

宋程, 张永仙, 夏彩韵, 张盛峰, 高冰莹, 郑世禄. 2018. 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. 地震学报, 40(4): 491–505. doi: 10.11939/jass.20170170.

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_w 9.0 earthquake. Acta Seismologica Sinica, 40(4): 491–505. doi: 10.11939/jass.20170170.

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*

宋 程^{1,2)} 张永仙^{3),†} 夏彩韵⁴⁾ 张盛峰^{5,6)}
高冰莹¹⁾ 郑世禄¹⁾

1) 中国天津 300201 天津市地震局

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

3) 中国北京 100045 中国地震台网中心

4) 中国沈阳 110034 辽宁省地震局

5) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

6) 中国济南 250014 山东省地震局

摘要 以日本局部地区(32.0°N—46.0°N, 136.0°E—148.0°E)为研究区域, 应用图像信息(PI)方法, 获得了不同计算参数模型下包含 2011 年 3 月 11 日日本东北 M_w 9.0 地震的多组预测窗热点图像. 以 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的网格尺度和 5—10 年预测窗长为主要参数变量, 并以 R 值和受试者工作特征(ROC)方法检验不同参数模型下 PI 方法的预测效能. 结果表明, 多组参数模型下 M_w 9.0 地震所在预测窗内, 其震中所在网格及其摩尔邻近网格均曾出现热点图像, 表明 PI 方法可对日本东北 M_w 9.0 地震作出预测. 综合 R 值评分和 ROC 检验分析可知, 网格尺度相对较大、预测窗长相对较长的模型, 其预测效果更好.

关键词 图像信息方法 地震热点 日本东北 M_w 9.0 地震 参数模型 回溯性检验
 R 值评分 ROC 检验

Retrospective test on the forecasting efficacy of PI models with different parameters for the Tohoku-Oki M_w 9.0 earthquake

Song Cheng^{1,2)} Zhang Yongxian^{3),†} Xia Caiyun⁴⁾ Zhang Shengfeng^{5,6)}
Gao Bingying¹⁾ Zheng Shilu¹⁾

1) Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China

2) Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3) China Earthquake Networks Center, China Earthquake Administration, Beijing 100045, China

4) Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, China

* 基金项目 国家自然科学基金面上项目(11672258)和中国地震台网中心青年科技基金课题(QNJJ201712)联合资助.

收稿日期 2017-09-04 收到初稿, 2017-12-12 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: yxzhseis@sina.com



5) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

6) Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China

Abstract: In this paper, the local area (32.0°N – 46.0°N , 136.0°E – 148.0°E) of Japan was chosen to be the studied region to verify the predictability of the pattern informatics (PI) method under different models with different parameters, using the receiver-operating characteristic (ROC) curve test and R score test. Pattern informatics (PI) method was applied to retrospective study on the forecasting of large earthquakes in this region, especially the 2011 Tohoku-Oki $M_{\text{W}}9.0$ earthquake. Different forecasting hotspot maps with different parameters were obtained. The grid size were $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ and $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$, and forecasting window length was 5 to 10 years respectively. The results showed that, PI method could forecast the Tohoku-Oki $M_{\text{W}}9.0$ earthquake under most of the models, and the hotspots appeared in $M_{\text{W}}9.0$ earthquake's epicentral grid or its Moore neighborhood grids. The ROC test and R score test analysis revealed that the forecasting effect was better for the models with larger grid size and longer window length compared to other models.

Key words: PI method; earthquake hotspot; Tohoku-Oki $M_{\text{W}}9.0$ earthquake; parameter model; retrospective test; R score test; ROC test

引言

2011年3月11日5时46分(UTC时间),日本东北部海域(西太平洋)发生了 $M_{\text{W}}9.0$ 地震(38.10°N , 142.86°E),其震中位于仙台市以东约130 km处的日本海沟附近(龚正, 许才军, 2015). 此次地震的破坏强度之大(刁法启等, 2012; 董治平等, 2012)、释放的能量之巨(李娟, 2015)、诱发的次生灾害之重引起了世界众多地震学家的重视,他们相继以不同的方法进行研究,以期寻找震前存在的前兆性异常. 例如,邢乐林等(2011)利用GRACE卫星月重力场模型提取日本东北 $M_{\text{W}}9.0$ 地震前的重力前兆信息,同时利用USGS发布的断层模型结合向上延拓技术计算理论同震重力变化,对结果进行比较分析后认为,GRACE卫星监测到的长期重力年变率与理论同震重力变化比较一致,可看作地震重力前兆信息;方颖和张艳梅(2012)应用聚类分析方法对日本东北 $M_{\text{W}}9.0$ 地震前的长波辐射进行分析,结果显示,在地震发生前半年,日本海沟一带几乎同时出现热异常和地壳垂直运动异常,这种非偶然现象是否与地震有关有待进一步探索;闫相相等(2013)利用相关数据研究了 $M_{\text{W}}9.0$ 地震前电离层的变化,分析表明在此次日本特大地震前观测到了明显的电离层扰动现象,从其时空分布来看,很有可能与地震孕育和发展的过程有关,但考虑到电离层扰动的复杂性,仍需作进一步分析. 从众多研究人员的研究结果中可以看出,日本 $M_{\text{W}}9.0$ 大地震前,在不同时空尺度内各类地球物理参数可能存在一定的前兆异常.

图像信息(pattern informatics, 简称为PI)方法作为一种具有良好前景的地震预测研究方法(陈建志等, 2013),近十几年来被用于不同地域的震例研究. 例如, Kawamura等(2013)应用PI方法对日本东北 $M_{\text{W}}9.0$ 地震的研究得到的结果表明,从2000年初至发震,“热点”(相对发震概率较高的网格)存在迁移现象——逐渐向 $M_{\text{W}}9.0$ 地震的震中靠近,但其热点图像并未持续出现在 $M_{\text{W}}9.0$ 地震的震中及其“摩尔邻近”网格(指包围在某一网格周围的8个网格,下文简称“邻近”(Moore, 1962; Wolfram, 2002)),分析可能的原因为,该文的研究区域范围(35.0°N – 43.0°N , 139.0°E – 144.0°E)相对较窄,研究时间(1980年1月1日以来的数据资料)

跨度较短, 网格尺度 ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 较小; 而 Zhang 等 (2013) 利用 PI 方法针对中国西部的 2008 年于田 $M_S 7.3$ 地震和汶川 $M_S 8.0$ 地震进行的地震危险性的回溯性预测研究表明, 对于较大地震, 选择较大的网格尺度和较长的预测时间窗能够获取相对较好的预测效果; 张小涛等 (2014) 在针对 2013 年芦山地震 (研究区域为 $21.0^\circ\text{N}—35.0^\circ\text{N}$, $97.0^\circ\text{E}—109.0^\circ\text{E}$) 进行研究时发现, 对于 $M \geq 7.0$ 的目标地震 (预测窗时段内发生的大于等于目标震级的地震), 网格尺度为 $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ 时的预测效果要优于 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 时的预测效果. 由此推断, 参数的选取不仅会直接影响 PI 方法的预测效果, 且对于中强震选取相对较大的网格尺度和较长的预测窗长可能会取得相对更好的预测效果.

日本东北 $M_W 9.0$ 这样罕见的特大地震, 若能提前预测, 则可最大程度地减少人民生命及财产的损失. 鉴于前人的研究中热点图像对于地震预测及预报的作用并不显著 (Kawamura *et al.*, 2013), 本文拟着重讨论预测窗长和网格尺度这两个主要参数对 PI 热点图像演化的影响. 采用日本气象厅地震目录资料, 对研究区域内 2000 年以来的目标地震进行不同参数模型下的中长期回溯性预测研究, 并以 R 值评分 (许绍燮, 1989; 石耀霖等, 2000) 和受试者工作特征 (receiver operating characteristic, 简称为 ROC) 方法定量检验 (Swets, 1973; Molchan, 1997) 来评价包含 $M_W 9.0$ 地震的多组预测窗的热点演化图像的预测效能, 以期获得对 $M_W 9.0$ 地震预测效果更优化的参数模型, 为今后的大震预测积累经验.

1 PI 方法简介

基于统计物理的图像信息 (PI) 方法, 自面世后曾被众多研究人员应用于世界范围内不同地震活动水平和不同构造环境下的震例研究. 这些震例除南加州外 (Holliday *et al.*, 2005, 2006, 2007), 还包括日本局部地区 (Nanjo *et al.*, 2006a, b; Kawamura *et al.*, 2013)、伊朗和意大利 (Radan *et al.*, 2013)、印度东北部 (Mohanty *et al.*, 2016); 中国大陆 (李志海, 黄瑜, 2010; Jiang, Wu, 2010; 孙丽娜等, 2012; Zhang *et al.*, 2013; 夏彩韵等, 2015; Zhang *et al.*, 2016) 和台湾 (Chen *et al.*, 2005) 等区域.

PI 方法实现过程的主要步骤为, 先将研究区域进行网格化, 使用截止震级 M_c (不小于完备性震级) 以上的地震目录, 对落入相应网格内的地震活动频度构建其时间序列, 最终用热点的形式表示出预测窗时段内可能发生目标地震 ($M \geq M_T$) 的位置. 截止震级 M_c 首先需不低于完备震级, 其次通常要至少小于“目标震级 M_T ”两个震级单位 (Holliday *et al.*, 2005, 2006). 将已有资料定义为 3 个时间段, 可参考图 1 中的时段划分. 图 1 中: t_0 为研究资料的起始时刻; 滑动变化的时间序列起始时刻为 t_b , t_b 以 Δt 为步长从 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 $[t_b, t_1]$, 考察时段为 $[t_1, t_2]$, 预测时段为 $[t_2, t_3]$. 背景参考时段要偏长一些, 且一般情况下取 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$. 对每个网格的地震频度时间序列进行时空归一化并计算其相对于背景值的偏离程度, 最后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 . 利用公式 $\lg(\Delta P_i / \Delta P_{\max})$ 对概率增益进行归一化处理, 获得地震热点图像. 根据 $\lg(\Delta P_i / \Delta P_{\max})$ 的下限值来确定热点的多少 (Holliday *et al.*, 2005; Nanjo *et al.*, 2006a; 蒋长胜等, 2009; Kawamura *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; 张小涛等, 2014), 具体算法公式如图 1 所示.

由上述步骤和图 1 中的公式可知, PI 算法是以背景参考时段为 $[t_b, t_1]$ 和考察时段为 $[t_1, t_2]$ 的地震目录数据计算得到预测时段 $[t_2, t_3]$ 内可能的发震位置 (即热点), 而目标地震是

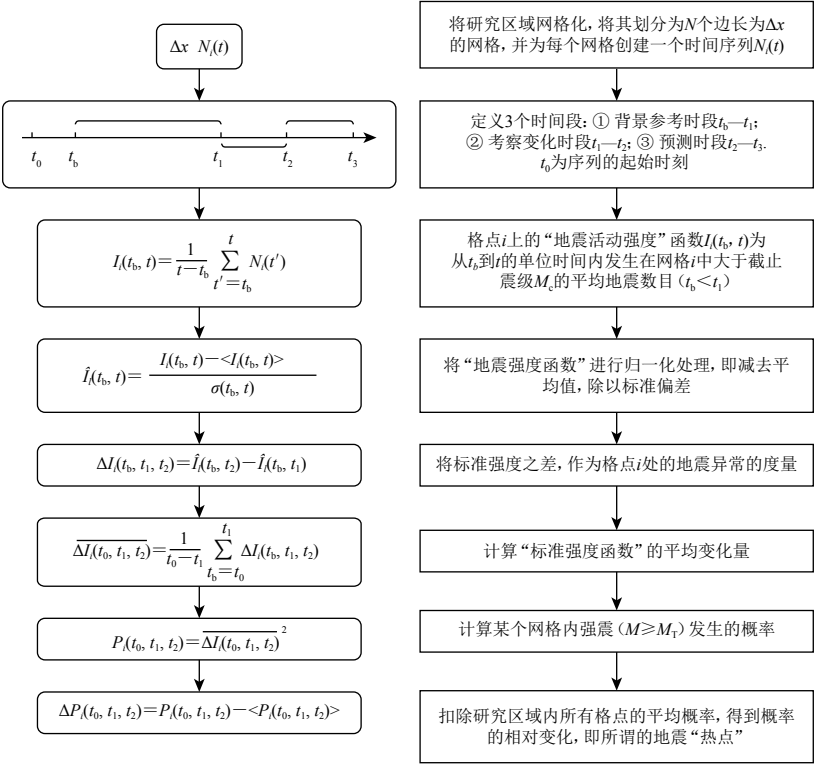


图 1 PI 算法及说明

Fig. 1 Annotation of the algorithm of PI

预测窗时段内的目录数据. 只有在预测时段过后, 根据预测时段内发生地震的实际情况, 方可进行回溯性检验研究.

2 研究资料及参数模型

2.1 研究区域及参数设定

日本东北 $M_w9.0$ 地震发生在宫城县海域 (38.10°N , 142.86°E), 该地区为太平洋板块与鄂霍茨克海板块等交汇区 (Apel et al, 2006; Ozawa et al, 2011) (图 2), 历史上曾发生过 1923 年 9 月 1 日东京 $M7.9$ 地震、1933 年 3 月 3 日本州岛北部三陆 $M8.1$ 地震及 1944 年 12 月 7 日中部太平洋海岸 $M7.9$ 地震等.

确定包含 $M_w9.0$ 地震的研究区域范围时, 要兼顾地震数目的充足性和数据资料的一致性. 对于内陆震例, 多数情况下即使研究范围较大, 也很少涉及国外领土, 因此能够保证计算中所使用地震目录的一致性. 日本是个有弧度的弧形岛国, 若研究范围选择的矩形较大, 覆盖了日本岛屿的同时也会涉及朝鲜半岛、韩国和中国东北的部分地区; 如果仅用日本地震台网的资料, 不能保证完全覆盖到外围国家地区的地震; 如果拼接日本台网和其它台网的数据资料, 其一致性又无法保证. 在此情形下, 相比于 Kawamura 等 (2013) 的文章, 本文所选定的范围 ($32.0^\circ\text{N} - 46.0^\circ\text{N}$, $136.0^\circ\text{E} - 148.0^\circ\text{E}$) 更为宽阔一些, 既保证了地震目录资料良好的一致性, 又使研究区域内具备充足的数据, 且 $M_w9.0$ 地震的发震位置基本处于研究区域的中心.

根据所获得的日本气象厅的地震目录进行粗略统计 (将其震级类别简写作 M_j), 自

1960年1月1日至2015年12月31日,该区域记录到的震源深度小于60 km的 $M \geq 4.0$ 浅源地震近2.7万次,其中最大地震为2011年3月11日的 $M_W9.0$ 地震。丰富的地震资料为基于地震活动性的PI方法的应用提供了充足的数据基础。

2.2 模型参数的设定

由图1可知,应用PI方法进行研究需要设定的参数有截止震级 M_c 、目标震级 M_T 、参与计算的地震事件的深度、阈值 $\lg(\Delta P_i/\Delta P_{\max})$ 、网格尺度 Δx 、滑动步长 Δt 以及3个时段的时长。

对于计算所用的截止震级 M_c ,首先应考察地震目录的完备性。由于地震目录资料的时间跨度较长,为了避免对早期地震目录完备性的判断有所偏差,故而分时段考察其G-R关系。以8年为一个时段,画图后发现7个时段的完备性震级均低于 $M5.0$,故取截止震级 $M_c=5.0$ 可最大限度地保证数据量充足且同时满足高于最小完备性震级的要求。因日本地区大震较多且重点研究对象为2011年 $M_W9.0$ 地震,故而目标地震的震级下限设定得相对较高, $M_T=7.4$,同时满足 $M_T \geq M_c + 2$ (Holliday et al, 2005)。将2000年后所发生的 $M \geq 7.4$ 地震绘于图2中,序号代表发震先后顺序,详细的地震参数列于表1。

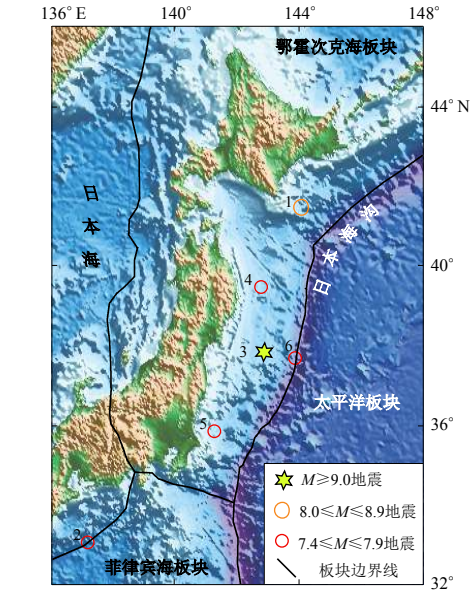


图2 日本东部构造背景及目标地震震中分布图
Fig. 2 Tectonic background and distribution of target earthquake epicenters in eastern Japan

表1 2000年以来研究区域内发生的 $M \geq 7.4$ 地震列表
Table 1 Earthquakes with $M \geq 7.4$ in the studied region since 2000

序号	发震时间(日本时间)	震中位置	北纬/ $^{\circ}$	东经/ $^{\circ}$	M_j
	年-月-日 时:分:秒				
1	2003-09-26 04:50:07	北海道以南近海	41.78	144.08	8.0
2	2004-09-05 23:57:17	近畿南岸近海	33.14	137.14	7.4
3	2011-03-11 14:46:18	宫城东部海域	38.10	142.86	9.0
4	2011-03-11 15:08:53	岩手东岸海域	39.82	142.77	7.4
5	2011-03-11 15:15:34	茨城日立近海	36.12	141.25	7.6
6	2011-03-11 15:25:44	日本海沟	37.91	144.75	7.5

注:表中震中位置的中文名称参考《世界地震目录》(宋治平等, 2011)。

Kawamura等(2013)在应用PI方法研究日本 $M_W9.0$ 地震时,基于定位误差、各态遍历性及孕震区的深度等综合因素对日本气象厅地震目录的质量进行考察后,确定了参与计算的地震事件深度为60 km。考虑到日本 $M_W9.0$ 地震为浅源地震,本研究舍弃深度大于60 km的中、深源地震,采用震源深度在60 km以内的地震事件参与计算。

参照前人的研究结果,选定经验阈值参数 $\lg(\Delta P_i/\Delta P_{\max})=-0.6$ (Zhang et al, 2013; 夏彩韵等, 2015)。

目标震级下限 $M_T7.4$ 、阈值下限-0.6,以及不同预测窗长等参数的选取具有一定的人为

经验性和主观性.

为了考察 $M_W9.0$ 东北大地震在不同参数模型下的回溯性预测效果, 在研究范围、截止震级、目标震级、参与计算的地震事件的深度、阈值及滑动步长不变的情况下, 改变网格尺度和预测窗长. 在研究区域确定的情况下, 本文预设网格尺度参数为 $0.5^\circ\times0.5^\circ$, $1.0^\circ\times1.0^\circ$, $2.0^\circ\times2.0^\circ$. 当网格尺度为 $2.0^\circ\times2.0^\circ$ 时, 研究区域被划分为 42 个网格, 网格数目相对较少, 不利于统计结果的稳定性, 预测效果欠佳, 故本文仅考察 $0.5^\circ\times0.5^\circ$ 和 $1.0^\circ\times1.0^\circ$ 网格尺度下不同预测窗长的热点图像效果. 针对不同网格尺度下的预测窗长, 参考前人 (Holliday *et al*, 2005; Zhang *et al*, 2013; 张小涛等, 2014) 的参数设置, 并且考虑到 $M_W9.0$ 地震的震级显著, 本文选取 5—10 年的预测窗长进行回溯性检验研究. 在此情况下, 设定 12 组参数模型 (表 2), 每个模型内设置 5 个预测窗 (均包含 $M_W9.0$ 地震), 由于相对最佳参数组合不确定, 因此需要画出包含 $M_W9.0$ 地震的多组预测窗热点图像.

表 2 模型参数设置
Table 2 Setting of the parameters used in models

模型序号	网格尺度	t_3-t_2/a	t_b 取值年份	t_1-t_b/a
1	$0.5^\circ\times0.5^\circ$	5	1986	16
2	$0.5^\circ\times0.5^\circ$	6	1982	18
3	$0.5^\circ\times0.5^\circ$	7	1978	20
4	$0.5^\circ\times0.5^\circ$	8	1974	22
5	$0.5^\circ\times0.5^\circ$	9	1970	24
6	$0.5^\circ\times0.5^\circ$	10	1966	26
7	$1.0^\circ\times1.0^\circ$	5	1986	16
8	$1.0^\circ\times1.0^\circ$	6	1982	18
9	$1.0^\circ\times1.0^\circ$	7	1978	20
10	$1.0^\circ\times1.0^\circ$	8	1974	22
11	$1.0^\circ\times1.0^\circ$	9	1970	24
12	$1.0^\circ\times1.0^\circ$	10	1966	26

3 计算结果及检验分析

3.1 以 $M_W9.0$ 地震为例说明热点与地震的关系

依据设定的参数模型, 获得 12 组不同参数模型下 (表 2), 预测时间段内的 PI 热点图像 (图 3), 并对不同预测窗内的热点情况进行统计和检验. 当热点出现在震中所在网格或其邻近网格时, 我们认为地震可以被“预测” (Moore, 1962; Wolfram, 2002). 限于篇幅, 此处仅以模型 4 和模型 10 的部分预测窗图像为例说明目标地震及热点的描述方式 (图 4).

图 4 为 8 年预测窗下两种网格尺度在 3 个连续预测窗口内的热点图像. 整体来看, $M_W9.0$ 地震在不同窗口中皆存在热点. 横向来看, 图 4a, b, c 为网格尺度 $0.5^\circ\times0.5^\circ$ 模型下的窗口图像且图中热点分布相对零散, 其中 b, c 窗口中 $M_W9.0$ 地震只在震中邻近网格存在热点. 相对图 4a, b, c, 图 4d, e, f 中热点的分布更为集中, 且绿色六角星所在震中网格始终存在发震概率较高的深色热点. 纵向来看, 同时段窗口下 $1.0^\circ\times1.0^\circ$ 网格尺度要比 $0.5^\circ\times0.5^\circ$ 网格尺度下虚报的热点要少. 但在 $M_W9.0$ 地震震中的西南方向, 目标地震周围无热点出现, 属于漏报. 每个模型不同预测窗的详细热点分布统计情况列于表 3. 为了定量地描述 PI 方法的预报效能, 需要进行定量检验.

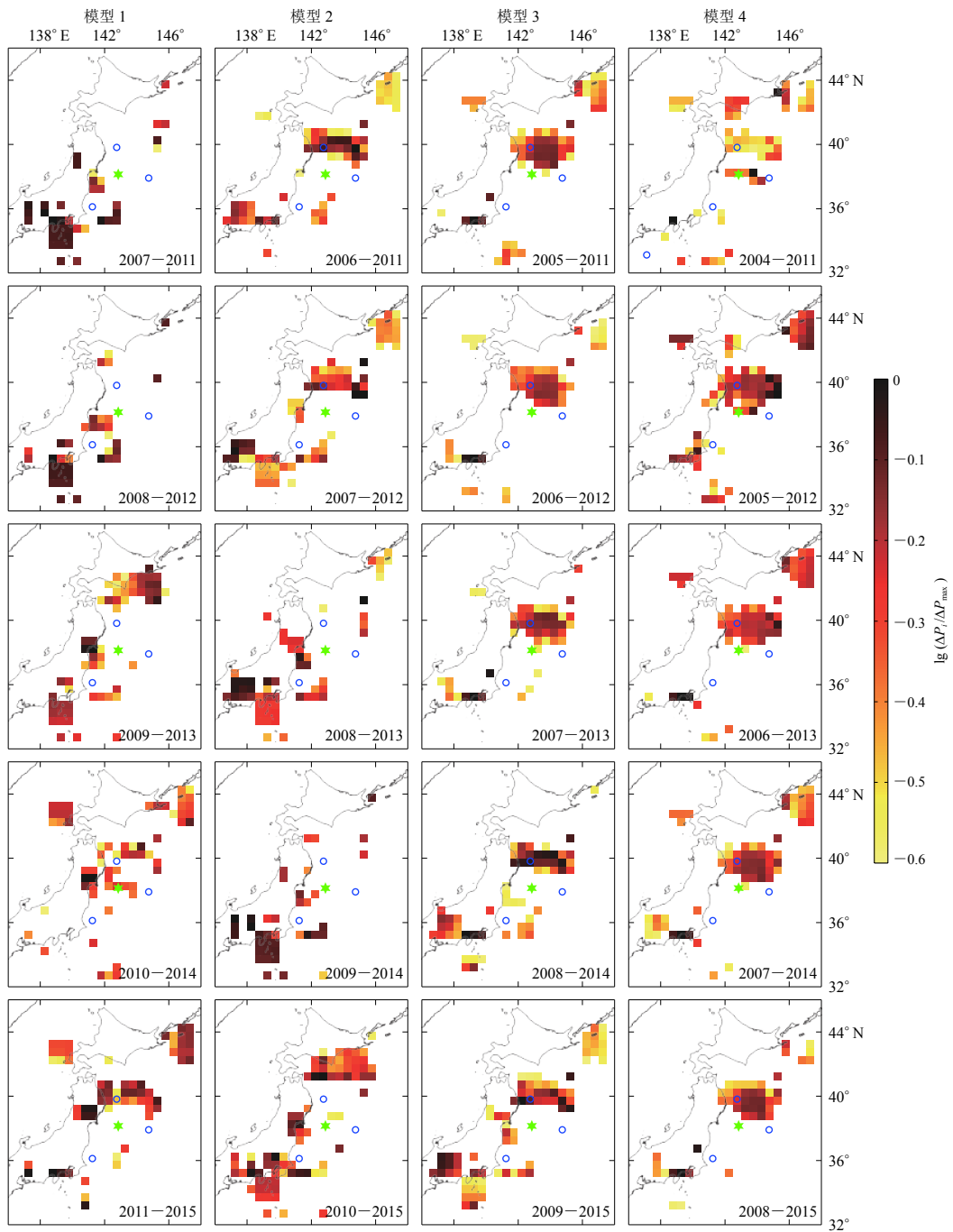


图 3 模型 1—12 的 PI 热点图像

蓝色空心圆圈表示预测时段内发生的 $M \geq 7.4$ 地震, $M_W9.0$ 地震以绿色星形表示, 色块为计算所得热点, 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, 每列对应同一模型下的 5 个窗口

Fig. 3 Hotspot maps of PI for model one to model twelve

Blue hollow circles represent the $M \geq 7.4$ earthquakes occurred in the forecasted window, and the $M_W9.0$ earthquake is the green star, warm boxes are calculated hotspots. Every forecasting window starts from 1 January in beginning year to 31 December in ending year. The five windows of every column belong to the same model

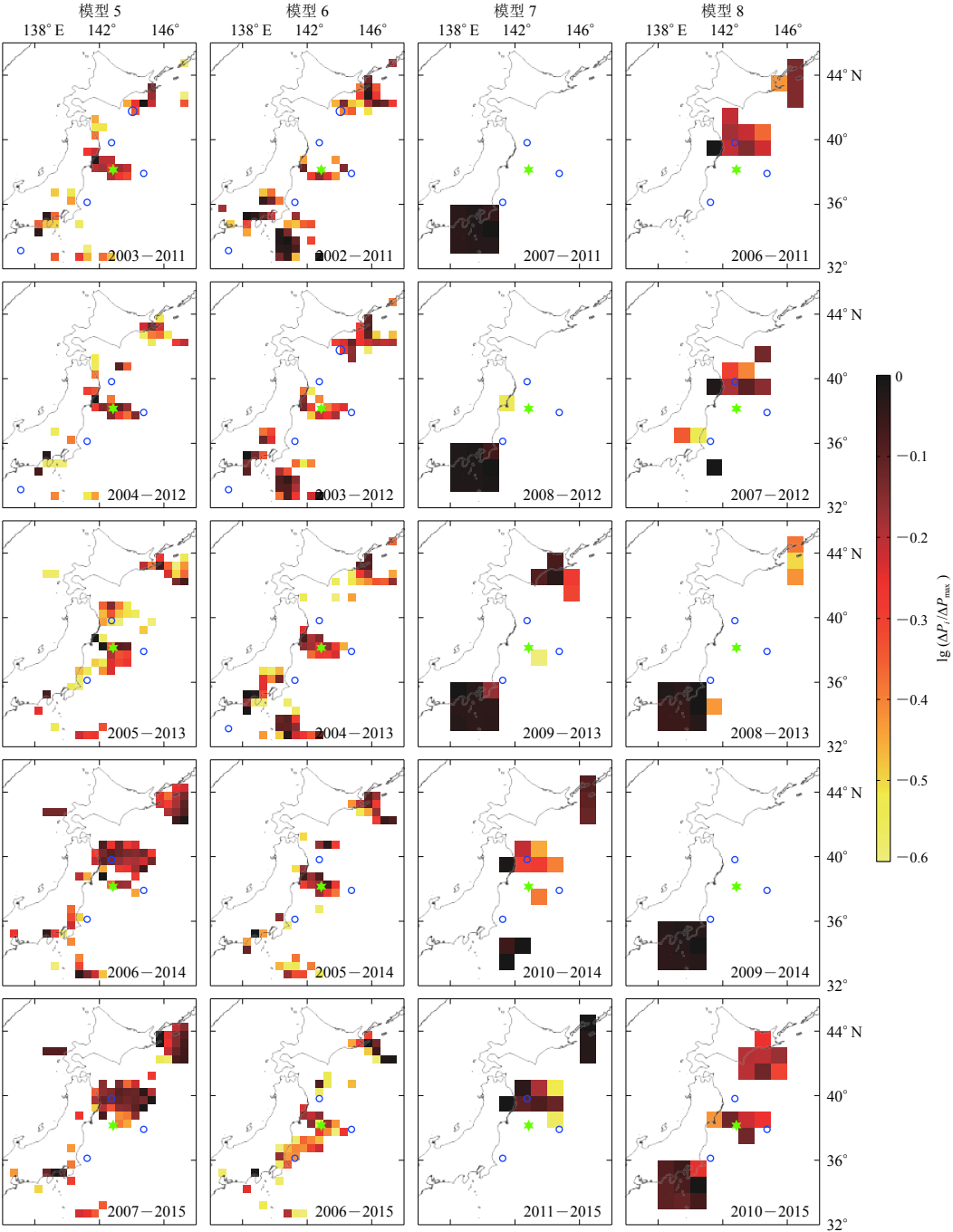


图 3 模型 1—12 的 PI 热点图像

蓝色空心圆圈表示预测窗时段内发生的 $M \geq 7.4$ 地震, $M_w 9.0$ 地震以绿色星形表示, 色块为计算所得热点, 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, 每列对应同一模型下的 5 个窗口

Fig. 3 Hotspot maps of PI for model one to model twelve

Blue hollow circles represent the $M \geq 7.4$ earthquakes occurred in the forecasted window, and the $M_w 9.0$ earthquake is the green star, warm boxes are calculated hotspots. Every forecasting window starts from 1 January in beginning year to 31 December in ending year. The five windows of every column belong to the same model

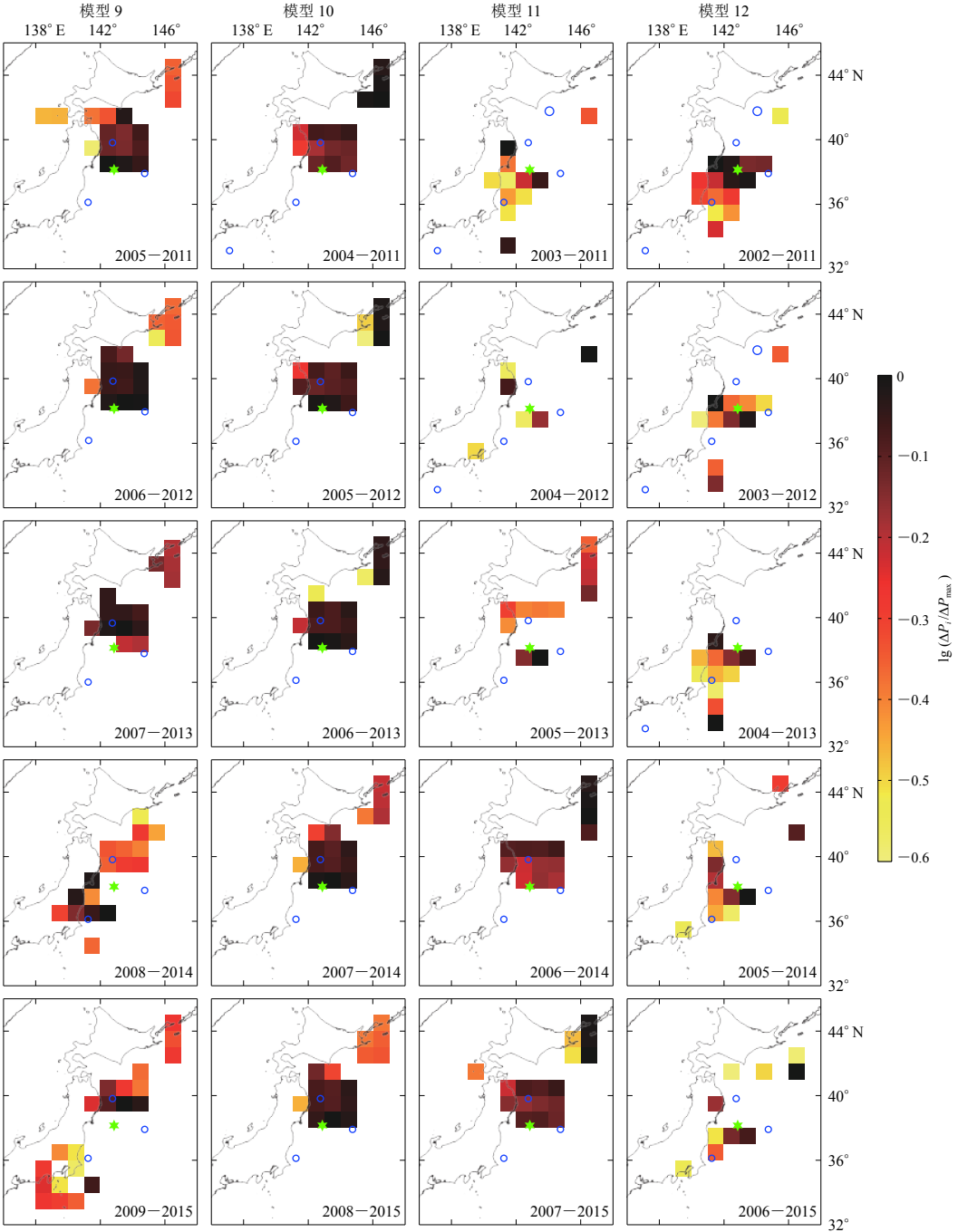


图 3 模型 1—12 的 PI 热点图像

蓝色空心圆圈表示预测窗时段内发生的 $M \geq 7.4$ 地震, $M_W9.0$ 地震以绿色星形表示, 色块为计算所得热点, 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, 每列对应同一模型下的 5 个窗口

Fig. 3 Hotspot maps of PI for model one to model twelve

Blue hollow circles represent the $M \geq 7.4$ earthquakes occurred in the forecasted window, and the $M_W9.0$ earthquake is the green star, warm boxes are calculated hotspots. Every forecasting window starts from 1 January in beginning year to 31 December in ending year. The five windows of every column belong to the same model

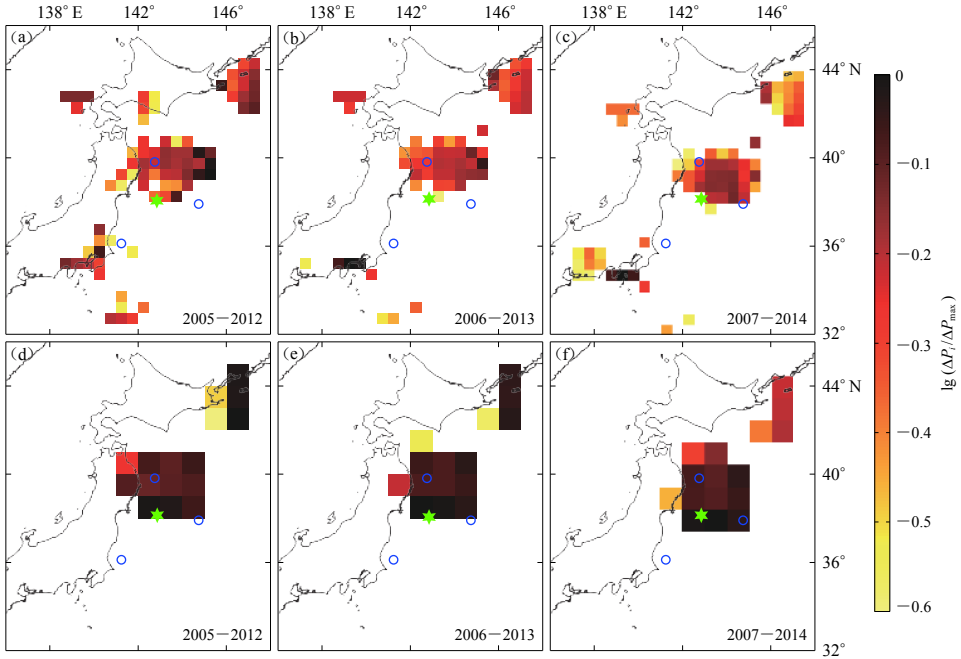


图 4 不同模型下 $M_w9.0$ 地震的 PI 热点图示例

(a)–(c)为模型 4 的结果, 网格尺寸为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; (d)–(f)为模型 10 的结果, 网格大小为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$

Fig. 4 Examples of hotspot map associated with the $M_w9.0$ earthquake under different models

(a)–(c) are the results calculated by model 4, and the grid size is $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; (d)–(f) are the results calculated by model 10, and the grid size is $1.0^\circ \times 1.0^\circ$

3.2 两种检验方法

参考前人对于 PI 方法在不同预测时间窗的预测效能检验(Holliday *et al*, 2005; 蒋长胜等, 2009; Zhang *et al*, 2013; 夏彩韵等, 2015), 本文采用 ROC 检验和 R 值评分方法进行统计检验.

3.2.1 ROC 检验

应用 PI 方法的多数研究人员均曾用 ROC 方法来检验其预报效能(Chen, Wu, 2006; Nanjo *et al*, 2006a; 蒋长胜等, 2009; Zhang *et al*, 2013). ROC 方法是在所设定的危险性概率阈值下, 通过变化每个预测窗口阈值的下限值 $\lg(\Delta P_i / \Delta P_{\max})$ 来获取不同概率阈值的热点图像, 之后根据 PI 预测图像上高于设定阈值 $\lg(\Delta P_i / \Delta P_{\max})$ 的“热点”及其它空白格点与预测时段内发生的目标地震的对应, 统计预测的“报准率”和“虚报率”来评估计算方法的预测效能. 以“虚报率”为横坐标、“报准率”为纵坐标绘制 ROC 曲线, 对角虚线表示报准率和虚报率均为 50%, 为随机预测结果.

“报准率”是预报“有震”且实际发震的空间网格数与实际发震总网格数的比值; “虚报率”是预报“有震”而实际无震的空间网格数与实际未发震总网格数的比值(Holliday *et al*, 2005). 在回溯性预测时段内, 统计“报准率”时考虑到实际地震监测中存在的定位误差等, 地震发生在“热点”及其周边 8 个格点内均被认定为“报准”, 只有当“报准率”高于“虚报率”时才表明 PI 方法的预测效果优于随机预测的结果.

表 3 包含 $M_W9.0$ 地震的各组模型预测窗的检验值统计

Table 3 Test values of R and ROC for the forecast windows containing the $M_W9.0$ earthquake under different models

模型序号	预测窗时段	E	M	ROC(E_f)	R 值	模型序号	预测窗时段	E	M	ROC(E_f)	R 值
1	2007–2011	否	否	0.349	−0.058	7	2007–2011	否	否	0.416	−0.055
	2008–2012	否	是	0.401	−0.055		2008–2012	否	是	0.425	−0.061
	2009–2013	否	否	0.356	−0.090		2009–2013	否	是	0.394	−0.091
	2010–2014	是	是	0.380	0.159		2010–2014	否	是	0.455	0.177
	2011–2015	否	否	0.357	0.154		2011–2015	否	是	0.446	0.189
2	2006–2011	否	否	0.163	0.154	8	2006–2011	否	是	0.444	0.183
	2007–2012	否	否	0.159	0.139		2007–2012	否	是	0.427	0.195
	2008–2013	否	否	0.145	−0.085		2008–2013	否	否	0.405	−0.079
	2009–2014	否	是	0.175	−0.058		2009–2014	否	否	0.425	−0.055
	2010–2015	否	是	0.360	−0.118		2010–2015	是	是	0.420	0.128
3	2005–2011	否	是	0.404	0.157	9	2005–2011	是	是	0.461	0.402
	2006–2012	否	是	0.373	0.171		2006–2012	是	是	0.470	0.409
	2007–2013	否	是	0.352	0.180		2007–2013	否	是	0.444	0.171
	2008–2014	否	否	0.326	0.157		2008–2014	否	是	0.457	0.409
	2009–2015	否	否	0.167	0.135		2009–2015	否	是	0.407	0.128
4	2004–2011	是	是	0.267	0.316	10	2004–2011	是	是	0.406	0.320
	2005–2012	是	是	0.405	0.386		2005–2012	是	是	0.457	0.415
	2006–2013	否	是	0.398	0.162		2006–2013	是	是	0.461	0.421
	2007–2014	否	是	0.400	0.151		2007–2014	是	是	0.470	0.415
	2008–2015	否	是	0.398	0.180		2008–2015	是	是	0.470	0.409
5	2003–2011	是	是	0.275	0.272	11	2003–2011	否	是	0.462	0.105
	2004–2012	是	是	0.244	0.143		2004–2012	否	是	0.483	−0.037
	2005–2013	是	是	0.434	0.418		2005–2013	否	是	0.497	−0.067
	2006–2014	是	是	0.444	0.401		2006–2014	是	是	0.431	0.421
	2007–2015	否	是	0.412	0.151		2007–2015	是	是	0.438	0.409
6	2002–2011	否	是	0.258	0.081	12	2002–2011	是	是	0.464	0.253
	2003–2012	否	是	0.267	0.084		2003–2012	是	是	0.474	0.105
	2004–2013	是	是	0.219	0.110		2004–2013	否	是	0.457	0.139
	2005–2014	是	是	0.420	0.184		2005–2014	否	是	0.500	0.189
	2006–2015	是	是	0.463	0.428		2006–2015	否	是	0.500	0.195

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。E 和 M 分别表示 $M_W9.0$ 地震的震中网格和摩尔邻近网格。研究资料的截止时间为 2015 年 12 月 31 日, 所以仅对有效部分的预测窗进行回溯性检验。

为了定量地对比各参数模型下的预测效果, 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(红色)与随机预测虚线(黑色)所包络的面积(红色折线位于虚线以上, 面积取正; 位于虚线以下, 面积取负)定义为有效预测系数 E_f , 则当 E_f 的值越大, PI 方法的预测效果越好。由多组参数模型的实际检验结果可以看出, PI 方法的预测效能明显优于随机预测。此处仅以图 5 为例展示 ROC 检验的曲线图, 其对应 E_f 面积为 0.267。每组参数模型下不同预测窗的 E_f 值列于表 3。在表 3 中, 模型 12 的最后两个窗口(2005—2014 年, 2006—2015 年), 其 E_f 面积为 0.5, 意味着窗口内所有目标地震, 至少其邻近网格是存在热点的。

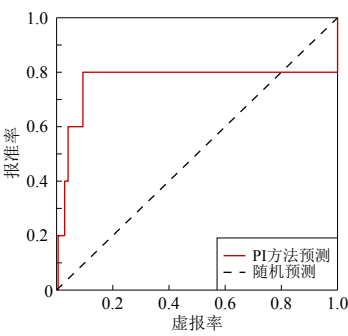


图 5 模型 4 (2004—2011 年预测窗口)的 ROC 曲线检验图
Fig. 5 ROC test under the model 4 (2004–2011 forecasting window)

3.2.2 R 值评分

R 值评分最初由许绍燮(1989)提出, 用来评价地震预报效能, 其物理含义是, 报准率减去虚报率. R 值越大表明预测的效果越好(石耀霖等, 2000). 在 R 值计算中, 我们认为, 只有当震中所在网格存在热点才属于有震报准的情况. 在前人的计算中, 报准率通常是指报准的地震数与实际发生地震数的比值(石耀霖等, 2000; 罗兰格, 2004; 马宏生等, 2004; 屠泓为等, 2007), 故而本文中 R 值的报准率是用每个预测窗内有地震发生的热点格数除以实际发震的总网格数(若某些预测窗内出现几次地震的震中落入一个热点网格的情况, 此时按照报准一个热点网格数来计算, 而不是报准多个地震数来计算). 虚报率的计算方式则是未发震的热点格数除以实际未发震的网格总数. 以图 4d 为例说明其计算过程. 在 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格尺度下研究区域被划分为 168 个网格, 图 4d 中共有 16 个热点, 4 次地震的震中分布于 4 个不同的网格, 其中有两次地震的震中所在网格有热点, 另外 14 个热点网格内无地震, R 值的计算方法为

$$R = \frac{\text{预报发震且实际发震网格数}}{\text{实际发震所占的网格总数}} - \frac{\text{预报有震而实际无震的网格数}}{\text{实际未发震的网格总数}}, \quad (1)$$

针对图 4d, $R = 2/4 - 14/(168 - 4) = 0.415 > 0$, 表明预测效果良好.

3.3 $M_w 9.0$ 大地震的较好预测模型

表 3 中统计了 12 组参数模型下每个预测窗内目标地震的热点分布情况和两种检验方法得到的具体数值, 经分析认为数据具有以下 5 方面特点: ① 当预测窗长较长时, 模型 4—6 和 9—12 的所有预测窗中 $M_w 9.0$ 地震的邻近网格存在热点; ② 经过 ROC 检验, 网格尺度为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的参数模型的检验值明显优于 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 参数模型的检验值, 且在连续滑动窗内更为稳定, 当预测窗长相等时, 绝大多数情况下同一预测窗在网格较大时其 E_f 值明显大于网格较小的情况; ③ 当预测窗长加长, $R < 0$ 的情况越来越少, 模型 4—6 和 9, 10, 12 的多个预测窗的 R 值皆大于 0, 而模型 11 中也只有 2004—2012 年和 2005—2013 年两个窗口的 R 值小于 0; ④ 对于单个预测窗而言, ROC 检验值大并不代表 R 值评分也高; ⑤ 从定性和定量两方面综合来看, 我们认为在众多包含 $M_w 9.0$ 地震的预测窗模型中第 10 组参数模型的整体预测效果最好, 就单个预测窗而言, 认为模型 10 (预测窗长为 8 年, 网格尺度为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$) 的 2006—2013 年窗口的预测效果相对最佳.

4 讨论与结论

作为主要应用于中长期预测研究的 PI 方法, 在对震例进行回溯性预测研究时, PI 预测窗热点图中所反映的信息是未来时段内可能的发震(热点)位置和发震时段(预测窗时段内), 而并非具体的发震时间和震级(Nanjo *et al.*, 2006b). 在预测时段实际发生地震后, 才能进行回溯性检验, 具有阶段性参考价值.

需要指出的是, 本文所使用的地震目录并未进行余震删除以及重定位等操作. 鉴于 PI 方法对于大量事件的地震目录的定位误差并不敏感, 其算法表现的稳定性与基于各态遍历性的地震丛集活动不变性相关(Cho, Tiampo, 2012), 故而未对地震目录作重定位等处理. 2011 年日本东北大地震主震极大, 其前震和余震震级高达 $M7.0$ 以上(Hirose *et al.*, 2011; 龚正, 许才军, 2015), 同时也是目标地震. 本文中的回溯性研究并未删除余震, 原因如下: ① 在前人的研究中并未特意强调删除余震, 且其研究效果较好(Holliday *et al.*, 2005); ② 余震

也是构成一次地震活动区域强时空关联行为的一个重要组成部分(Nanjo *et al.*, 2006a), 有助于研究局部区域地震活动性的特点; ③ 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)。

与 Kawamura 等(2013)的研究结果相比, 由于计算参数的差异性, 本文的热点图中, 在不同参数模型下, $M_w9.0$ 地震震中或其邻近网格皆有热点出现, 且相比于其它目标地震, $M_w9.0$ 地震的“热点密集区”相对更为持久和显著, 发震概率更高, 对于预测地震有一定的指示意义。从连续预测窗热点图像的演化效果上来说, 不同预测窗的热点图像包含了整个研究区域的“热点”信息, 随着预测窗的推移体现了不同孕震时段内地震活动性的一种变化趋势, 更接近于发震震中, 也更有利于地震预报。从对震例的检验结果来看, PI 方法对于大震的中长期预测效果较好, 且明显优于随机预测, 这与前人的研究结果相同(蒋长胜等, 2009; Zhang *et al.*, 2013; 夏彩韵等, 2015), 同时辩证地印证了在大地震的中长期预测中采用相对较大的网格尺度和较长的预测窗长能提高其预测效能。但是即使是预测效果相对更佳的模型, 也会存在“虚报”和“漏报”的现象, 这也是地震预报至今无法攻破的一大难关。

两位匿名审稿人在稿件撰写过程中提出了宝贵的意见和建议, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 陈建志, Rundle J B, Turcotte D L, 尹祥础. 2013. 从临界转变的角度理解地震预测技术[J]. *物理*, **42**(5): 329–333.
- Chen J Z, Rundle J B, Turcotte D L, Yin X C. 2013. Theory of critical transitions helps understand seismicity-based earthquake forecasting techniques[J]. *Physics*, **42**(5): 329–333 (in Chinese).
- 刁法启, 熊熊, 郑勇. 2012. $M_w9.0$ 日本 Tohoku 大地震静态位错模型: 陆地 GPS 资料和海底 GPS/Acoustic 资料联合反演的结果[J]. *科学通报*, **57**(18): 1676–1683.
- Diao F Q, Xiong X, Zheng Y. 2012. Static slip model of the $M_w9.0$ Tohoku (Japan) earthquake: Results from joint inversion of terrestrial GPS data and seafloor GPS/acoustic data[J]. *Chinese Science Bulletin*, **57**(16): 1990–1997.
- 董治平, 程建武, 郭桂红. 2012. 日本 9 级大地震及其对中国强震活动的影响[J]. *内陆地震*, **26**(1): 1–9.
- Dong Z P, Cheng J W, Guo G H. 2012. $M_s9.0$ earthquake in Japan and its influence on strong earthquake activity in China[J]. *Inland Earthquake*, **26**(1): 1–9 (in Chinese).
- 方颖, 张艳梅. 2012. 日本 9.0 级大地震前长波辐射异常研究[J]. *地球物理学报*, **55**(8): 2620–2624.
- Fang Y, Zhang Y M. 2012. Study of long-wave radiation anomalies before the Japan $M_w9.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(8): 2620–2624 (in Chinese).
- 龚正, 许才军. 2015. 2011 日本东北大地震前震余震重力效应分析[J]. *测绘科学*, **40**(12): 59–62.
- Gong Z, Xu C J. 2015. Study on coseismic gravity changes of foreshock and aftershocks of 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. *Science of Surveying and Mapping*, **40**(12): 59–62 (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-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).
- 李娟. 2015. 这些年, 不遥远的地震[J]. *科学*, **67**(1): 53–56.
- Li J. 2015. Over the years, the earthquakes not so distant[J]. *Science*, **67**(1): 53–56 (in Chinese).
- 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.
- Li Z H, Huang Y. 2010. Retrospective forecast test of PI algorithm in Xindu Kush versus Pamir versus middle and southern region of Xinjiang[J]. *Inland Earthquake*, **24**(3): 208–214 (in Chinese).
- 罗兰格. 2004. R 值评分方法的再研究[J]. *华北地震科学*, **22**(2): 1–5.
- Luo L G. 2004. Restudy on the method of scoring with R value[J]. *North China Earthquake Sciences*, **22**(2): 1–5 (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).
- 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).
- 宋治平, 张国民, 刘杰, 尹继尧, 薛艳, 宋先月. 2011. 全球地震目录(9999 BC—1963 AD $M \geq 5.0$; 1964 AD—2010 AD $M \geq 6.0$)[M]. 北京: 地震出版社: 419–435.
- Song Z P, Zhang G M, Liu J, Yin J Y, Xue Y, Song X Y. 2011. *Global Earthquake Catalogue* (9999 BC–1963 AD $M \geq 5.0$; 1964 AD–2010 AD $M \geq 6.0$)[M]. Beijing: Seismological Press: 419–435 (in Chinese).
- 孙丽娜, 齐玉妍, 温超, 张合. 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.
- Sun L N, Qi Y Y, Wen C, Zhang H. 2012. Application of improved PI algorithm in medium to long-term earthquake prediction[J]. *Earthquake*, **32**(4): 44–52 (in Chinese).
- 屠泓为, 陆广海, 孙洪斌. 2007. 用 R 值评分法研究青海省 1990—2006 年以来的地震预报效能[J]. 高原地震, **19**(3): 13–16.
- Tu H W, Lu G H, Sun H B. 2007. Research on earthquake prediction efficiency in Qinghai during 1990–2006 based on R -value[J]. *Plateau Earthquake Research*, **19**(3): 13–16 (in Chinese).
- 夏彩韵, 张永仙, 张小涛, 吴永加. 2015. 利用两次新疆于田 $M_{\text{S}}7.3$ 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.
- 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[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(2): 312–322 (in Chinese).
- 邢乐林, 李辉, 玄松柏, 汪健. 2011. GRACE 卫星观测到的日本 9.0 级大地震重力前兆信息[J]. 大地测量与地球动力学, **31**(2): 1–3.
- Xing L L, Li H, Xuan S B, Wang J. 2011. Gravity caused by $M_{\text{S}}9.0$ strong earthquake in Japan precursor detected by GRACE[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **31**(2): 1–3 (in Chinese).
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分[G]//地震预报方法实用化研究文集: 地震学专辑. 北京: 学术书刊出版社: 586–589.
- 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).
- 闫相相, 单新建, 曹晋滨, 汤吉, 王飞飞. 2013. 日本 $M_{\text{W}}9.0$ 级特大地震前电离层扰动初步分析[J]. 地球物理学进展, **28**(1): 155–164.
- Yan X X, Shan X J, Cao J B, Tang J, Wang F F. 2013. Preliminary study of the seismoionospheric perturbation before Tohoku-Oki $M_{\text{W}}9.0$ earthquake[J]. *Progress in Geophysics*, **28**(1): 155–164 (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 $M_{\text{S}}7.0$ 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 $M_{\text{S}}7.0$ earthquake by the pattern informatics method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(5): 780–789 (in Chinese).
- Apel E V, Bürgmann R, Steblov G, Vasilenko N, King R, Prytkov A. 2006. Independent active microplate tectonics of north-east Asia from GPS velocities and block modeling[J]. *Geophys Res Lett*, **33**(11): L11303.
- 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, Wu Y M. 2006. An improved region-time-length algorithm applied to the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake[J]. *Geophys J Int*, **166**(3): 1144–1148.
- Cho N F, Tiampo K F. 2012. Effects of location errors in pattern informatics[J]. *Pure Appl Geophys*, **170**(1/2): 185–196.
- Hirose F, Miyaoka K, Hayashimoto N, Yamazaki T, Nakamura N. 2011. Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake ($M_{\text{W}}9.0$): Seismicity: Foreshocks, mainshock, aftershocks and induced activity[J]. *Earth Planets Space*, **63**(7): 513–518.

- Holliday J R, Nanjo K Z, Tiampo K F, Rundle J B, Turcotte D L. 2005. Earthquake forecasting and its verification[J]. *Nonl Proc 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 ($M \geq 5$) earthquake events in southern California[J]. *Pure Appl Geophys*, **12**(11/12): 2433–2454.
- Holliday J R, Chen C C, Tiampo K F, Rundle J B, Turcotte D L, Donnellan A. 2007. A RELM earthquake forecast based on pattern informatics[J]. *Seismol Res Lett*, **78**(1): 87–93.
- 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 Appl Geophys*, **167**(6/7): 751–761.
- Kawamura M, Wu Y H, Kudo T, Chen C C. 2013. Precursory migration of anomalous seismic activity revealed by the pattern informatics method: A case study of the 2011 Tohoku earthquake, Japan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(2B): 1171–1180.
- 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]. *Geomat, 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.
- Moore E F. 1962. Machine models of self-reproduction[J]. *Proc Symp Appl Math*, **14**: 17–33.
- Nanjo K Z, Holliday J R, Chen C C, Rundle J B, Turcotte D L. 2006a. 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.
- Nanjo K Z, Rundle J B, Holliday J R, Turcotte D L. 2006b. Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(11/12): 2417–2432.
- Ozawa S, Nishimura T, Suito H, Kobayashi T, Tobita M, Imakiire T. 2011. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake[J]. *Nature*, **475**(7356): 373–376.
- 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.
- Swets J A. 1973. The relative operating characteristic in psychology[J]. *Science*, **182**(4116): 990–1000.
- Wolfram S. 2002. *A New Kind of Science*[M]. Champaign: Wolfram Media Inc: 176–177.
- Zhang S F, Wu Z L, Jiang C S. 2016. The central China north-south seismic belt: Seismicity, ergodicity, and five-year PI forecast in testing[J]. *Pure Appl Geophys*, **173**(1): 245–254.
- Zhang Y X, Zhang X T, Wu Y J, Yin X C. 2013. Retrospective study on the predictability of pattern informatics to the Wenchuan $M 8.0$ and Yutian $M 7.3$ earthquakes[J]. *Pure Appl Geophys*, **170**(1/2): 197–208.