

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. 地震学报, 31(3): 307-318.

Jiang Changsheng, Wu Zhongliang, Ma Hongsheng, Zhou Longquan. 2009. Sichuan-Yunnan versus Andaman-Sumatra: PI approach and retrospective forecast test. *Acta Seismologica Sinica*, 31(3): 307-318.

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^{*}

蒋长胜¹⁾[†] 吴忠良¹⁾ 马宏生²⁾ 周龙泉³⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

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

摘要 作为一个中长期地震预测方法, 基于复杂系统统计物理的图象信息学 PI 算法近年来广受关注。针对 7 级以上强震成组和突发交替的川滇地区, 考虑将与其构造和地震活动关系密切, 且强震频发的安达曼-苏门答腊地区作为统一的强震预测研究区, 使用 PI 算法进行 M_w 7.0 及以上预测“目标震级”的地震危险性分析。计算中使用了 1973 年以来的 NEIC 目录, 采用 10 年尺度的地震活动“异常学习”时段和 3 年尺度“预测时间窗”, 对预测效果进行了 ROC 检验。回溯性研究显示, PI 算法预测效果较好, 表明将川滇-安达曼-苏门答腊地区作为统一的 7 级以上强震 PI 算法预测研究区在统计上具有合理性。从统计物理角度, 研究区组合前后的各态遍历性曲线显示, 组合后的研究区对 PI 算法的适用程度虽不优于单独考虑川滇地区, 但优于安达曼-苏门答腊地区。PI 预测图象显示, 2008 年汶川地震前可能存在中长期尺度的“前兆性”地震活动异常。

关键词 中长期地震危险性 统计物理 图象信息学 川滇地区 安达曼-苏门答腊地区

文章编号: 0253-3782(2009)03-0307-12 中图分类号: P315.75 文献标识码: A

Sichuan-Yunnan versus Andaman-Sumatra: PI approach and retrospective forecast test

Jiang Changsheng¹⁾[†] Wu Zhongliang¹⁾ Ma Hongsheng²⁾ Zhou Longquan³⁾

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

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

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: Pattern Informatics (PI) algorithm, a recently developed predictive

* 基金项目 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418406)、国家科技支撑计划项目(2006BAC01B02-01-02)及中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB06B03)联合资助。中国地震局地球物理研究所论著 09AC1007。

收稿日期 2008-10-06 收到初稿, 2008-12-08 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: jianges@cea-igp.ac.cn

algorithm based on the statistical physics of complex systems, has caused much attention in the study of earthquake predictability and time-dependent seismic hazard assessment. This paper applied the PI algorithm to the Sichuan-Yunnan region of southwest China, where strong earthquakes show complicated pattern, considering the tectonically correlated and active Andaman-Sumatra region and aiming at the forecast of ‘target earthquakes’ no less than $M_w 7.0$. NEIC catalogue since 1973 was used, with ‘anomaly training time window’ being 10 years and ‘forecast time window’ being 3 years, respectively. ROC test was used for evaluating the performance of the forecasts. Retrospective forecast test shows positive evidence for the application of PI algorithm to this region, and also indicates that considering the connection between the Sichuan-Yunnan region and the Andaman-Sumatra region is reasonable in the calculation. In the perspective of statistical physics, ergodicity shown by seismicity gets significantly improved for the Andaman-Sumatra region when the combination with the Sichuan-Yunnan region is considered, with an acceptable sacrifice of the ergodicity for the later. Hot spot picture given by PI algorithm shows some ‘precursory’ intermediate-term anomaly before the 2008 Wenchuan earthquake.

Key words: long term and intermediate-term seismic hazard; statistical physics; Pattern Informatics; Sichuan-Yunnan region; Andaman-Sumatra region

引言

将现代统计物理的理论和方法应用于地震预测问题的研究近年来有多方面进展，已成为物理学与地震学之间一个最为活跃的交叉领域(吴忠良，陈运泰，2002)。一些统计物理概念，如临界性、SOC、长程关联、熵等，也逐渐进入地震研究。近年来，基于复杂系统统计力学的地震预测模型——图象信息学(pattern informatics，缩写为 PI)算法引起广泛关注。根据现代统计物理处理复杂系统的方法，Rundle 等用 PI 算法进行地震活动性分析，并应用于加州的地震(Rundle *et al*., 2000, 2003; Tiampo *et al*, 2002)。PI 算法综合考虑了地震活动“增强”与“平静”两种可能的前兆现象，同时扣除背景地震活动以识别地震活动异常。作为预测效能的检验，该方法也在日本中部(Nanjo *et al*, 2006)、川滇(蒋长胜，吴忠良，2008)及中国台湾(Chen *et al*, 2005)等地应用，Holliday 等(2005)还将其用于全球 7 级以上强震的预测尝试。

川滇地区受青藏高原地壳物质的东向移动、阿萨姆顶点楔入及缅甸微板块的共同影响，是现今地壳运动最活跃的地区之一，也是强震活动复杂的地区之一。这一区域的强震表现出趋于随机的丛集行为(徐锡伟等，2005)，复发过程没有良好的准周期性，也不存在“强度可预报”或“时间可预报”模型所预期的性质(易桂喜等，2002)。此外，地震活动的强弱交替也呈现复杂特征(韩渭宾，蒋国芳，2006)。作为一个典型的突发强震事件，2008 年 5 月 12 日发生了汶川 $M_w 7.9$ 强烈地震。对川滇地区 7 级以上强震的预测一直是地震学家关注的问题。将 PI 算法这一新的统计物理预测方法用于川滇地区强震的中长期预测的尝试，无论是对方法本身的适用性，还是通过回溯性研究对汶川大地震前可能的地震活动“前兆”性异常进行重新认识，都显得十分重要。

直到2004年苏门答腊 $M_w 9.0$ 巨大地震前, 川滇与安达曼-苏门答腊地区的关联尚少有讨论。苏门答腊地震后川滇地区明显的地震活动响应(张国民等, 2005; 付虹等, 2007)启发人们重新认识这两个地区在构造上与地震活动上的关联。本文尝试将川滇与强震频发的安达曼-苏门答腊地区作为一个整体进行讨论, 并从构造关联、地震活动、回溯性预测检验及统计物理的角度探讨这一尝试的意义。

1 地震预测的图象信息学(PI)算法

PI算法通过对地震活动时空活动图象偏离“背景地震活动”情况的分析, 在中长期时间尺度上估计未来地震的概率(Rundle *et al.*, 2000, 2002)。其计算步骤如下: 根据预测的目标震级, 将整个地震区划分为尺度 $D \times D$ 的网格, 记为 x_i 。令每一网格 x_i 对应一个时间序列 $N_i(t)$ 。其中 $N_i(t)$ 是格点*i*(中心坐标在 x_i)和其最近邻的8个格点所含范围内(Moore近邻)在时间 t 上每单位时间内(例如每天)的地震数目。这些地震须大于序列的截止震级 M_c 。 $N_i(t)$ 被标识在格点*i*上, 所定义的时间范围为一参考时刻 t_b 至时刻 t 。相应于每个格点的时间序列的构建中涉及5个时刻: 用于计算所用目录的起始时刻 t_0 , 滑动变化的各时间序列起始时刻 t_b , 用于地震活动“异常学习”的时间窗起始时刻 t_1 和终止时刻 t_2 , 以及“预测时间窗”起始时刻 t_2 和终止时刻 t_3 。时刻 t_b 自 t_0 至 $t_1 - (t_2 - t_1)$ 时刻以月尺度步长滑动。相应地, 时间序列构建中还涉及3个时段: ①参考时段 $t_b - t_1$; ②第二时段 $t_b - t_2$, 或“异常学习”时段 $t_1 - t_2$; ③预测时段 $t_2 - t_3$ 。格点*i*上的“地震活动强度”函数 $I_i(t_b, t)$ 定义为平均地震数

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

其中, 求和沿着时间递增方向, 间隔为1天。将地震活动强度进行归一化处理, 即减去平均, 除以标准差, 则格点*i*在时间间隔 $t_b - t$ 中的归一化统计属性为

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

接着, 计算两个归一化强度函数之间的差异, 作为格点*i*的地震活动性“异常”程度的度量

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

然后, 计算强度函数的平均变化量

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

未来强震发生的概率 $P_i(t_0, t_1, t_2)$ 假设为强度函数变化量的平方

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

接下来, 扣除研究区域内全部格点的平均概率, 得到概率的相对变化

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

地震危险区域, 即所谓“热点”(hotspots), 定义为 $\Delta P_i(t_0, t_1, t_2)$ 为正的格点, 即概率函数 $P_i(t_0, t_1, t_2)$ 高于背景水平的位置。由于函数定义中含有平方项, 因此地震活动的增强和

减弱均可反映在 PI 图象上。

2 研究区构造背景和地震活动特征

本文研究区范围为 10.0°S — 35.0°N , 90.0°E — 110.0°E 。大致以 20.0°N 为界, 以南为安达曼-苏门答腊地区, 而以北统称为川滇地区。研究区地质构造复杂, 地震活动强烈。印度洋板块沿巽他海沟以 $6\text{--}7\text{ cm/a}$ 的速率向北北东 23° 方向运动, 与巽他板块发生斜向聚敛俯冲(马宗晋, 叶洪, 2005), 从而在印度洋俯冲带西段形成一系列伴生构造。其中最为明显的是平行俯冲带发育的陆内走滑断裂——实皆断裂、安达曼海断裂系和苏门答腊断裂。走滑断裂带与俯冲带之间形成狭窄的缅甸小板片。实皆断裂与喜马拉雅俯冲带在藏东地区相交, 使滇西南地区成为红河断裂带与实皆断裂带之间的强烈构造变形区。将川滇地区和安达曼-苏门答腊地区作为统一的强震活动研究区在构造关联上具有一定合理性。

近 40 年来全球最大地震(2004 年 12 月 26 日印尼北苏门答腊近海 $M_{\text{w}}9.0$ 地震)即发生于此地区。该地震后云南和缅甸北部地震活动水平明显增强(张国民等, 2005; 付虹等, 2007)。利用此次地震前后 GPS 观测数据, 杨国华等(2006)计算了大地震产生的同震水平位移场, 结果表明这次地震对川滇地区及以东的华南影响显著, 云南地区水平位移量达 $10\text{--}20\text{ mm}$ 。因此, 从地震活动和形变的相关性来看, 安达曼-苏门答腊地区与川滇地区的关系几乎是无可置疑的。

3 研究资料的选取

本研究使用 1973 年以来美国国家地震信息中心(NET)地震目录。该目录中震级种类较多, 为计算方便将震级统一转换为矩震级。对体波震级 m_b 和面波震级 M_s 分别使用 Johnston(1996) 和 Kanamori(1977) 给出的经验关系转换得到标量地震矩 M_0 。而对地方震震级 M_L 则使用 Gutenberg 和 Richter(1956) 给出的经验关系先转换成面波震级, 再换算成标量地震矩。根据矩震级 M_{w} 的定义(Kanamori, 1977; Hanks, Kanamori, 1979), 将上述几类震级统一转换为矩震级 M_{w} 。对于持续时间震级 M_D , 不明单位的 U_K , 利用 Lg 波测量的体波震级 $m_{b,Lg}$, 以及能量震级 M_e 等, 这里简单地直接用相同大小的矩震级替换。

由于震级计算公式和观测仪器不同, 研究区域内 NET 目录给出的 7 级以上地震数目比中国地震台网目录偏少。虽然 NET 面波震级与中国的 M_{s7} 面波震级差别仅在 $0.1\text{--}0.2$ 之间(刘瑞丰等, 2006), 但对 7.0 级附近的事件是否作为“目标地震”影响较大。这里用中国地震目录中的 M_{s7} 7.0 以上强震作为 NET 目录的补充。由于 PI 算法的计算要求地震目录足够长, 本文仅考虑 1995 年以来的 $M_{\text{w}}7.0$ 以上强震作为“目标地震”, 至本文所用目录终止时间 2008 年 9 月 13 日(汶川地震后的 4 个月), 共计 21 例, 震中分布和地震参数分别见图 1a 和表 1。图 1b, c 分别为川滇和安达曼-苏门答腊地区“目标地震”的 $M-t$ 图。其中川滇地区最大事件为 2008 年 5 月 12 日的汶川 $M_{\text{w}}7.9$ 地震, 安达曼-苏门答腊地区最大事件为 2004 年 12 月 26 日苏门答腊 $M_{\text{w}}9.0$ 地震。根据 G-R 关系确定 1973 年以来该区的 NET 目录完整性震级为 $M_{\text{w}}5.0$ 。图 1d 给出了 $M_{\text{w}}4.5\text{--}8.0$ 的震级-频度关系。在 PI 算法中, 通常要求截止震级 M_c 至少小于预测“目标震级”两个震级单位(Holliday *et al*, 2006), 因此这里将 M_c 设定为 $M_{\text{w}}5.0$ 以满足计算的要求。

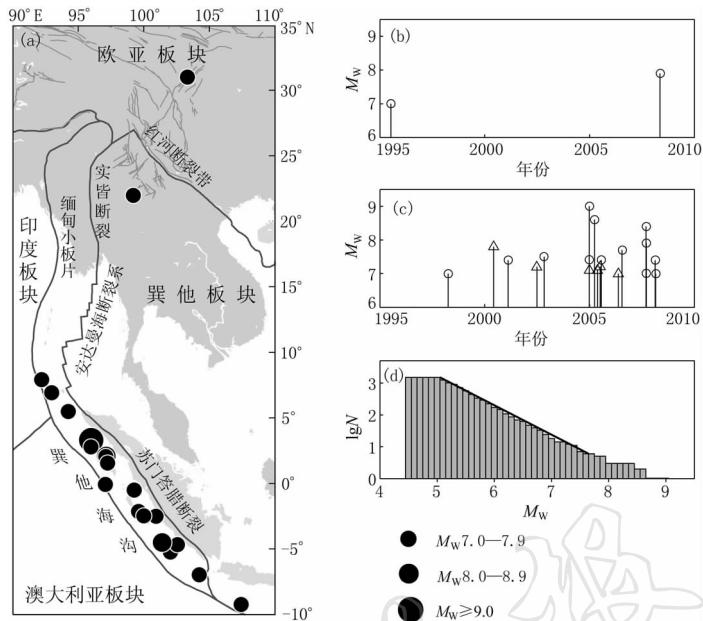


图 1 川滇-安达曼-苏门答腊地区 1995 年以来 7.0 级以上强震的时空信息

(a) 强震震中分布和研究区构造背景, 图中灰色粗线为板块边界, 灰色细线为中国境内的主要活动断裂(据邓起东等, 2003); (b) 和(c) 分别为川滇地区和安达曼-苏门答腊地区 7.0 级以上强震 M_t 图, ○表示由 NEIC 目录给出的 7.0 级以上地震, △为中国地震台网目录补充的 7.0 级以上地震; (d) 由 NEIC 目录给出的川滇-安达曼-苏门答腊地区震级-频度分布, 震级统一转换为矩震级 M_w , 完整性截止震级为 $M_w 5.0$

Fig. 1 (a) Earthquakes no less than $M_w 7.0$ since 1995 in Sichuan-Yunnan and Andaman-Sumatra region. Thick black lines show plate boundaries and thin gray lines show the active faults in China (from Deng *et al.*, 2003). (b) and (c) M_t plot of earthquakes for the two regions, respectively. Circles show the earthquakes no less than $M_w 7.0$ from the NEIC catalogue. Triangles show the events added from the catalogue of China National Seismograph Network. (d) Frequency-magnitude distribution of the events in the catalogue, indicating event completeness down to $M_w 5.0$.

表 1 川滇-安达曼-苏门答腊地区 1995 年以来 $M_w 7.0$ 及以上强震参数

Table 1 ‘Target’ earthquakes under consideration since 1995 with magnitude no less than $M_w 7.0$ in Sichuan-Yunnan and Andaman-Sumatra region

| 编号 | 日期 | | 发震时刻 | | 纬度/° | 经度/° | M_w | 深度/km |
|----|------------|-------------|-------|--------|-----------------|------|-------|-------|
| | 年-月-日 | 时:分:秒 | | | | | | |
| 1 | 1995-07-11 | 21:46:39.78 | 21.97 | 99.20 | 7.1(M_s) | | 12 | |
| 2 | 1998-04-01 | 17:56:23.36 | -0.54 | 99.26 | 7.0 | | 55 | |
| 3* | 2000-06-04 | 16:28:26.30 | -5.26 | 102.03 | 7.8(M_{s7}) | | 64 | |
| 4 | 2001-02-13 | 19:28:30.26 | -4.68 | 102.56 | 7.4 | | 36 | |
| 5* | 2002-06-27 | 05:50:35.10 | -7.00 | 104.20 | 7.2(M_{s7}) | | 11 | |
| 6 | 2002-11-02 | 01:26:10.70 | 2.82 | 96.08 | 7.6(M_s) | | 30 | |
| 7 | 2004-12-26 | 00:58:53.45 | 3.30 | 95.98 | 9.0 | | 30 | |
| 8* | 2004-12-26 | 01:25:47.60 | 5.47 | 94.23 | 7.1(M_{s7}) | | 31 | |
| 9 | 2004-12-26 | 04:21:29.81 | 6.91 | 92.96 | 7.6(M_s) | | 39 | |

续表 1

| 编号 | 日期 | 发震时刻 | 纬度/° | 经度/° | M_w | 深度/km |
|-----|------------|--------------|-------|--------|-----------------|-------|
| | 年-月-日 | 时:分:秒 | | | | |
| 10 | 2005-03-28 | 16:09:36, 53 | 2.09 | 97.11 | 8.6 | 30 |
| 11* | 2005-05-19 | 01:54:50, 80 | 2.03 | 97.10 | 7.1(M_{S7}) | 27 |
| 12* | 2005-07-05 | 01:52:00, 60 | 1.54 | 97.23 | 7.2(M_{S7}) | 33 |
| 13 | 2005-07-24 | 15:42:06, 21 | 7.92 | 92.19 | 7.5(M_S) | 16 |
| 14* | 2006-05-16 | 15:28:24, 40 | -0.10 | 97.04 | 7.0(M_{S7}) | 22 |
| 15 | 2006-07-17 | 08:19:28, 75 | -9.25 | 107.41 | 7.7 | 34 |
| 16 | 2007-09-12 | 11:10:26, 62 | -4.52 | 101.37 | 8.5(M_S) | 30 |
| 17 | 2007-09-12 | 23:49:05, 03 | -2.51 | 100.91 | 7.9 | 30 |
| 18 | 2007-09-13 | 03:35:26, 70 | -2.16 | 99.58 | 7.0 | 10 |
| 19 | 2008-02-20 | 08:08:30, 52 | 2.77 | 95.96 | 7.4 | 26 |
| 20 | 2008-02-25 | 08:36:33, 03 | -2.49 | 99.97 | 7.0 | 25 |
| 21 | 2008-05-12 | 06:28:01, 57 | 31.00 | 103.32 | 7.9 | 19 |

注: 编号栏中标“*”的是由于震级偏差等原因而由中国地震台网补充的 M_{S7}/M_w 7.0 以上强震事件, 其它由 NEIC 地震目录给出; 震级栏中括号内标出事件的原始震级单位, 发震时刻为国际时.

4 PI 算法回溯性研究和“向前”预测

与前人选取“预测时间窗”与“异常学习”时间窗长相同的做法(Rundle *et al*, 2000, 2003; Tiampo *et al*, 2002; Holliday *et al*, 2007)有所不同, 为使 PI 算法的结果与中国地震趋势会商中的“地震大形势”和“年度会商”(石耀霖等, 2000)的时间尺度接近, 这里使用 3 年尺度“预测时间窗”. 为保证完全覆盖 1995 年以来的研究时段, 选取了起始时刻 t_2 分别为 1995-01-01、1998-01-01、2001-01-01 和 2004-01-01 的 4 个回溯性“预测时间窗”, 以及 $t_2 = 2007-01-01$ 的一个“向前”预测时段用于研究. 计算用地震目录的起始日期 t_1 设为 NEIC 目录的起始日期 1973-01-01. 参照 Holliday 等(2005)对全球 7.0 级以上地震 PI 算法预测研究中的参数设定, 令空间网格尺度 $D=1.0^\circ$ 、地震活动“异常学习”的时间窗长 10 年. 按照 PI 计算的标准做法, 仅使用地震数目较多的前 30% 格点参与计算(Chen *et al*, 2005), PI 预测图象也仅显示了按危险性概率大小排序的前 30% 格点结果. 图 2 至图 5 分别给出了 4 次回溯性研究的 PI 预测图象, 空间危险性概率用对数形式 $\lg(\Delta P/\Delta P_{\max})$ 表示. 由图可见, “预测时间窗”内的强震与 PI 算法给出的高危险性“热点”有较好的对应.

与 PI 算法的标准做法(Rundle *et al*, 2000, 2003; Tiampo *et al*, 2002)一样, 这里也采用 ROC 方法(Swets, 1973; Molchan, 1997)进行 PI 算法预测效果的统计检验. ROC 曲线上的每点表示在设定的危险性概率阈值下预测结果的“命中率”和“虚报率”, ROC 曲线下面包含的面积越大, 预测效果越好.“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. 考虑到“预测区边缘成功率统计”问题(史勇军等, 2003)以及地震目录的定位误差等情况, 地震发生在阈值之上的“热点”及其周边 8 个格点内均被认定为“命中”. 图 6 给出了 4 次回溯性研究结果的 ROC 检验情况. 由图可见, PI 算法显著优于随机预测, 这也从统计检验角度验证了研究区选取的可行性.

除与随机预测进行比对外, 与 Chen 等(2005)、Holliday 等(2006)相似, 本文还使用了

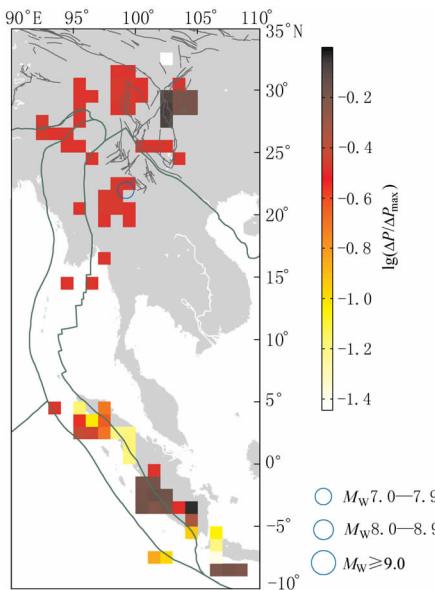


图 2 川滇-安达曼-苏门答腊地区 1995-01-01—1998-01-01 时段 PI 预测图象

Fig. 2 PI forecast map for Sichuan-Yunnan and Andaman-Sumatra region from 1995-01-01 to 1998-01-01

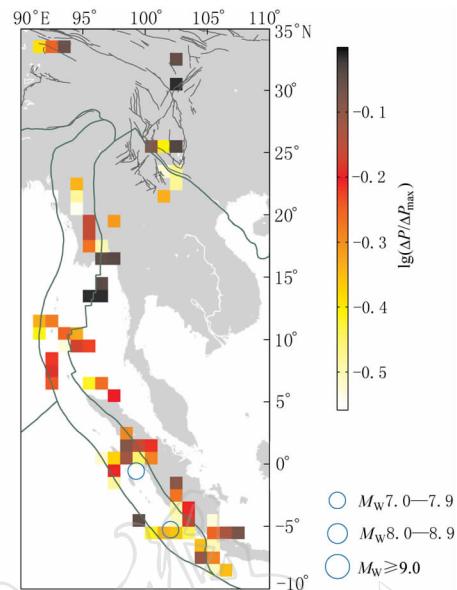


图 3 川滇-安达曼-苏门答腊地区 1998-01-01—2001-01-01 时段 PI 预测图象

Fig. 3 PI forecast map for Sichuan-Yunnan and Andaman-Sumatra region from 1998-01-01 to 2001-01-01

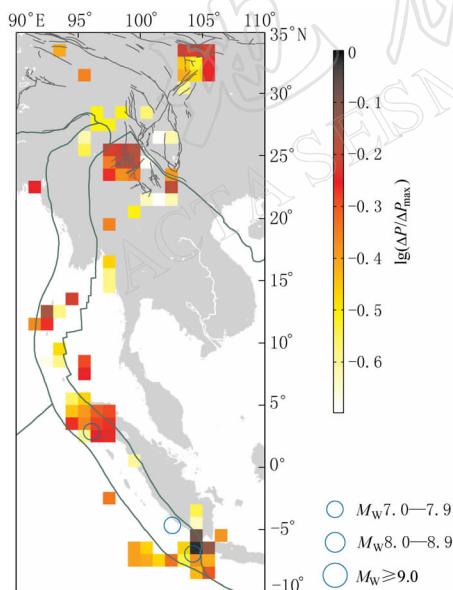


图 4 川滇-安达曼-苏门答腊地区 2001-01-01—2004-01-01 时段 PI 预测图象

Fig. 4 PI forecast map for Sichuan-Yunnan and Andaman-Sumatra region from 2001-01-01 to 2004-01-01

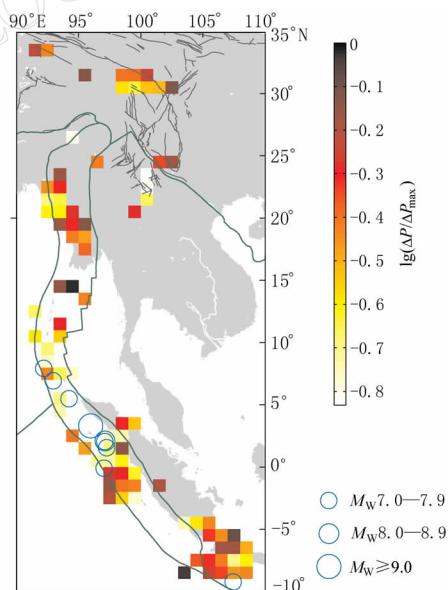


图 5 川滇-安达曼-苏门答腊地区 2004-01-01—2007-01-01 时段 PI 预测图象

Fig. 5 PI forecast map for Sichuan-Yunnan and Andaman-Sumatra region from 2004-01-01 to 2007-01-01

“地震相对强度”(relative intensity, 简写为 RI)算法作为 PI 算法预测效果的参照. RI 算法基于“大地震更易于发生在地震密集区”, 即地震的发生具有“丛集性”的假设, 对格点进行地震数目的统计, 并在空间上归一化后给出地震危险性概率. 为便于与 PI 算法比较, 同样筛选了地震数目较多的 30% 格点参与 RI 图象的计算. RI 算法 ROC 检验结果也在图 6 中表示. 由图 6 可见, RI 算法同样具有较好的预测效果. 但若考虑不同的时段, 则图 6a 中 PI 算法明显优于 RI 算法, 图 6c 中 PI 算法不优于 RI 算法, 而图 6b, d 中则两者相当. 理论上, PI 算法同时考虑了“平静”与“活化”两种异常, RI 算法仅考虑了后者. 因此, 图 6b—d 中 PI 并无明显优势, 可能说明相应时段中地震异常以“活化”为主.

因预测时间尚未结束, 2007-01-01—2010-01-01 时段带有“向前”预测性质, ROC 检验只做到 2008 年 9 月 13 日. 该时段已发生 $M_w 7.0$ 以上强震 6 次, 其中包括汶川 $M_w 7.9$ 强震. 相应的 PI 预测图象和 ROC 检验结果如图 7a, b 所示. 由图 7a 可见, 除 2008 年 2 月 20 日的苏门答腊 $M_w 7.4$ 地震外, 包括汶川 $M_w 7.9$ 地震的其它强震均与 PI 图象高概率“热点”对应较好. 图 7b 也显示, 至 2008 年 9 月 13 日, PI 与 RI 算法已具有较好的 ROC 评价结果.

5 各态遍历性与研究区 PI 算法适用性的统计物理解释

除构造关联、地震活动及统计检验的讨论外, 川滇-安达曼-苏门答腊地区是否可作为统一的 PI 算法研究区的适用程度, 还需在统计物理上回答. 由于 PI 算法的理论基础是地震断层系统可被看作亚稳态的平均场阈值系统(Rundle *et al*, 1995; Klein *et al*, 1997; Ferguson *et al*, 1999), 由于亚稳态的平均场阈值系统具有在较长时间内统计稳定的动力学特征, 因而可用各态遍历性度量系统的性质.

Tiampo 等(2007)用 Thirumalai-Mountain(TM)能量矩(Thirumalai, Mountain, 1993)度量断层系统地震活动的各态遍历性. 如果由 TM 能量矩的倒数 $1/TM$ 表示的遍历性曲线随时间线性递增, 则地震的时-空活动行为具有较好的各态遍历性. 此外, 真实断层系统的地震活动时-空行为满足的是“有效各态遍历性”(Tiampo *et al*, 2007), 即遍历性曲线在一些阶段保持线性递增特征, 而较大地震事件的发生往往打破这种类平稳过程(Tiampo *et al*, 2004). 在时刻 t 的 $TM_n(t)$ 能量矩可由下式计算(Thirumalai, Mountain, 1993):

$$TM_n(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [n_i(t) - \bar{n}(t)]^2 \quad (7)$$

其中, L 为空间网格数目, n_i 为第 i 个网格单元内 $0-t$ 时段内的地震数, $\bar{n}(t)$ 为各空间网格在 $0-t$ 时段内地震数目的平均值

$$n_i(t) = \frac{1}{t} \int_0^t N_i(t') dt' \quad (8)$$

$$\bar{n}(t) = \frac{1}{L} \sum_i n_i(t) \quad (9)$$

如果系统在长期时间尺度上满足有效各态遍历性, 则 $1/TM$ 与时间成正比, 即 $TM_n(t) \propto 1/t$. 由式(7)可看出, TM 矩阵实际上是通过时间平均的空间变化来量化系统的各态遍历行为(Thirumalai *et al*, 1989; Thirumalai, Mountain, 1993).

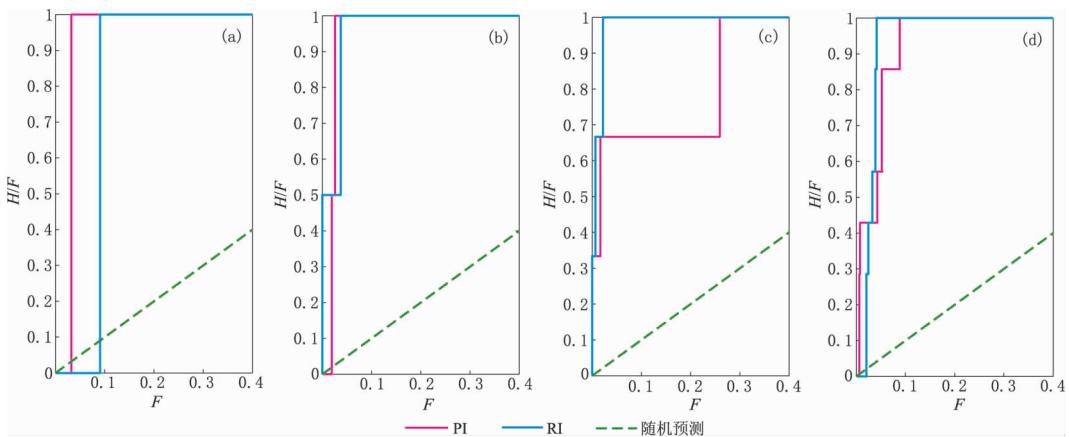


图 6 PI 算法回溯性研究的 ROC 检验. 图中 H 为“命中率(hitrate)”,
 F 为“虚报率(false alarm rate)”

(a) 1995-01-01—1998-01-01 预测时段; (b) 1998-01-01—2001-01-01 预测时段;
(c) 2001-01-01—2004-01-01 预测时段; (d) 2004-01-01—2007-01-01 预测时段

Fig. 6 ROC test for the forecast using PI and RI maps

(a) ‘Forecast test window’ from 1995-01-01 to 1998-01-01; (b) ‘Forecast test window’ from 1998-01-01 to 2001-01-01; (c) ‘Forecast test window’ from 2001-01-01 to 2004-01-01;
(d) ‘Forecast test window’ from 2004-01-01 to 2007-01-01. H : hit rate; F : false alarm rate

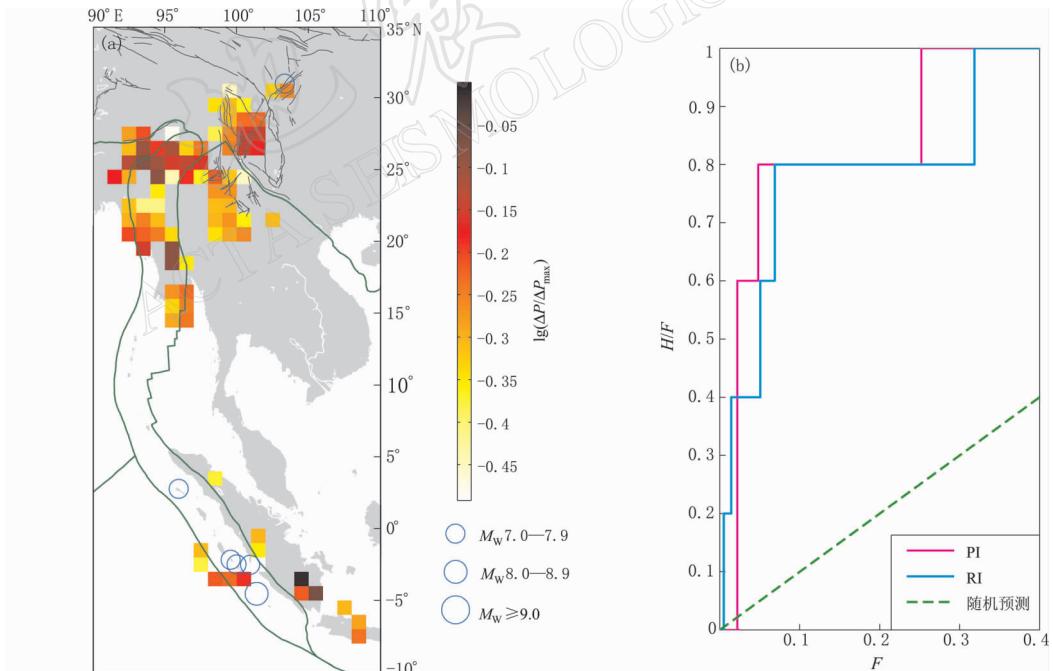


图 7 川滇-安达曼-苏门答腊地区 2007-01-01—2010-01-01 时段 PI 预测图象(a)和 ROC 检验(b)
图(b)中 H 为“命中率(hit rate)”, F 为“虚报率(false alarm rate)”

Fig. 7 PI forecast map and ROC test for Sichuan-Yunnan and Andaman-Sumatra region
from 2007-01-01 to 2010-01-01. H : hit rate; F : false alarm rate

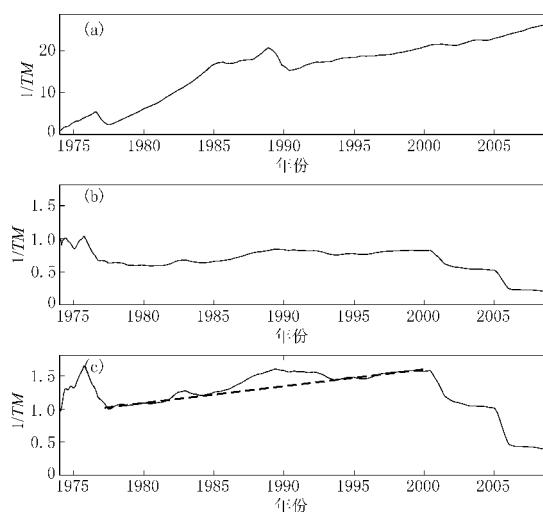


图 8 不同区域地震活动的各态遍历性曲线

(a) 川滇地区; (b) 安达曼-苏门答腊地区;
(c) 川滇-安达曼-苏门答腊地区

Fig. 8 Ergodicity curve for different regions

(a) Sichuan-Yunnan region; (b) Andaman-Sumatra region;
(c) Sichuan-Yunnan and Andaman-Sumatra region

后全区 PI 相对 RI 算法无优势的原因可能与此时段各态遍历性较差有关。对 2000 年以来的时段，各态遍历性曲线给出 PI 算法对川滇地区尚可使用，但对安达曼-苏门答腊地区 PI 算法不再适用。

6 讨论与结论

作为“概率性地震预测”的统计物理方法，PI 算法提供了中长期尺度强震危险性预测的一种新思路。本文将川滇地区与安达曼-苏门答腊地区作为统一的研究区，用 PI 算法进行了 $M_w 7.0$ 以上强震的时间相依地震危险性分析，并从构造关联、地震活动、统计检验和统计物理解释上讨论了这一研究区域选取的合理性。我们选取了 10 年尺度的地震活动“异常学习”时段、3 年尺度的“预测时间窗”、 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的空间网格及 $M_w 5.0$ 的截止震级进行计算。ROC 检验表明，PI 算法适用于川滇-安达曼-苏门答腊地区 $M_w 7.0$ 以上强震的中长期预测。在图 2 和图 7a 分别所示的 PI 图象中，1995 年孟连 $M_s 7.1$ 地震和 2008 年汶川地震均可与周围的较大范围显著的地震危险性高概率“热点”相对应。从各态遍历性来看，将川滇与安达曼-苏门答腊作为统一的 PI 算法研究区，尽管不优于单独考虑川滇地区，但实现了利用两区域中发生的地震彼此“照亮”进行 PI 算法预测的可能，这是单独考虑川滇地区所无法做到的。理论上，对背景的平均需要很大量的采样率，因此单独考虑其中的一个地区对于现有的目录均存在点数不够的问题。

作为近年来世界上震害最为严重的强震之一，2008 年 5 月 12 日汶川地震的突然发生，使得对其震前“前兆性”地震活动的研究成为一个 important 问题。尽管回溯性震例研究意义有限，但对地震前是否存在“前兆”的实际震例考察，仍可得到一些有意义的成果。由图 2—5 和图 7a 可见，汶川地震前在震中所在龙门山断裂带上均有不同程度的 PI“热点”存在，这

使用相同的地震目录、空间网格尺度 D 和截止震级 M_c ，本文分别计算了 1974 年 1 月至 2008 年 9 月的川滇、安达曼-苏门答腊以及川滇-安达曼-苏门答腊地区的 TM 矩阵。由 $1/TM$ 给出的各态遍历性曲线如图 8 所示。由图 8a 可见，川滇地区各态遍历性较好。蒋长胜和吴忠良（2008）曾对川滇地区应用 PI 算法进行了系统的回溯性检验，PI 算法对 $M_s 5.5$ 以上“目标地震”的预测效果较好，并远优于 RI 算法。这可能与该地区较好的各态遍历性有关。图 8b 中安达曼-苏门答腊地区的遍历性曲线随时间无明显递增，因此无法使用 PI 算法。研究区组合后的各态遍历性曲线如图 8c 所示。由图 8c 中 1977-01-01 和 2000-01-01 时段内的 $1/TM$ 粗虚线连线可见，全区具有明显的各态遍历性。同时，图 6 中 2000 年之

表明“前兆性”地震活动异常可能是存在的。值得注意的是, Holliday 等(2005)给出的 2000—2010 年全球 7 级以上地震的 PI 图象上,并没有汶川地震所对应的“热点”。这也提示我们,PI 算法的结果与研究区选取可能有很大关系。

审者的评审意见对改进本文的结果有很大的启发和帮助;美国戴维斯加州大学 John B. Rundle 教授在 2006 年北京西太平洋地球物理会议(WPGM)期间向作者详细介绍了 PI 算法的相关理论;台湾省国立中央大学地球科学系陈建志博士提供了程序上的帮助。作者在此谨表谢意。

参 考 文 献

- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 陈立春. 2003. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘, **10**(S1): 66–73.
- 付虹, 刘强, 邬成栋, 王永安, 吴小平. 2007. 印尼 8.7、8.5 级远震对云南地区小震的激发和地下流体异常响应初探[J]. 地震研究, **30**(1): 8–13.
- 韩渭宾, 蒋国芳. 2006. 川滇地区较长时间尺度的地震活动盛衰交替性[J]. 地震, **26**(1): 51–57.
- 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), **38**(7): 852–861.
- 刘瑞丰, 陈运泰, Perter Bormann, 任泉, 侯建民, 邹立晔, 杨辉. 2006. 中国地震台网与美国地震台网测定震级的对比(II): 面波震级[J]. 地震学报, **28**(1): 1–7.
- 马宗晋, 叶洪. 2005. 2004 年 12 月 26 日苏门答腊-安达曼大地震构造特征及地震海啸灾害[J]. 地学前缘, **12**(1): 281–287.
- 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.
- 史勇军, 吴忠良, 白玲, 蒋长胜, 蔡明军. 2003. 位于预测区边界附近的地震统计检验问题[J]. 中国地震, **19**(4): 351–357.
- 吴忠良, 陈运泰. 2002. 地震预测与统计物理[J]. 物理, **31**(6): 365–371.
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾娴. 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.
- 杨国华, 江在森, 王敏, 张祖胜, 刘广余, 韩月萍, 丁平, 龚平. 2006. 印尼地震对我国川滇地区地壳水平活动的影响[J]. 大地测量与地球动力学, **26**(1): 9–20.
- 易桂喜, 闻学泽, 徐锡伟. 2002. 川滇地区若干活动断裂带整体的强地震复发特征研究[J]. 中国地震, **18**(3): 267–276.
- 张国民, 张晓东, 刘杰, 刘耀炜, 田勤俭, 郝平, 马宏生, 焦明若. 2005. 印尼苏门答腊 8.7 级大震对中国陆区的影响[J]. 地震, **25**(4): 15–25.
- 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**: L22315, doi: 10.1029/2005GL023991.
- Ferguson C D, Klein W, Rundle J B. 1999. Spinodals, scaling, and ergodicity in a threshold model with long-range stress transfer[J]. *Phys Rev E*, **60**: 1359–1373.
- Gutenberg B, Richter C F. 1956. Magnitude and energy of earthquake[J]. *Annali di Geofisica*, **9**: 1–15.
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale[J]. *J Geophys Res*, **84**(B5): 2348–2350.
- 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]. *Seism Res Lett*, **78**: 87–93.
- Holliday J R, Nanjo K Z, Tiampo K F, Rundle J B, Turcotte D L. 2005. Earthquake forecasting and its verification[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **12**: 965–977.
- Holliday J R, Rundle J B, Tiampo K F, Klein W, Donnellan A. 2006. Modification of the pattern informatics method for forecasting large earthquake events using complex eigenfactors[J]. *Tectonophysics*, **413**: 87–91.

- Johnston A C. 1996. Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions: I. Instrumental seismicity[J]. *Geophys J Int*, **124**: 381–414.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquake[J]. *J Geophys Res*, **82**: 2981–2987.
- Klein W, Rundle J B, Ferguson, C D. 1997. Scaling and nucleation in models of earthquake faults[J]. *Phys Rev Lett*, **78**: 3793–3796.
- Molchan G M. 1997. Earthquake prediction as a decision-making problem[J]. *Pure Appl Geophys*, **149**: 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**: 2417–2432.
- Rundle J B, Klein W, Gross S, Turcotte D L. 1995. Boltzman fluctuations in numerical simulations of non-equilibrium lattice threshold systems[J]. *Phys Rev Lett*, **75**: 1658–1661.
- Rundle J B, Klein W, Turcotte D L, Malamud B D. 2000. Precursory seismic activation and critical-point phenomena[J]. *Pure Appl Geophys*, **157**: 2165–2182.
- Rundle J B, Tiampo K F, Klein W, Martins J S Sá. 2002. Self-organization in leaky threshold systems: The influence of near mean field dynamics and its implications for earthquakes, neurobiology, and forecasting[J]. *Proc Natl Acad Sci U.S.A*, **99**: 2514–2521.
- Rundle J B, Turcotte D L, Shcherbakov R, Klein W, Sammis C. 2003. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems[J]. *Rev Geophys*, **41**: 1019, doi:10.1029/2003RG000135.
- Swets J A. 1973. The relative operating characteristic in psychology[J]. *Science*, **182**: 990–1000.
- Thirumalai D, Mountain R D, Kirkpatrick T R. 1989. Ergodic behavior in supercooled liquids and in glasses[J]. *Phys Rev A*, **39**: 3563–3574.
- Thirumalai D, Mountain R D. 1993. Activated dynamics, loss of ergodicity, and transport in supercooled liquids[J]. *Phys Rev E*, **47**: 479–489.
- Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S, Gross S J, Klein W. 2002. Mean-field threshold systems and phase dynamics: An application to earthquake fault systems[J]. *Europhys Lett*, **60**: 481–487.
- Tiampo K F, Rundle J B, Klein W, Martins J S Sá. 2004. Ergodicity in natural fault systems[J]. *Pure Appl Geophys*, **161**: 1957–1968.
- Tiampo K F, Rundle J B, Klein W, Holliday J, Martins J S Sá, Ferguson C D. 2007. Ergodicity in natural earthquake fault networks[J]. *Phys Rev E*, **75**: 066107, doi: 10.1103/PhysRevE.75.066107.