率”为预测“有震”而未发生地震的空间网格数与实际未发生地震的空间网格数之比表示^[3]。Zhang 等^[9] 将 ROC 检验图中 PI 算法预测实线与随机预测虚线包络的面积定义为有效预测系数 E_f , 即 E_f 值越大表明预测效能越好。本文利用该方法对图 5 中的不同预测时段进行检验, 图 6 给出图 5 对应预测时段的 ROC 图标。从图中可看出 PI 算法的预测效能显著优于随机预测。PI 算法在不同预测时间窗的有效预测系数 E_f 值列于表 2。表 2 中可见, PI 算法的 E_f 值相对 R 值较稳定, 是可应用于天山地震带 6 级地震中长期预测的较好方法。

(2) R 值评分方法是用来评价地震预测效能的方法。目前常用的计算方式是将研究区域进行网格划分, R 值即为报震的成功率减去危险区占用的预报网格数与总的网格数之比, 其值越大, 预测效果越好^[17-18]。本文把震中所在网格为中心, 为避免地震目录定位带来的误差问题, 地震发生在阈值之上的“热点”及周围 8 个网格内均被认为是“命中”, 邻近的 8 个方框对热点框而言称之为“摩尔邻近”^[2,9]。将研究区域按 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ 共占 922 个网格(不算境外网格), 以图 5(b) 为例, 此预测时间段窗口中新疆发生的 11 个地震中有 9 个命中在地震热点上, 其报震成功率为 9/11, 地震热点占 53 个网格, 则 $R = \frac{\text{有震报准数}}{\text{总有震数}} - \frac{\text{预报网格数}}{\text{总网格数}} = \frac{9}{11} - \frac{53}{922} = 0.77$ 。按此

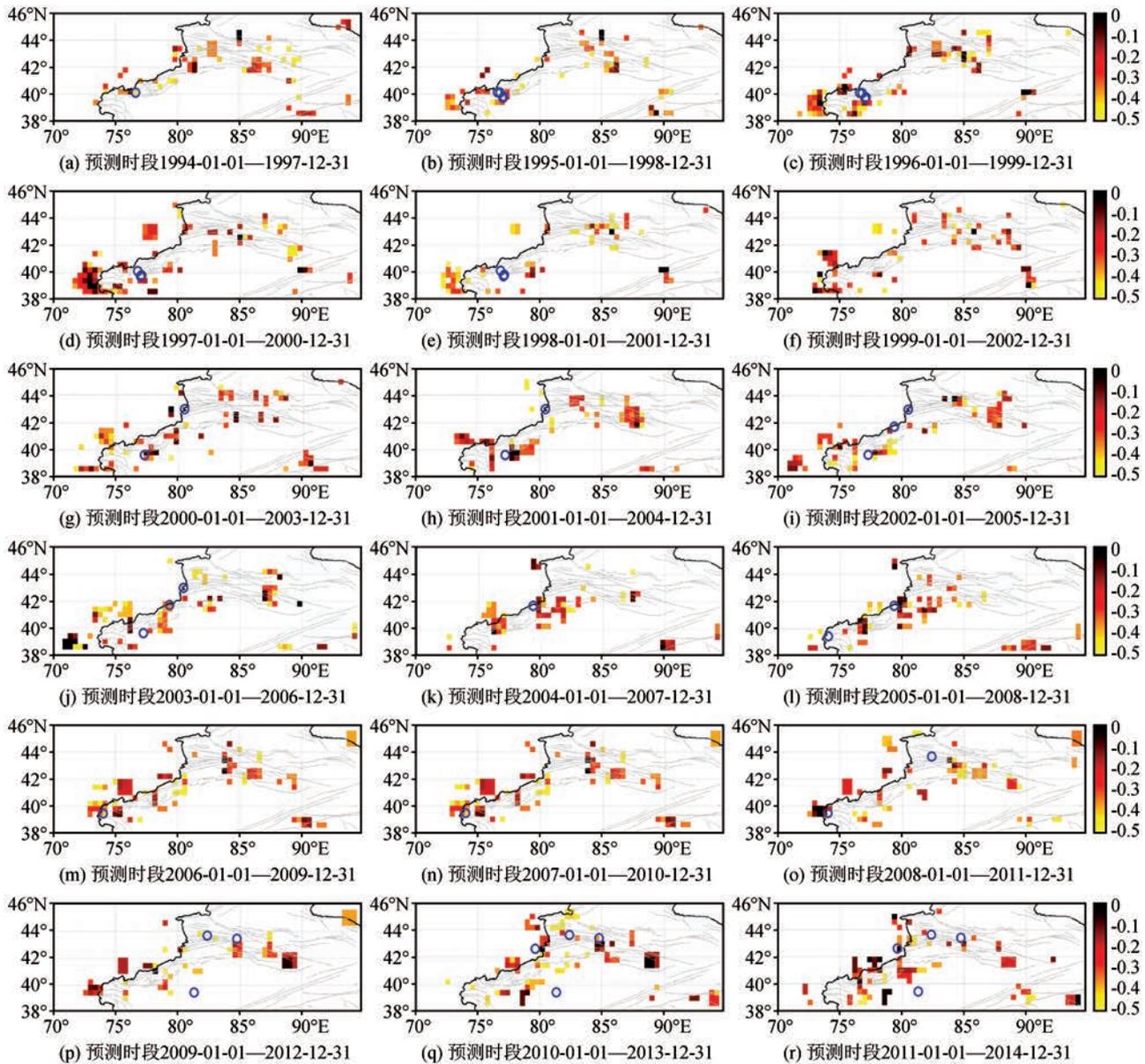


图5 不同预测时间窗口的PI图像演化(图中小色块为计算所得的热点,图右侧的色带为发震概率增益 $\lg(\Delta P/\Delta P_{\max})$, 阈值 ω 取-0.5,蓝色空心圆圈表示在每个预测时间段内该地区发生的 $M_s 6.0$ 以上地震)

方法依次计算不同预测时间窗的 R 值,其评价结果列于表2。由表2可见, R 值评分中仅有2次为负值,其余16个窗口 R 值评分均大于0,最高值达0.94, R 值平均值为0.61,显示PI算法对天山地震带6级地震的可预测性。

5 结论与讨论

(1) 本文利用PI算法研究了天山地震带6级以上地震的异常图像演化过程,研究结果表明:该地区1994—2013年发生的 $M_s 6.0$ 以上强震都落在地

震热点上或其附近。研究时段内发生的6次6.5级以上地震前均出现不同程度的连续热点异常演化过程。

(2) 本文采用ROC曲线方法和 R 值评分方法进行检验,结果表明, R 值评分结果仅有2次为负值,其余16个窗口 R 值评分均大于0,均值为0.61;ROC检验图中PI算法预测实线与随机预测虚线包围的面积定义的有效预测系数 E_f 值相对比较稳定。由此可见,PI算法预测效果要优于随机预测,在该地区具有较高的预测效能。

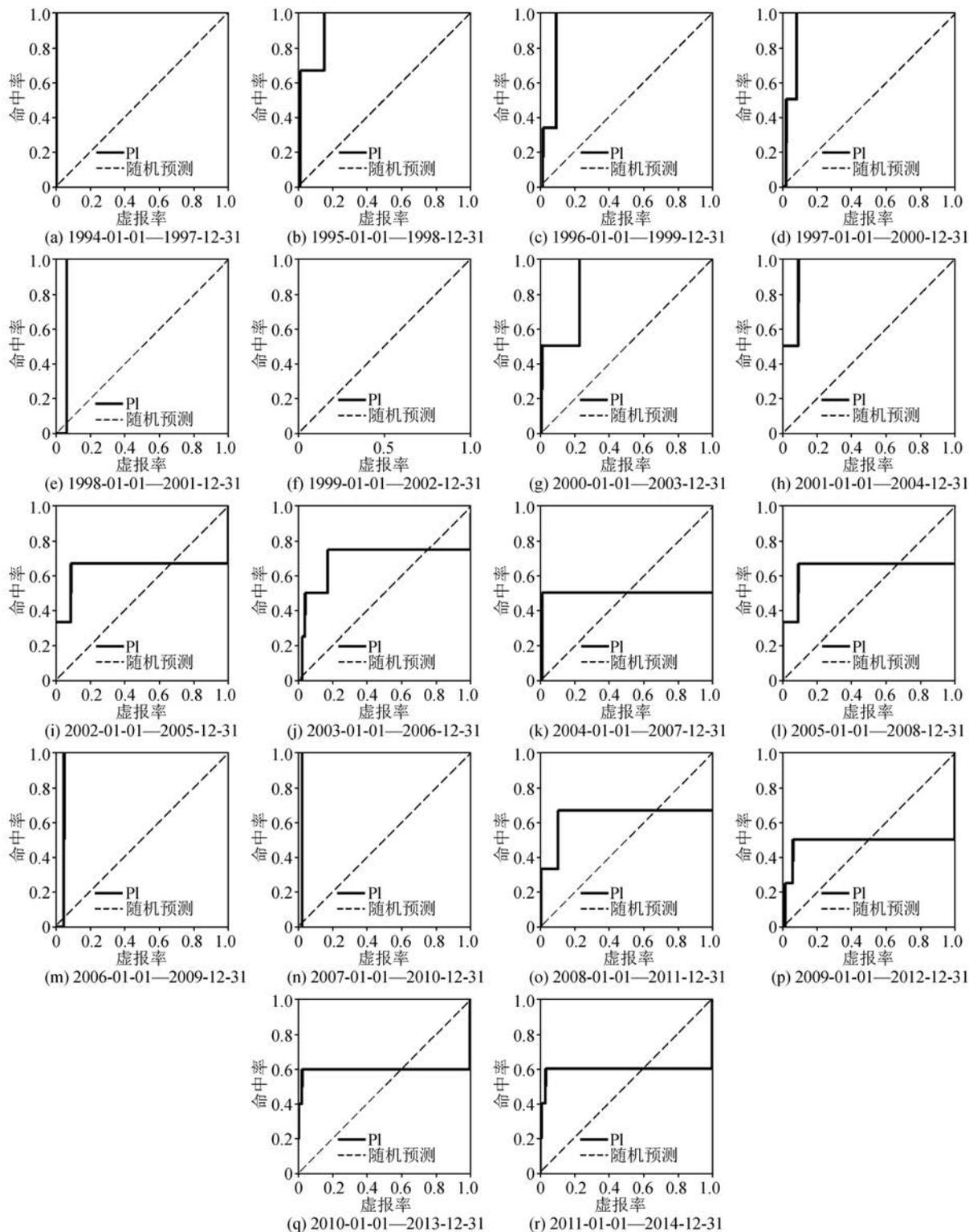


图 6 PI 算法回溯性研究的 ROC 曲线检验图

(3) 地震热点反映的是热点地区在变化时间段内的地震活动偏离平均状态(背景时段的地震活动)。本文网格大小为 $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$, 学习时段为 15 年, 预测时段为 4 年。Zhang 等^[9] 研究表明, 网格尺度和研究区域范围的选取对预测结果均有影响, 一

般情况下, 对大地震选取大的网格尺度、较长的预测时间往往能够取得较好的预测效果。

(4) 本文利用 PI 算法得到的“地震热点”是描述与该区本身历史地震活动背景相比以及研究区域所有网格相比的地震活动水平相差较大的地区。从

表2 不同预测时间窗下PI算法的R值评分和 E_f 值

序号	预测时间窗	R 值评分	E_f
1	1994-01-01—1997-12-31	0.93	0.5
2	1995-01-01—1998-12-31	0.77	0.493
3	1996-01-01—1999-12-31	0.73	0.448
4	1997-01-01—2000-12-31	0.72	0.44
5	1998-01-01—2001-12-31	-0.06	0.44
6	1999-01-01—2002-12-31	-0.05	-
7	2000-01-01—2003-12-31	0.44	0.39
8	2001-01-01—2004-12-31	0.42	0.453
9	2002-01-01—2005-12-31	0.42	0.25
10	2003-01-01—2006-12-31	0.42	0.243
11	2004-01-01—2007-12-31	0.94	0.125
12	2005-01-01—2008-12-31	0.94	0.186
13	2006-01-01—2009-12-31	0.94	0.45
14	2007-01-01—2010-12-31	0.92	0.46
15	2008-01-01—2011-12-31	0.61	0.196
16	2009-01-01—2012-12-31	0.62	0.11
17	2010-01-01—2013-12-31	0.66	0.14
18	2011-01-01—2014-12-31	0.66	0.14
	平均值	0.61	0.32

图5中可看出“热点”还具有一定的分散性和不稳定性,这可能与研究区地震活动背景、网格划分、滑动时间窗所包含的地震活动信息等有关系。通过对这些PI算法“地震热点”时空演化过程的研究,分析强震长期孕育的过程对地震发生的时间、地点预测具有一定的指示意义。

参考文献

- [1] RUNDLE J B, KLEIN W, TIAMPO K F, et al. Linear Pattern Dynamics in Nonlinear Threshold Systems[J]. *Phys Rev E*, 2000, 61(3): 2418-2432.
- [2] RUNDLE J B, TIAMPO K F, KLEIN W, et al. Self-organization in Leaky Threshold Systems: The Influence of Near-mean Field Dynamics and Its Implications for Earthquakes, Neuro-Biology, and Forecasting[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2002, 99(Suppl 1): 2514-2521.
- [3] HOLLIDAY J R, NANJO K Z, TIAMPO K F, et al. Earthquake Forecasting and Its Verification[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2005, 12(6): 965-977.
- [4] CHEN C C, RUNDLE J B, HOLLIDAY J R, et al. The 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake as a Typical Example of Seismic Activation and Quiescence[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): 22315.
- [5] CHEN C C, RUNDLE J B, LI H C, et al. From Tornadoes to Earthquakes: Forecast Verification for Binary Events Applied to the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006, 17(3): 503-516.
- [6] 蒋长胜, 吴忠良. 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)*, 2008, 28(8): 852-861.
- [7] 张小涛. 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, 2009.
- [8] 李志海, 黄瑜. 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*, 2010, 24(3): 208-214.
- [9] ZHANG Y X, ZHANG X T, WU Y J, et al. 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*, 2013, 170(1-2): 197-208.
- [10] 张小涛, 张永仙, 夏彩韵, 等. 利用图像信息方法研究芦山 $M_7.0$ 地震前川滇及附近地区的图像异常[J]. *地震学报*, 2014, 36(5): 780-789.
- [11] 夏彩韵, 张永仙, 张小涛, 等. 利用两次新疆于田 $M_7.3$ 地震对图像信息方法可预测性的检验[J]. *地震学报*, 2015, 37(2): 312-322.
- [12] 熊小松, 高锐, 李秋生, 等. 天山造山带的深部结构[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(6): 1906-1914.
- [13] 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 等. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J]. *地质通报*, 2006, 5(8): 895-909.
- [14] 高国英, 王季达. 天山地震带及乌恰交汇区强震活动特征[J]. *内陆地震*, 1993, 7(3): 271-278.
- [15] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [16] MOLCHAN G M. Earthquake Prediction as a Decision-making Problem[J]. *Pure Appl Geophys*, 1997, 149: 233-247.
- [17] SHI Y L, LIU J, ZHANG G M. The Evaluation of Chinese Annual Earthquake Prediction in the 90s[J]. *Graduate School Academia Sin*, 2000, 17: 63-69.
- [18] 马宏生, 刘杰, 吴昊, 等. 基于R值评分的年度地震预报[J]. *地震*, 2004, 24(2): 31-37.