

夏彩韵, 张永仙, 张小涛, 吴永加. 2015. 利用两次新疆于田 $M_{\text{S}}7.3$ 地震对图像信息方法可预测性的检验. 地震学报, 37(2): 312-322. doi:10.11939/jass.2015.02.011.

Xia C Y, Zhang Y X, Zhang X T, Wu Y J. 2015. Predictability test for pattern information method by two $M_{\text{S}}7.3$ Yutian, Xinjiang, earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 37(2): 312-322. doi:10.11939/jass.2015.02.011.

利用两次新疆于田 $M_{\text{S}}7.3$ 地震对 图像信息方法可预测性的检验^{*}

夏彩韵¹⁾ 张永仙^{2),*} 张小涛²⁾ 吴永加²⁾

1) 中国北京 100036 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 以青藏构造块体为研究区域, 采用以往利用图像信息方法预测 $M7.0$ 地震得到的较好的计算参数(网格尺度为 1 平方度, 预测时间窗口为 8 年), 系统计算了青藏构造块体 1993 年以来的“地震热点”图像, 特别研究了两次于田 $M_{\text{S}}7.3$ 地震前后的图像信息演化过程, 并通过 ROC 方法和 R 值评分方法检验, 对图像信息方法在该地区的预测效能进行评价. 结果表明: ① 2008 年 3 月 21 日于田 $M_{\text{S}}7.3$ 地震和 2014 年 2 月 12 日于田 $M_{\text{S}}7.3$ 地震均发生在地震热点上, 且发生在平均发震概率随时间变化的峰值点年份. ② 在回溯性检验的时间段内青藏构造块体共发生 9 次 $M \geq 7.0$ 地震, 其中 6 次地震前震中附近均有稳定的地震热点出现, 包括两次于田 $M_{\text{S}}7.3$ 地震. 1996 年喀喇昆仑山口 $M_{\text{S}}7.1$ 地震及 2008 年汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震只在个别预测时间窗内出现地震热点, 并没有出现稳定的地震热点演化过程, 而 1996 年丽江地震发生前震中附近则没有出现地震热点. 该结果与前人研究结果存在差异, 值得进一步研究. ③ ROC 检验和 R 值评分结果均显示图像信息方法在本文采用的模型参数下对大地震具有较好的中长期预测效果. 本文还根据目前存在的地震热点给出了青藏高原块体 2014 年以后 $M7.0$ 地震发生概率高的 3 个可能地区.

关键词 图像信息方法 地震热点 新疆于田 $M_{\text{S}}7.3$ 地震 青藏构造块体 地震可预测性
doi:10.11939/jass.2015.02.011 中图分类号: P315.7 文献标志码: A

Predictability test for pattern information method by two $M_{\text{S}}7.3$ Yutian, Xinjiang, earthquakes

Xia Caiyun¹⁾ Zhang Yongxian^{2),*} Zhang Xiaotao²⁾ Wu Yongjia²⁾

1) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: In this paper, the Qinghai-Tibet tectonic block was chosen to be the study region, and calculating parameters with grid of $1^\circ \times 1^\circ$ were employed according to the previous studies by pattern informatics (PI) method for $M7.0$ earthquake prediction. Hotspot diagrams of each prediction window since 1993

* 基金项目 科技部“十二五”科技支撑项目(2012BAK19B02-05)和国际科技合作项目(2010DFB20190)联合资助.

收稿日期 2014-03-26 收到初稿, 2014-07-28 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: yxzhseis@sina.com

have been obtained, and the relationship between the hotspots and the $M>7.0$ earthquakes during the prediction windows were studied. The predictability of PI method was tested by verification of receiver-operating characteristic (ROC) curve and R score. The results show that: ① Both of the Yutian $M_s7.3$ earthquakes in 2008 and in 2014 occurred in the region with the hotspots in the year with the highest average possibility. ② Nine earthquakes of $M\geq 7.0$ occurred in the retrospective studied period since 1993. Six of the nine earthquakes could be predicted by the successive obvious hotspots imagine, including the two Yutian $M_s7.3$ earthquakes; two of the nine earthquakes might be predicted because hotspots only occurred in a single predicted window without successive evolution process, including the Karakorum Pass $M_s7.1$ earthquake in 1996 and the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake in 2008; one of the nine earthquakes, i.e., Lijiang, Yunnan, $M_s7.0$ earthquake in 1996, could not be predicted because no hotspots appeared before the earthquake. The results associated with Wenchuan $M_s8.0$ earthquake in this paper are different from those of the previous studies, which may be caused by the difference in selected study region and calculating parameters. ③ Test results of the predictability of PI method by ROC and R score show that positive prospect of PI method could be expected for long-term earthquake prediction. According to the calculating results based on the parameters from this study, three regions with high possibility for potential $M7.0$ earthquake risk in the future were given.

Key words: PI method; hotspot; Yutian $M_s7.3$ earthquake; Qinghai-Xizang tectonic block, earthquake predictability

引言

图像信息方法(pattern informatics method, 简写为 PI)是由 Rundle 等(2000a, b)提出用于地震活动性研究的地震统计物理方法, 并一直应用于地震活动的中长期预测研究中, 具有比较高的空间分辨能力和较好的预测效果(蒋长胜等, 2009; Zhang *et al.*, 2013)。最初该方法被称为“相位动力学概率变化”(phase dynamical probability change, 简写为 PDPC)。他们把地震活动看作是自组织阈值系统的一个特例, 并利用 PDPC 方法计算出 2000 年 1 月—2009 年 12 月美国南加州有可能发生 $M\geq 5.0$ 地震的地区。事后检验大约 90% 的目标地震发生在所预测的危险区内(Rundle, 2000a, 2002)。研究结果表明, 该方法在地震中长期危险区预测中具有较高的空间分辨率。Holliday 等(2005)利用 PI 方法对全球 2000 年 1 月 1 日—2009 年 12 月 31 日发生 $M\geq 7.0$ 地震的可能性进行了预测, 回溯性检验结果显示, 2004 年 12 月 23 日麦阔里岛 $M_8.1$ 地震和 2004 年 12 月 26 日苏门达腊 $M_s9.0$ 地震的震中均位于“地震热点”上或其附近。Nanjo 等(2006)利用 PI 方法对日本(33° — 38° N, 136° — 142° E)2000 年 1 月—2009 年 12 月发生 $M\geq 5.0$ 地震的可能性进行预测, 回溯性检验结果显示, 2000 年 6—8 月发生在 Miyake 岛的 $M_s7.0$ 地震群位于“地震热点”上, 2004 年 10 月 23 日新潟(Niigata) $M_L6.8$ 地震及其余震的震中均位于“地震热点”附近。Chen 等(2005)将 PI 方法应用到我国台湾地区(21° — 26° N, 119° — 123° E)地震危险性的研究中, 回溯性检验结果显示 1999 年 9 月 21 日台湾集集 $M_s7.6$ 地震的震中位于计算所

得到的“地震热点”内。蒋长胜和吴忠良(2008)通过回溯性研究认为, PI 方法对川滇地区的中长期地震活动具有一定的预测能力。张小涛(2009)用 PI 方法对我国云南、大华北等地区进行中长期地震危险性的预测研究, 通过多次回溯性检验筛选出适合于不同研究区域的计算参数, 并利用这些参数对研究区域的地震危险性进行预测。Zhang 等(2013)以 2008 年于田 $M_s 7.3$ 地震和汶川 $M_s 8.0$ 地震为例, 对我国西部地区(20° — 50° N, 70° — 110° E)分别进行了回溯性预测检验研究, 通过调整 PI 方法中的计算参数范围, 利用 R 值评分方法(Xu, 1989; 石耀霖等, 2000)和 ROC 方法(Swets, 1973; Molchan, 1997)评价两次地震的预测效能, 给出预测效能最高的计算参数选取范围, 为后续 PI 方法在中国西部的应用提供了参考。

新疆是中国强震多发区之一, 昆仑山、天山及阿尔泰山均为地震活动较为频繁的区域(尹光华等, 2008)。2014 年 2 月 12 日新疆于田(36.1° N, 82.5° E)发生的 $M_s 7.3$ 地震, 是继 2008 年 3 月 21 日新疆于田(35.6° N, 81.6° E)发生 $M_s 7.3$ 地震 6 年后的又一次大地震。2008 年新疆于田 $M_s 7.3$ 地震震中位于西昆仑地震带与阿尔金断裂带的交汇区(尹光华等, 2008), 而 2014 年于田 $M_s 7.3$ 地震震中与其仅相距 100 km, 也在阿尔金断裂带上(王晓欣等, 2014)。从大的活动地块来说, 这一地区属于青藏和西域两大活动地块边界区(张培震, 1999)。

Zhang 等(2013)的研究结果表明, 2008 年于田 $M_s 7.3$ 地震震中附近出现了 PI 热点图像, 由此引发的问题是, 本次于田 $M_s 7.3$ 地震前震中附近是否存在 PI 热点图像。此外, 在相隔 100 km 的于田地区不到 6 年的时间内发生了两次 $M_s 7.3$ 地震, 这为检验 PI 方法的可预测性提供了很好的检验条件。由于两次于田 $M_s 7.3$ 地震均位于青藏构造块体西北缘, 本文选取青藏构造块体为研究区域, 采用以往预测 $M7.0$ 地震的较好计算参数(网格尺度为 1 平方度, 预测时间窗口为 8 年)(Zhang *et al.*, 2013), 系统研究青藏构造块体 1993 年以来每 8 年时间窗的“地震热点”图像, 特别研究两次于田 $M_s 7.3$ 地震前后的图像信息演化过程, 并通过 ROC 方法检验和 R 值评分方法, 对 PI 方法在该地区的预测效能进行评价; 在此基础上尝试对青藏构造块体潜在的 $M_s 7.0$ 地震危险区域进行预测。

1 PI 方法

Rundle(2000b)提出的 PI 方法是通过将研究区域进行时空网格划分, 分别对落入每个网格内的地震活动构建其频度时间序列, 通过统计方法计算每个网格中的地震活动强度函数对背景的偏离程度, 并归算到显著地震事件发生的概率, 再扣除背景概率后检测发震概率高的网格, 即“地震热点”。本文将参考 Holliday 等(2005)对 PI 方法的实现过程, 系统计算青藏构造块体 1993 年以来的“地震热点”图像。

2 研究区域及计算参数选取

2.1 研究区域

本文选取青藏构造块体所包含的矩形区域(21.0° — 41.0° N, 74.0° — 106.0° E)为研究对象。该区域受印度-欧亚板块强烈碰撞作用的影响, 新生代以来先后形成了青藏活动地块区的多个活动构造地块(尹光华等, 2008), 使得该区域地质构造复杂, 是现今地壳运动最为活跃的地区之一, 也是强震活动比较复杂的地区之一(徐锡伟等, 2005)。据中国地震台

网中心^①统计自 1970 年 1 月 1 日以来,该研究区域记录到 $M_{6.0}—6.9$ 地震 135 次, $M_{7.0}—7.9$ 地震 17 次, $M \geq 8.0$ 地震 2 次. 本文研究区域中,1993—2014 年共发生 9 次 $M \geq 7.0$ 地震,具体震例信息见表 1.

表 1 本文研究震例

Table 1 Earthquake examples used in this study

发震时间(北京时间)		震中位置	北纬/°	东经/°	M_s
年-月-日	时:分:秒				
1996-02-03	19:14:18	云南丽江	27.2	100.3	7.0
1996-11-19	18:44:44	喀喇昆仑山口	35.4	78.4	7.1
1997-11-08	10:02:52	西藏玛尼	35.2	87.3	7.5
2001-11-14	17:26:00	昆仑山口西	35.9	90.5	8.1
2008-03-21	22:33:02	新疆于田县	35.6	81.6	7.3
2008-05-12	14:28:04	四川汶川县	31.0	103.4	8.0
2010-04-14	09:25:17	青海玉树县	33.2	96.6	7.1
2013-04-20	08:02:00	四川芦山	30.3	103.0	7.0
2014-02-12	09:56:11	新疆于田县	36.1	82.5	7.3

2.2 PI 方法计算参数的设定

本文使用的地震目录引自中国地震台网中心^①. 在整个青藏构造块体内, 西藏地区的监测能力较低, 目前只能监测到 $M \geq 3.0$ 以上地震^②. 由于本文研究方法需使用 1970 年以来的地震目录, 因此对西藏地区 (26.5° — 36.5° N, 77° — 100° E) 1970 年以来的地震目录做 G-R 关系图(图 1), 显示该区的完备震级下限为 $M_{L4.5}$. 在 PI 方法中, 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 ($M_f = M_0 + 2$) (Tiampo *et al*, 2002; Rundle *et al*, 2002; Holliday *et al*, 2005), 因此采用 $M_c = M_{L5.0}$ 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, 还可以满足研究区域 $M \geq 7.0$ 地震的预测需求.

本文在采用 PI 方法研究两次于田 $M_s 7.3$ 地震时, 参照了 Zhang 等(2013)以大陆西部为研究区域, 分析汶川 $M_s 8.0$ 、于田 $M_s 7.3$ 地震前的 PI 异常图像演化过程的研究结果, 即计算参数阈值取 0.6、网格大小为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 和预测时间段为 8 年. 为了检验两次于田地震热点演化过程的稳定性, 我们把预测时间窗以 1 年为步长逐年向前滑动, 给出 1993 年以

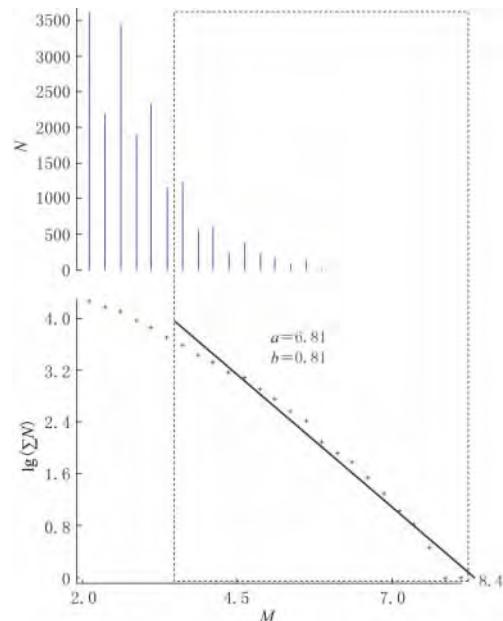


图 1 青藏高原地区地震目录 G-R 关系图

Fig. 1 Completeness of catalogue test by G-R relation in Qinghai-Xizang (Tibet) region

① <http://10.5.202.22/bianmu/validate.jsp>.

② 黄志斌在中国地震台网内部交流图.

来的地震热点图像, 以获取该研究地区较长时间的 PI 图像演化过程, 探索 PI 图像演化与 $M \geq 7.0$ 地震的关系, 特别是两次于田 $M_s 7.3$ 地震前后的 PI 演化图像.

3 计算结果分析

依据 2.2 节的计算参数, 共获得 22 个预测时间段的 PI 地震热点分布, 如图 2 所示. 在这些预测时段内, 研究区域共发生 9 次 $M \geq 7.0$ 地震(表 1), 每个预测时段内所发生的 $M \geq 7.0$ 地震均标注于预测图中(图 2 中空心圆圈).

分析图 2 中地震热点的演化图像与预测时段所发生的 $M \geq 7.0$ 地震, 可得到以下认识:

1) 2008 年和 2014 年两次于田 $M_s 7.3$ 地震前震中所在网格及邻近网格均出现地震热点. 从图 2i 开始, PI 异常图像显示出西昆仑地震带与阿尔金断裂带的交汇地区存在地震热点; 将预测时间窗向后推一年(图 2j), 该处地震热点分布范围未改变, 但发震概率增高. 将预测时间窗继续向后逐年类推(图 2k-n), 该处地震热点收缩至于田附近, 可以明显看到 2008 年于田 $M_s 7.3$ 地震发生前的 PI 热点演变过程. 随着预测时间窗继续逐年向后类推, 该地区热点依然继续存在, 对 2014 年于田 $M_s 7.3$ 地震的发生具有指示意义.

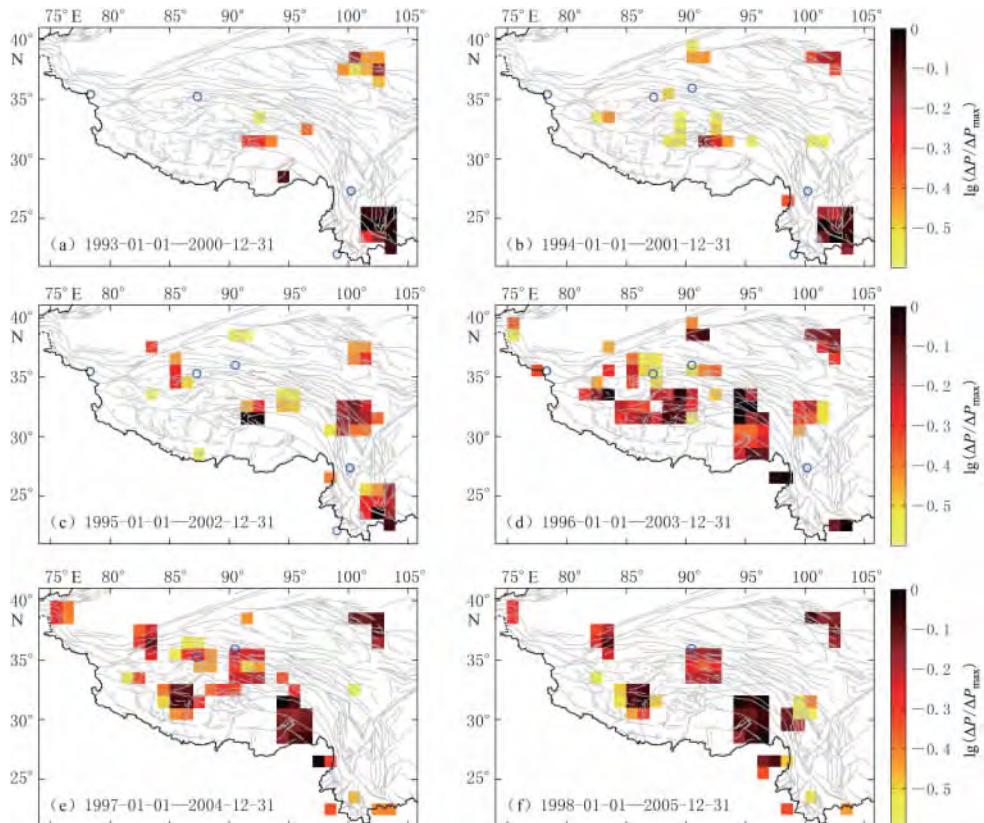


图 2 不同预测时间窗口的 PI 地震热点演化图 (a-f)

小色块为计算所得热点, 阈值 $\lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$ 取 -0.6 , 空心圈表示在相应预测时段内该地区发生的 $M > 7.0$ 地震

Fig. 2 The PI anomalies in different periods (a-f)

The colored boxes represent the calculated hotspots under the threshold possibility $\lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$ is taken as -0.6 . Circles represent the $M > 7.0$ earthquakes in different prediction period

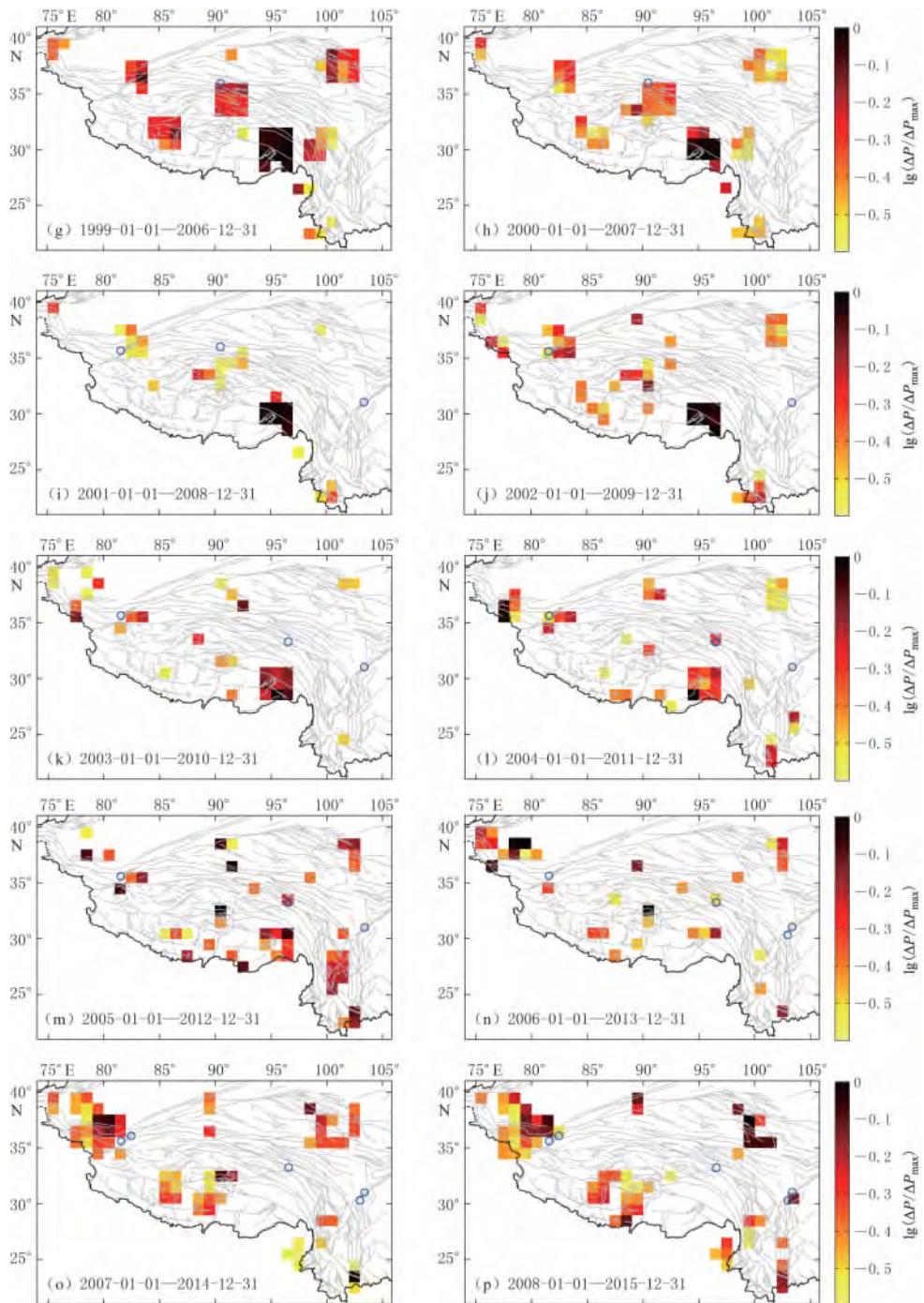


图 2 不同预测时间窗口的 PI 地震热点演化图 (g—p)

小色块为计算所得热点, 阈值 $\lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$ 取 -0.6 , 空心圈表示在相应预测时段内该地区发生的 $M > 7.0$ 地震

Fig. 2 The PI anomalies in different periods (g—p)

The colored boxes represent the calculated hotspots under the threshold possibility $\lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$ is taken as -0.6 . Circles represent the $M > 7.0$ earthquakes in different prediction period

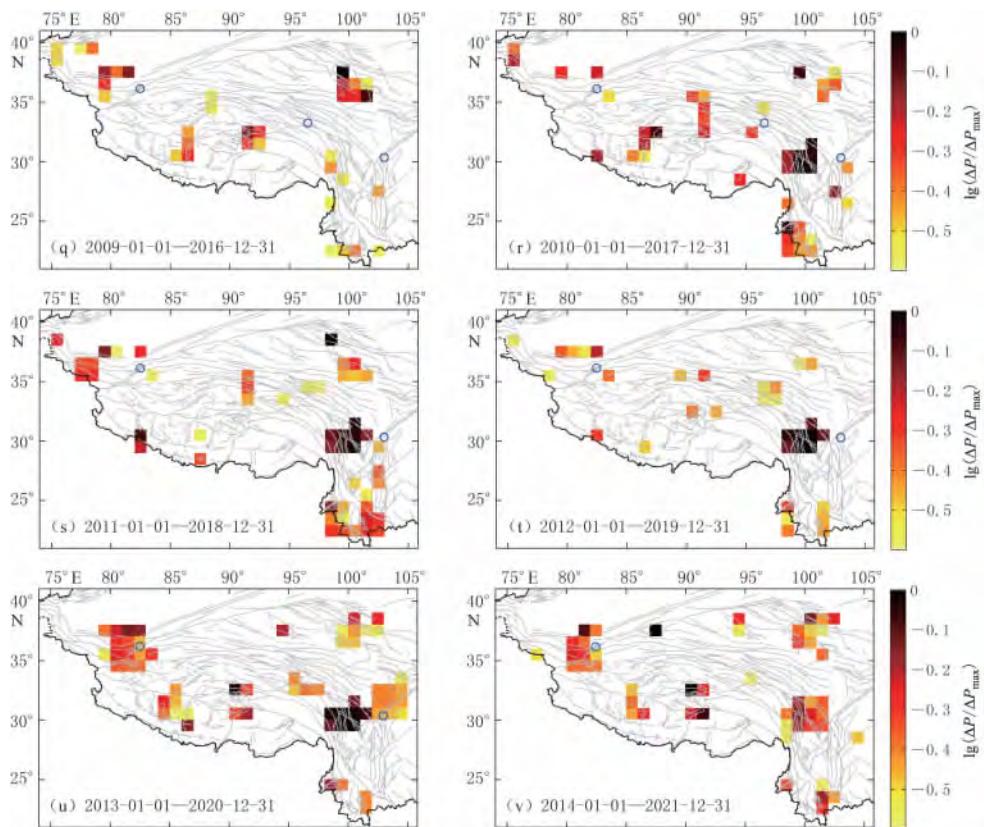


图 2 不同预测时间窗口的 PI 地震热点演化图 (q-v)

小色块为计算所得热点, 阈值 $\lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$ 取 -0.6 , 空心圈表示在相应预测时段内该地区发生的 $M > 7.0$ 地震

Fig. 2 The PI anomalies in different periods (q-v)

The colored boxes represent the calculated hotspots under the threshold possibility $\lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$ is taken as -0.6 . Circles represent the $M > 7.0$ earthquakes in different prediction period

从图 2o 开始, 2014 年于田 $M_{\text{S}} 7.3$ 地震落入预测时间窗内的地震热点上, 但预测时间窗继续向后类推时, 该处的地震热点变弱(图 2q-t), 直到预测时间窗为 2013 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日(图 2u-v)开始, 该处的地震热点开始变强, 2014 年于田 $M_{\text{S}} 7.3$ 地震重新落入地震热点内, 这可能预示着该处在未来的时间仍有发生强震的可能, 值得我们关注.

2) 研究区域发生的 9 次 $M \geq 7.0$ 地震中, 有 6 次地震前震中所在网格和邻近网格持续出现稳定的地震热点, 2 次地震前在个别预测时间段内出现地震热点, 1 次地震前震中所在网格和邻近网格无地震热点出现. 图 2b-d 显示出 1997 年西藏玛尼 $M_{\text{S}} 7.5$ 地震的周围存在地震热点, 并逐年增强; 2001 年昆仑山口西 $M_{\text{S}} 8.1$ 地震也在地震热点上. 将预测时间窗继续向后类推(图 2e-i), 可以看到昆仑山口西 $M_{\text{S}} 8.1$ 地震所在的地震热点呈现出从弱到强, 再变弱的一个演化过程. 图 2l 显示出 2010 年青海玉树 $M_{\text{S}} 7.1$ 地震在地震热点上, 随着预测时间窗向后类推(图 2o), 该处的地震热点经历了逐渐变弱直至消失的演化过程. 对于 2013 年芦山 $M_{\text{S}} 7.0$ 地震而言, 虽然其仅稳定出现在由 2010 年 1 月 1 日类推到 2013 年 1 月 1 日的 3 年预测时间窗(图 2r-u)的计算热点上, 但本文与张小涛等(2014)以川滇地区作为研究区域的计算结果进行对比, 发现其异常演化过程基本一致. 而喀喇昆仑山口 $M_{\text{S}} 7.1$

及汶川 $M_s8.0$ 地震均在个别预测时间窗内出现地震热点(图 2d, p), 丽江 $M_s7.0$ 地震则没有地震热点出现。通过前人利用 PI 方法对川滇等地区进行回溯性检验, 这些地区在发震前后均存在地震热点(蒋长胜等, 2009; 蒋卉等; 2013; Zhang *et al*, 2013)。对于造成这一差异的原因, 可能是与研究区域的选取及计算参数的设定有很大的关系, 尚需进一步深入讨论。

3) 两次于田 $M_s7.3$ 地震均发生在震中附近网格发震概率值升高到极大的年份。由于每个预测时间窗覆盖了 8 年, 为了定量刻画两次于田 $M_s7.3$ 地震震中附近网格发震概率的时间变化过程与地震之间的关系, 本文进行了如下处理: 分别以两次于田地震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 个网格内的均被认为是“命中”, 邻近的 8 个方框对热点框而言称之为“摩尔邻近”(Wolfram, 2002), 所以我们在每一个预测时间窗内将包括震中在内的 9 个网格的发震概率取平均值, 然后平均到 8 年窗口的每一个年份, 再把每一个年份的 8 个概率值累加, 获得每一个年份的平均发震概率值。对于 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震, 网格选取范围为(34.0° — 37.0° N, 80.0° — 83.0° E); 对于 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震, 网格选取范围为(35.0° — 38.0° N, 81.0° — 84.0° E)。两次于田地震震中所在网格和摩尔邻近网格的平均发震概率随时间变化如图 3 所示。可以看出: 对于 2008 年于田地震而言, 发震概率逐年增高, 到 2008 年达到一个峰值, 随后开始逐年下降, 于田地震发生在概率峰值的 2008 年; 对于 2014 年于田地震而言, 该地区发震概率逐年上升, 2004 年达到高值, 之后持续波动, 在 2014 年时达到最高, 这次于田地震也发生在概率峰值的 2014 年。值得注意的是: 2008 年于田 $M_s7.3$ 震中附近概率值也出现升高现象, 可能是由于其网格范围与 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震网格范围重叠, 包含了 2014 年地震孕育信息的原因。此外, 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震震中附近的发震概率一直高于 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震震中附近的发震概率, 且时间变化过程具有一定的相关性。这值得深入研究。

4 PI 预测效能检验

为了定量评价 PI 方法在不同预测时间窗的预测效能, 本文采用 ROC 曲线方法和 *R* 值评分方法进行统计检验。

1) ROC 方法是用在所设定的危险性概率阈值下预测结果的“命中率”和“虚报率”来评估计算方法的预测效能。“命中率”是由预测“有震”而实际发震的空间网格数与总体实际发生地震所占的空间网格数之比来表示; “虚报率”是由预测“有震”而没有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来表示(Holliday *et al*, 2005)。因此, 本文参照 Zhang 等(2013)的研究方法, 将 ROC 检验图中 PI 方法预测实线与随机预测虚线所包围的

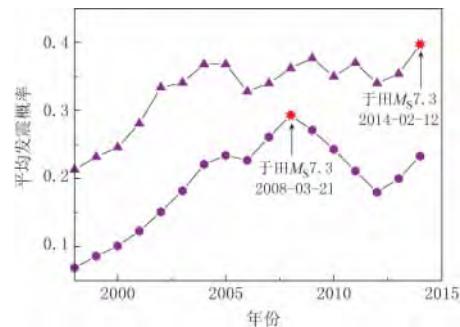


图 3 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震(实心圆连线)和 2014 年 2 月 12 日于田 $M_s7.3$ 地震(三角形连线)的平均发震概率随时间的变化

Fig. 3 Variation of the average seismogenic probability for the 2008 Yutian $M_s7.3$ (solid circle curve) and 2014 Yutian $M_s7.3$ (solid triangle curve) earthquakes with time

面积定义为有效预测系数 E_f , 即 E_f 值越大, 则表明预测效能越好. 由于篇幅有限, 本文仅给出 ROC 曲线评价最高和最低的两张图(图 4). 可以看出, PI 方法的预测效能显著优于随机预测. 表 2 给出了 PI 方法在不同预测时间窗的有效预测系数 E_f 值. 可以看出, PI 方法的 E_f 值均比较稳定, 是可以应用于 $M7.0$ 地震的中长期预测的较好方法.

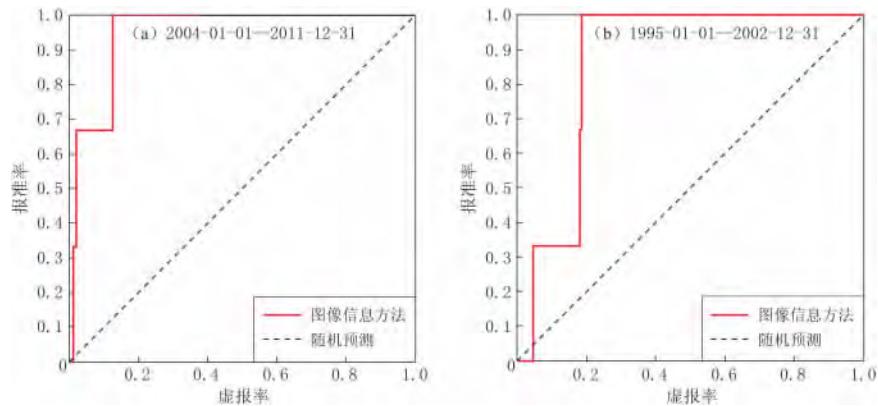


图 4 PI 算法回溯性研究的 ROC 曲线检验图

Fig. 4 ROC test for the retrospective study using PI method

表 2 不同预测时间窗下 PI 方法的
 R 值评分和 E_f 值

Table 2 R score and E_f values for different predict windows by PI method

序号	预测时间窗	R 值评分	E_f
1	1993-01-01—2000-12-31	-0.06	0.36
2	1994-01-01—2001-12-31	0.16	0.39
3	1995-01-01—2002-12-31	0.14	0.32
4	1996-01-01—2003-12-31	0.56	0.43
5	1997-01-01—2004-12-31	0.83	0.44
6	1998-01-01—2005-12-31	0.85	0.35
7	1999-01-01—2006-12-31	0.85	0.42
8	2000-01-01—2007-12-31	0.86	0.42
9	2001-01-01—2008-12-31	0.26	0.43
10	2002-01-01—2009-12-31	0.38	0.39
11	2003-01-01—2010-12-31	0.26	0.39
12	2004-01-01—2011-12-31	0.56	0.46
13	2005-01-01—2012-12-31	0.55	0.43
14	2006-01-01—2013-12-31	0.42	0.42

2) R 值评分方法是由 Xu(1989) 提出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 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格化, 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, R 值越大, 表明预测效果越好(石耀霖等, 2000). 本文将研究区域中的中国大陆按 $1^\circ \times 1^\circ$ 划分网格, 共占 390 个网格, 以图 2h 为例, 此预测时间段窗口中只发生 1 次地震并命中在地震热点上, 其报震成功率为 1, 地震热点占 54 个网格, 其 R 值为

$$R = \frac{\text{有报报准数}}{\text{总有震数}} - \frac{\text{预报网格数}}{\text{总网格数}} = 1 - \frac{54}{390} = 0.86.$$

按此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. 可以看出, R 值评分仅有一个时间窗低于 0, 其余 12 个时间窗均大于 0, 一些预测时段的 R 值评分高达 0.8, 表明 PI 方法对 $M7.0$ 地震的可预测性.

5 讨论与结论

1) 本文利用 PI 方法, 参照前人研究工作的结果选取预测效能较高的计算参数, 研究了于田两次 $M_{s7.3}$ 地震前后青藏高原块区的异常图像信息演化过程. 结果表明, 1993—

2014 年,研究区域内共发生 9 次 $M \geq 7.0$ 地震,其中包括于田两次 $M_s7.3$ 地震在内的 6 次地震震前均出现持续稳定的地震热点,两次地震在个别预测时间段里出现地震热点,1 次地震没有“命中”在地震热点及其摩尔邻近区内。本文进一步采用 ROC 曲线方法和 R 值评分方法进行检验,其结果均表明 PI 方法在该地区具有较高的预测效能。于田两次地震均发生在平均发震概率的峰值点年份,表明对 PI 热点的发震概率时间过程追踪可能是对 $M7.0$ 地震时间预测逐步逼近的途径。

2) PI 方法的地震热点的检验是将区域网格化,进而检验各网格地震活动状态偏离度高的区域。在本文的研究中,1996 年 2 月 3 日丽江 $M_s7.0$ 及 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s8.0$ 等 3 次地震震前并没有出现持续稳定的地震热点演化过程,该结果与前人的研究结果有所不同。其原因可能是由于地理范围的选取及计算参数的差异性造成的,这与强震附近的地震目录是否记录了较为完整的地震活动性资料,以及强震前若干年没有中小地震活动可能都有关系。对于如何选取合适的地理范围作为研究区域及合理的参数设定,这一问题仍值得深入研究与探讨。

3) 覆盖 2014 年以后的预测时间窗内还存在 3 个地震热点显著的区域(图 2p-v),即川滇藏交界(28.0° — 32.0° N, 97.0° — 103.0° E)、甘青川交界(30.0° — 34.0° N, 100.0° — 104.0° E)、滇西南—滇西地区(21.0° — 26.0° N, 101.0° — 104.0° E)。这 3 个区域有热点持续稳定的异常演化过程,可能是未来发生 $M7.0$ 地震概率较高的地区。

4) 本文中计算所得到的“地震热点”是描述与自己背景历史相比及计算区域所有网格相比地震活动状态偏离度较大的地区。从图 2 中可看出“热点”还具有一定的不稳定性,这可能与滑动时间窗所包含的地震活动信息不同有关。根据这些“热点”的时空演化过程可以考察出地震长期孕育的过程,对地震的发生具有一定的指示意义。

参 考 文 献

- 蒋卉,吴忠良,马腾飞,蒋长胜. 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.
- Jiang H, Wu Z L, Ma T F, Jiang C S. 2013. Retrospective test of the PI forecast: Case study of the April 20, 2013, Lushan, Sichuan, China, $M_s7.0$ earthquake[J]. Physics, 42(5): 334—340 (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. Sichuan—Yunnan: A approach based on statistical physics and retrospective forecast test[J]. Science in China: Series D, 38(7): 852—861 (in Chinese).
- 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).
- 石耀霖,刘杰,张国民. 2000. 对我国 90 年代年度地震预报的评估[J]. 中国科学院研究生院学报, 17(1): 63—69.
- Shi Y L, Liu J, Zhang G M. 2000. The evaluation of Chinese annual earthquake prediction in the 90s[J]. Journal of the Graduate School Academia Sinica, 17(1): 63—69 (in Chinese).
- 王晓欣,刘瑞丰,邹立晔,袁菲,陈宏峰,陈运泰,张立文,梁建宏. 2014. 2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_s7.3$ 地震参数测定[J]. 地震学报, 36(3): 522—528.
- Wang X X, Liu R F, Zou L Y, Yuan F, Chen H F, Chen Y T, Zhang L W, Liang J H. 2014. Determination of the parameters for the 12 February 2014 Yutian $M_s7.3$ earthquake in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Acta

- Seismologica Sinica*, **36**(3): 522–528 (in Chinese).
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾斓. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质, **27**(3): 446–461.
- Xu X W, Zhang P Z, Wen X Z, Qin Z L, Chen G H, Zhu A L. 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviours of strong earthquakes in the western Sichuan Province and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, **27**(3): 446–461 (in Chinese).
- 尹光华, 蒋靖祥, 吴国栋. 2008. 2008年3月21日于田7.4级地震的构造背景[J]. 干旱区地理, **31**(4): 543–549.
- Yin G H, Jiang J X, Wu G D. 2008. Tectonic background of the $M_{S}7.4$ earthquake at Yutian on March 21, 2008[J]. *Arid Land Geography*, **31**(4): 543–549 (in Chinese).
- 张培震. 1999. 中国大陆岩石圈最新构造变动与地震灾害[J]. 第四纪研究, **19**(5): 404–413.
- Zhang P Z. 1999. Late Quaternary tectonic deformation and earthquake hazard in continental China[J]. *Quaternary Sciences*, **19**(5): 404–413 (in Chinese).
- 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: 1–64.
- Zhang X T. 2009. *Study on Pattern Informatics Method to Apply on Some Regions of China*[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration: 1–64 (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).
- 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. doi:10.1029/2005GL023991.
- 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.
- 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. 2006. Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(11/12): 2417–2432.
- Rundle J B, Klein W, Gross S J, Tiampo K F. 2000a. Dynamics of seismicity patterns in systems of earthquake faults[C]//*Geocomplexity and the Physics of Earthquakes: Vol. 120 of Geophys Monogr Ser.* Washington D C: AGU: 127–146.
- 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, neuro-biology, and forecasting[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, **99**: 2514–2521.
- 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.
- Wolfram S. 2002. *A New Kind of Science*[M]. Champaign, IL: Wolfram Media, Inc, 1197pp.
- Xu S X. 1989. Mark evaluation for earthquake prediction efficacy[G]//*Collected Papers of Research on Practical Methods of Earthquake Prediction: Volume of Seismology*. Beijing: Academic Books and Periodical Press: 586–590 (in Chinese).
- Zhang Y X, Zhang X T, Wu Y J, Yin X C. 2013. Retrospective study on the predictability of pattern informatics to the Wenchuan $M_{S}8.0$ and Yutian $M_{S}7.3$ earthquakes[J]. *Pure Appl Geophys*, **170**(1/2): 197–208.