

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

蒋卉[†] 吴忠良 马腾飞 蒋长胜
(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

2013-04-28收到

[†] Email: zuoanyi2007@126.com

DOI: 10.7693/wl20130504

Retrospective test of the PI forecast: case study of the April 20, 2013, Lushan, Sichuan, China, $M_s7.0$ earth- quake

JIANG Hui WU Zhong-Liang MA Teng-Fei JIANG Chang-Sheng
(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

摘要 文章针对中强地震预测的图像信息学(PI)算法,对2013年4月20日芦山 $M_s7.0$ 地震的预测效果进行了回溯性震例分析。结果表明,在芦山地震的震中附近存在“PI热点”。在与2008年汶川地震的PI算法预测进行比较后建议,在以后的“PI热点”计算中,也许还应把背景形变速率作为一个权重因素考虑在内。

关键词 地震预测, PI算法, 芦山地震, 地震统计物理

Abstract Forecast of the intermediate-to-strong earthquakes based on the Pattern Informatics (PI) algorithm was tested against the April 20, 2013, Lushan, Sichuan, China, $M_s7.0$ earthquake. It is shown that the PI hotspots distribute around the epicenter of the Lushan earthquake. Comparison between the PI forecast of the 2008 Wenchuan earthquake and the 2013 Lushan earthquake suggests the importance of background deformation/strain rate in the PI forecast.

Keywords earthquake forecast, PI algorithm, Lushan earthquake, statistical physics of earthquakes

2013年4月20日发生的四川芦山 $M_s7.0$ 地震¹⁾,使对基于统计物理的“图像信息学”算法(PI算法,海峡对岸的同行译作“震模资讯算法”)的预测检验成为一项有意义的工作。关于PI算法的物理图像和统计物理基础,在本期发表的陈建志等的文章中已有详细介绍^[1]。该算法曾用于不同地震活动水平、不同地质构造环境的地区^[2-5]。近年来,还对算法本身进行了多方面的讨论和改进^[6,7]。本文试图回溯性地检验PI算法对这次芦山地震的预测效果。

1 PI算法所用资料和基本参数设置

关于PI算法^[1-5]和川滇地区的地震活动与地质构造的背景情况^[9],此处不赘述。本文的PI算法参数设置如下:检验区范围 20.8° — 34.0° N, 97.2° — 107.0° E,含川滇两省及其邻近地区。所用地震目录为中国地震台网中心提供的1970年1月—2012年5月的《中国地震月报目录》,图1(a)给出了其中3.0级以上地震的分布。图1(b)给出了震级—频度关系

(即物理学家熟悉的带有尺度不变性质的Gutenberg—Richter定律^[8]),通过对标准的线性对数关系(GR关系)的偏离情况,可以看到,直到3.0级(甚至以下的)地震,地震目录仍是完整的。此处PI算法的“目标震级”选定为 $M_s5.5$ ，“目标地震”的目录亦由中国地震台网中心²⁾提供。全区分成 $0.2^{\circ}\times 0.2^{\circ}$ 的网格,所用地震目录的最低震级取作3.0级。沿袭传统做法^[9],只考虑浅源地震(震源深度小于70km),且不对地震目录进行去丛处理(即不区分主震和余震)。图1(c)给出了“异常学习时段”、“异常识别时段”、“预测时段”的定义。

图2(a)给出了一个预测的实例。从这个预测实例可以看出,PI算法实际上是在一个15年的时间范围内,通过多时间尺度的比较,识别近5年的地震活动异常,来预测未来5年的强地震发生的可能地点(即所谓的“PI热点”)。例如图2中的例子,就是在选取1977年1月1日到1982年1月1日的多个滑动时间为起点,分别与1987年1月1日和1992年1月1日为终点的时间组合中“学习异常”,在1987年1月1日到1992年1月1日的地震活动中

1) <http://www.cea-igp.ac.cn/jjxcdsxj/266815.shtml>

2) <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm>

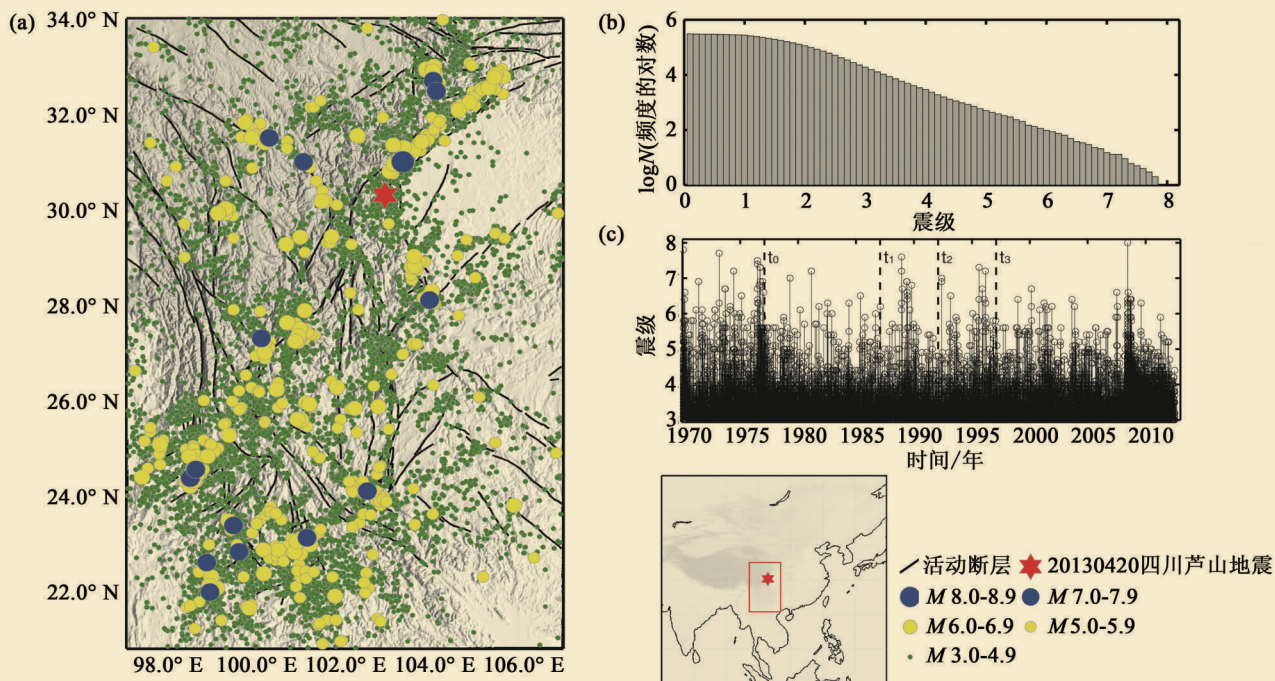


图1 1970年1月1日至2012年6月1日川滇地区地震活动 (a)地震的空间分布, 底图为川滇地区的活动构造 (注意其中由蓝色圆点表示的7级以上地震的位置仅表示地震破裂的起始点, 而不能代表地震的震源。) 红色六角星为2013年4月20日芦山地震(北纬 30.3° , 东经 103.0°)。右下侧子图红色实线框内为本研究区域(北纬 20.8° — 34.0° , 东经 97.2° — 107.0°)；(b)震级—频度图(即不小于某个震级的地震的累积数)；(c)震级—时间分布图, 图中4条虚线分别表示PI算法所用的关键时间结点。其中“异常学习时段”从 t_0 到 t_1 ，“异常识别时段”从 t_1 到 t_2 ，“预测时段”从 t_2 到 t_3 ，“预测时段”经验性地选作与“异常识别时段”相同。此处所表示的PI算法的分析是以1977年1月1日到1982年1月1日的多个滑动时间为起点, 分别与1987年1月1日和1992年1月1日为终点的时间组合, 以此为基础在1987年1月1日到1992年1月1日期间的“识别异常”, 以预测1992年1月1日到1997年1月1日期间的“目标地震”。预测结果与实际发生的“目标地震”的对比见图2

“识别异常”, 以预测1992年1月1日到1997年1月1日的“目标地震”。

地震预测检验的一个基本问题, 是要论证所用算法的预测效果显著优于随机预测的效果。为此采用ROC检验的方法^[2], 如图2(b)所示, 其基本精神是, 既要考虑“命中率”(如图中纵坐标所示), 同时也要考虑虚报率(如横坐标所示)。在ROC检验中, 随机预测对应于以“命中率”为纵坐标, 以虚报率为横坐标的“ROC图”上的对角线。有意义的预测, 其ROC曲线必须处在对角线的上方。图2(b)表明, 对图2(a)所示的预测, PI算法的预测效果显著优于随机预测。不仅如此, 图中还给出了用于比较的RI算法(“相对强度”算法)的预测

效果。RI算法简单地以小地震活动强的地区作为未来地震的危险区, 即把所谓“小震闹、大震到”的经验推广到5年尺度并进行量化。从图2可以看出, PI算法不仅显著地优于随机预测, 而且与简单的RI算法相比也有明显优势。究其原因, 是因为PI算法综合性地考虑了地震活动的涨落, 而不仅仅是地震的活跃^[10]。这体现了统计物理的概念用于地震分析的一个优势。

2 关于2008年汶川地震的预测

标准的PI算法^[2]未能给出2008年汶川地震所对应的“热点”。我们曾对此进行分析^[11], 指出如果将所用地震目录的震级

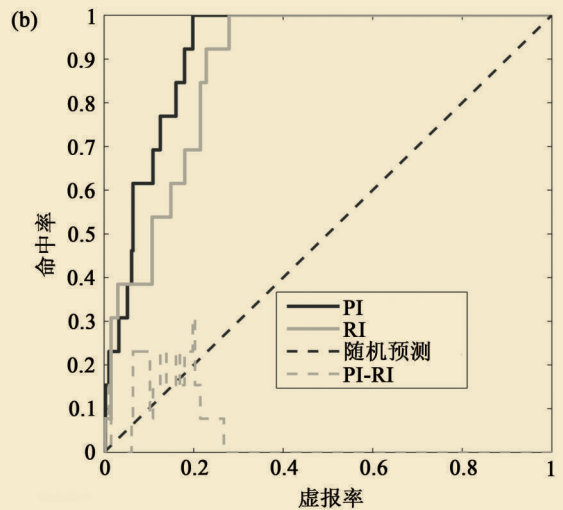
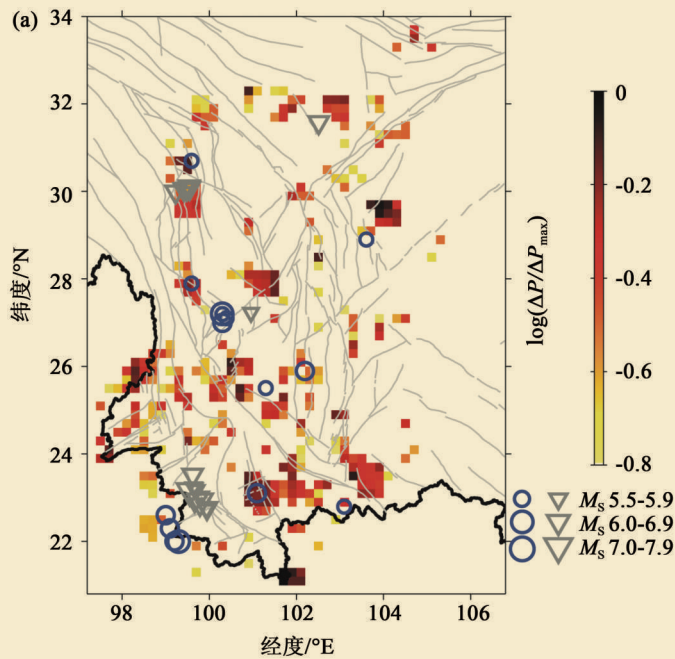


图2 (a) PI算法预测示例。预测时段为1992年1月1日至1997年1月1日。“目标地震”为川滇地区5.5级以上地震，如图中蓝色圆圈所示。PI算法的“热点”由图中暖色色块表示。灰色倒三角标出地震活动“异常识别时段”内发生的5.5级以上地震，注意其与“预测时段”内“目标地震”的分布的显著区别。(b)对图2(a)所示的PI算法预测效果的统计检验(ROC检验)。图中对角线(虚线)为随机预测的结果。黑色折线表示PI算法的预测结果，灰色折线对应于作为比较的RI算法，灰色虚线为PI算法相对于RI算法预测的“命中率”之差

下限取作5级的话，那么标准的PI算法确实无法给出龙门山断裂带上的“PI热点”；但如果把所用地震目录的震级下限取作3.0级的话，则沿龙门山断裂带中北部(即汶川地震破裂带所涉及区域)有清晰的、呈条带状沿断层带展布的“PI热点”。图3针对以1年为步长连续滑动、长度为5年的5个时间窗，给出了“PI热点”的分布。从图中可看到两个重要特征，一是沿汶川地震破裂带的区域有明显的“热点带”；二是在此期间，在川滇其他地区，特别是川滇南部也有大量“PI热点”存在，却并没有“目标震级”的地震发生(这个问题，后面还要讨论)。不过，对此期间的预测的ROC检验(图3(f))表明，此处的“PI热点”仍具有比较好的预测能力。

降低震级下限相当于引入更多的小地

震参与计算，因此，从信息输入的角度说，PI算法本身虽然未变，但输入的信息量却有了显著增加，因此，算法的预测能力有了明显提高。从地球动力学角度看，之所以PI算法对世界上的很多地区都有很好的表现，却未能作出汶川等内陆地震的预测，可能是因为构造变形速率相对较低的内陆地区，地震复发时间较长，因此“识别”地震“到来”的过程，需要更多的信息输入。

3 关于2013年芦山地震的预测

芦山地震发生在龙门山断裂带南部，即2008年汶川地震后处于“平静状态”的那一段。汶川地震造成的库仑破裂应力(CFS)变化可能使这一地震提前发生^[12]。图4用与图3相似的方式，给出了包含芦山地震的发生时间的4个滑动时间窗口内

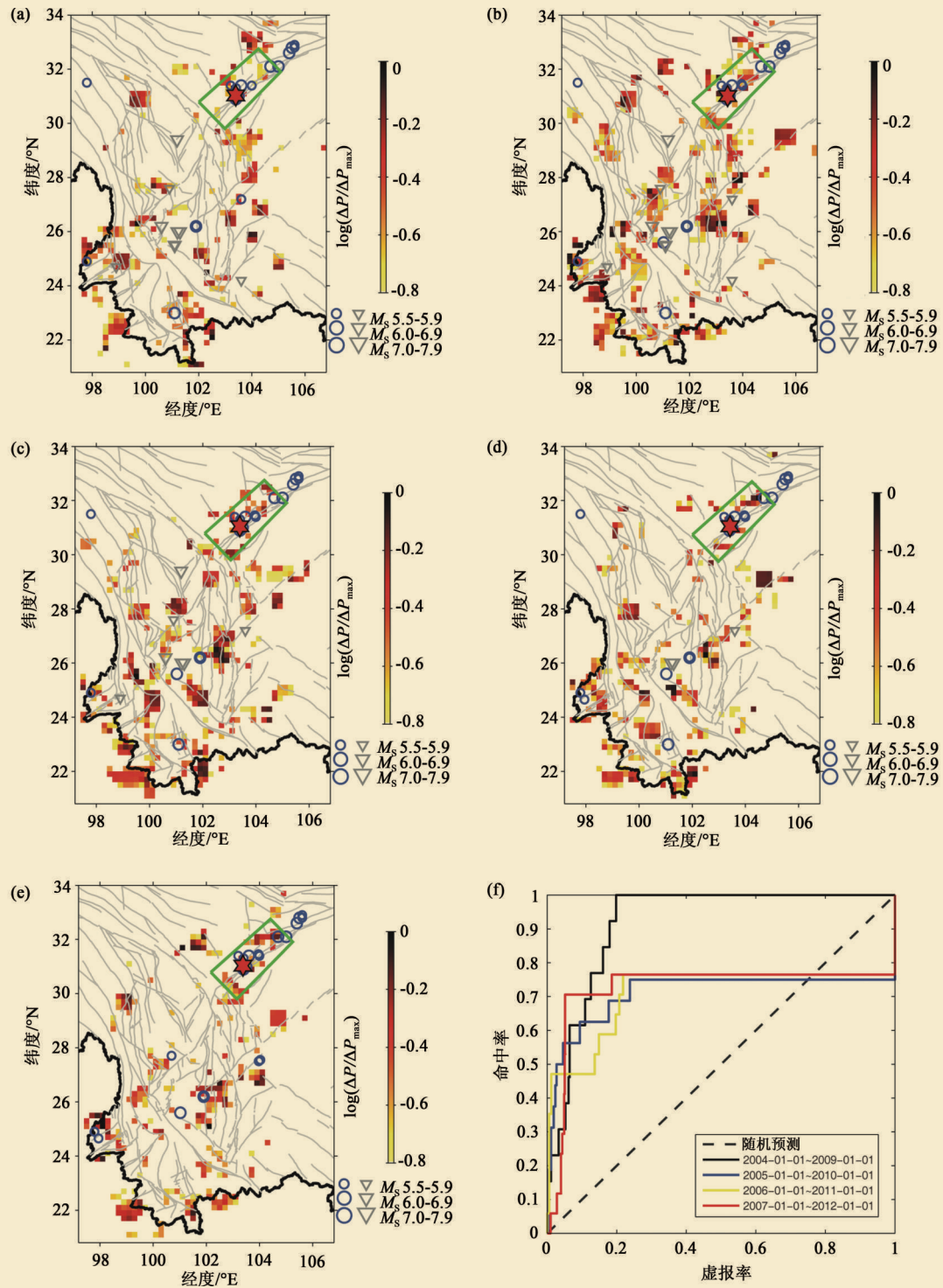


图3 包含2008年汶川地震的不同预测时间窗中的“PI热点”分布及预测的ROC检验。红色六角星表示汶川地震的震中(即地震破裂起始的位置)。绿色方框表示汶川地震的破裂带。图中的预测时段分别为：(a) 2004年1月1日到2009年1月1日；(b) 2005年1月1日到2010年1月1日；(c) 2006年1月1日到2011年1月1日；(d) 2007年1月1日到2012年1月1日；(e) 2008年1月1日到2013年1月1日。在此期间的其他5.5级以上地震也标在图上；(f) 对图3(a)–(e)所示的PI算法预测效果的统计检验(ROC检验)。图3所示的研究内容与以往的工作^[1]相同，但使用了改进的地震目录，同时进行了预测效果检验(图3(f))。注意图3(e)中的蓝色圆圈所表示的5.5级以上地震尚不完整，统计日期截止于2012年6月1日

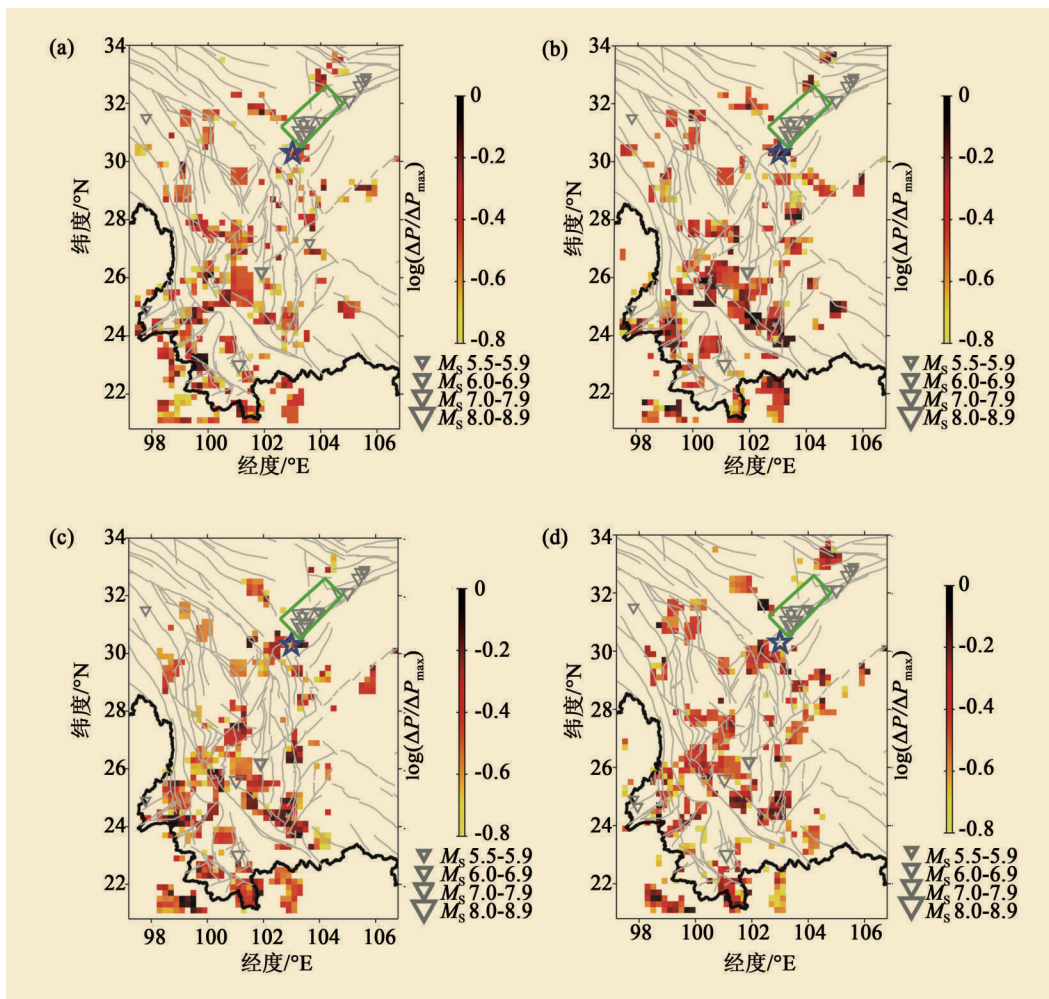


图4 包含2013年芦山地震的不同预测时间窗中的“PI热点”分布。蓝色空心五角星表示芦山地震的位置。绿色方框表示汶川地震的破裂带。图中的预测“目标”时段分别为：(a) 2009年1月1日到2014年1月1日；(b) 2010年1月1日到2015年1月1日；(c) 2011年1月1日到2016年1月1日；(d) 2012年1月1日到2017年1月1日

“PI热点”的分布。由于这些窗口尚未结束，因此“目标地震”未在图中画出。2013年1月1日到2018年1月1日的“预测时段”，由于可用地震目录终止于2012年6月1日，因此尚无法给出。从图4中可见，芦山地震发生在PI算法给出的一个“热点”的“丛集”附近。或许值得注意的是，在这4个时间窗口内，汶川地震破裂区中那些明显的“热点”^[11]却不再出现。

由图3和图4的比较，我们可以对川滇南部的那些“热点”的性质进行以下一些讨论：川滇南部与北部相比具有“热点”多、虚报率高的特点。这一特点靠PI算法本身难于得到解释。然而如果考虑青藏高原的地球动力学^[13]，则川滇南部的应变率比北部高的情况可能是这种“PI

热点”的差别的一种可能的解释。联系前面讨论的同样的PI算法在变形速率较大的板块边缘地区可以得到与“目标”地震相对应的“热点”，而在变形速率相对较低的内陆地区就得出“热点”的情况，也许应该提醒的是，在以后的“PI热点”计算中，应把背景形变速率作为一个权重因素考虑在内。

4 结论和讨论

地震预测算法必须由实际地震进行检验。要真正确认一个算法的预测能力，必须进行真正的向前预测检验^[14]。因此本文所做的针对一个具体震例的回溯性检验 (retrospective case study) 仅仅是地震预测

算法检验的必要的(而非充分的)步骤,这是这类工作的限度。但是,由于强地震的非频发性,每次地震的发生,都给地震预测算法的检验、反思和改进提供了不可多得的机会,所以这类工作虽有明显限度,却还是有意义的。

本文的另一个限度是,所做的检验属于一种不完整的或者“单向”的检验,即仅考察了新发生的地震是否落在“热点”区或者“异常区”。对于有很多“目标地震”的情况(如图2和图3所示),可以用ROC检验来进一步评估预测的效能,但对单一地震的情况,这种检验则无论如何只具有“单向”的意义。

对2013年4月20日芦山地震的PI算

法的预测检验表明,这一基于地震统计物理的算法在5年时间尺度上具有一定的预测能力,显示了统计物理与地震学的交叉^[15]具有在地震预测研究中发挥作用的潜力。但如何在防震减灾的实际工作中有效地利用这种“可预测性”信息——时间尺度为5年,以“热点”形式标识“地震危险区”,既有虚报也有漏报,但预测效果远好于随机预测,却又涉及自然科学和社会科学之间的交叉研究了。

致谢 作者感谢《物理》编辑部的邀请和在编辑本文过程中提供的帮助。PI算法的原始程序由J. Rundle教授和陈建志教授提供。

参考文献

- [1] 陈建志, Rundle J B, Turcotte D L 等. 物理, 2013, 42 (5): 329
- [2] Holliday J R, Nanjo K Z, Tiampo K F *et al.* Nonlinear Proc. Geoph., 2005, 12: 965
- [3] Nanjo K Z, Rundle J B, Holliday J R *et al.* Pure Appl. Geophys., 2006, 163: 2417
- [4] Wu Y M, Chen C C. Tectonophysics, 2007, 429: 125
- [5] 蒋长胜, 吴忠良. 中国科学(D辑:地球科学), 2008, 38: 852
- [6] Cho N F, Tiampo K F. Pure Appl. Geophys., 2013, 170: 185
- [7] Jiang C S, Wu Z L. Nat. Hazard Earth Sys., 2011, 11: 697
- [8] Turcotte D L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997
- [9] Keilis-Borok V, Rotwain I. Phys. Earth Planet Inter., 1990, 61: 57
- [10] Chen C C, Rundle J B, Holliday J R *et al.* Geophys. Res. Lett., 2005, 32: L22315
- [11] Jiang C S, Wu Z L. Pure Appl. Geophys., 2010, 167: 751
- [12] Parsons T, Chen J, Kirby E. Nature, 2008, 454: 509
- [13] 王辉, 刘杰, 申旭辉等. 中国科学(D辑:地球科学), 40: 458
- [14] Field E D. Seism. Res. Lett., 2007, 78: 1
- [15] Rundle J B. Rev. Geophys., 2003, 41: 1019

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。封面素材要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的视觉冲击力和很好的物理学内涵。被选用的封面素材提供者,均有稿酬及全年《物理》杂志相送。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649470; 82649029
期待您的参与!

《物理》编辑部