

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 $M_S7.0$ 地震前川滇及附近地区的图像异常. 地震学报, 36(5): 780-789. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.003.

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 $M_S7.0$ earthquake by the pattern informatics method. *Acta Seismologica Sinica*, 36(5): 780-789. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.003.

利用图像信息方法研究芦山 $M_S7.0$ 地震前川滇及附近地区的图像异常*

张小涛¹⁾ 张永仙^{1),*} 夏彩韵²⁾ 吴永加¹⁾ 余怀忠¹⁾

1) 中国北京 100045 中国地震台网中心

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

摘要 图像信息方法是一种基于统计物理学的地震预测方法. 该方法通过严格的统计检验给出地震活动状态显著偏离平均状态的地区(即显著平静或显著活跃的地区), 称为“地震热点”. 以往研究结果表明该方法是一个预测效能较高的中长期地震预测方法. 本文利用中国地震台网中心提供的 1970 年以来的地震目录, 在剔除余震、选取完备震级的基础上, 基于前期研究工作结果中预测效能较高的计算参数, 即网格尺度为 $2^\circ \times 2^\circ$ 、预测时间窗为 9 年, 分析 2008 年汶川 $M_S8.0$ 地震后到 2013 年芦山 $M_S7.0$ 地震前川滇地区的图像信息演化过程. 结果表明, 2009—2010 年间芦山 $M_S7.0$ 地震震中附近的鲜水河断裂带、龙门山断裂带和安宁河断裂带交汇区($29^\circ-31^\circ\text{N}$, $101^\circ-105^\circ\text{E}$)存在明显的地震热点, 2011—2012 年该地震热点缩小至($29^\circ-31^\circ\text{N}$, $101^\circ-103^\circ\text{E}$)范围, 2012 年以后消失, 继而在 2013 年发生芦山 $M_S7.0$ 地震. 本文还对比研究了网格尺度为 $1^\circ \times 1^\circ$ 时的图像信息演化过程, 结果显示 2009—2010 年芦山地震附近的新津—成都—德阳断裂南部、龙泉山西缘断裂南段、马边—盐津断裂带、峨边断裂带、天全—荥经断裂带($29^\circ-30^\circ\text{N}$, $103^\circ-104^\circ\text{E}$)也出现过地震热点, 2011 年以后该热点消失, 2013 年发生芦山 $M_S7.0$ 地震. 本文讨论了计算参数对预测结果的影响, 并根据目前存在的热点分析了川滇及附近地区今后强震发生的可能地点.

关键词 图像信息方法 地震热点 芦山 $M_S7.0$ 地震 川滇及附近地区

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.003 中图分类号: P315.75 文献标志码: A

Anomalous seismic activities in the Sichuan-Yunnan region and its adjacent areas before the Lushan $M_S7.0$ earthquake by the pattern informatics method

Zhang Xiaotao¹⁾ Zhang Yongxian^{1),*} Xia Caiyun²⁾
Wu Yongjia¹⁾ Yu Huaizhong¹⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

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

* 基金项目 科技部“十二五”科技支撑项目(2012BAK19B02-05)、国际科技合作项目(2010DFB20190)和地震科技星火计划项目(XH12058)联合资助.

收稿日期 2013-08-08 收到初稿, 2014-01-08 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: yxzhsis@sina.com

Abstract: The Pattern Informatics (PI) method is a new approach for earthquake prediction based on statistical physics. This method can detect the regions where seismicity significantly deviates from the normal state (i. e., seismic quiescence or seismic activation), known as “seismic hotspots”, via strict statistical tests. Previous results show that PI is effective for medium- to long-term earthquake prediction. In this paper, after declustering and choosing completeness magnitude, the PI method was applied to earthquake catalogue from China Earthquake Networks Center since 1970, to detect the existence of seismic hotspots before the Lushan $M_s7.0$ earthquake on April 20, 2013. Based on suitable parameters (with grid size of $2^\circ \times 2^\circ$ and forecast window of 9 years) with higher prediction efficiency according to the previous researches of western China, we obtained the evolution of PI anomaly during the period from Wenchuan $M_s8.0$ earthquake to Sichuan Lushan $M_s7.0$ earthquake. The results showed that obvious seismic hotspots appeared in the convergent region ($29^\circ\text{—}31^\circ\text{N}$, $101^\circ\text{—}105^\circ\text{E}$) of the Xianshuihe, Longmenshan and An’ninghe faults from 2009 to 2010. These seismic hotspots shrank to the range of ($29^\circ\text{—}31^\circ\text{N}$, $101^\circ\text{—}103^\circ\text{E}$) during the years of 2011—2012 and disappeared after 2012, then the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake occurred. In another evaluation of the evolution of PI anomaly by using a different set of calculation parameters (with grid size of $1^\circ \times 1^\circ$ and forecast window of 9 years), the results showed that there was a hotspot from 2009 to 2010 covering the southern Xinjin—Chengdu—Deyang fault, southern segment of Longquanshan western edge fault, Mabian—Yanjin fault, Ebian fault, and Tianquan—Yingjing fault ($29^\circ\text{—}30^\circ\text{N}$, $103^\circ\text{—}104^\circ\text{E}$). After 2011, this hotspot disappeared and the Lushan $M_s7.0$ earthquake occurred in 2013. We also discussed the potential seismic risk in the studied area as well as the influence of calculated parameters on the prediction efficiency.

Key words: pattern informatics method; seismic hotspot; Lushan $M_s7.0$ earthquake; Sichuan—Yunnan and its adjacent regions

引言

图像信息(pattern informatics, 简称为 PI)方法最初由 Rundle 等(2000, 2002)提出, 当时被称为相位动力学概率变化(phase dynamical probability change, 简称为 PDPC)方法. 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 方法计算出了 2000 年 1 月—2009 年 12 月南加州地区有可能发生 $M \geq 5.0$ 地震的区域. 经事后检验, 大约 90% 的目标地震发生在所预测的危险区内.

Tiampo 等(2002)对 PDPC 方法进行了数学定义, 并且对其计算过程给予了较为合理的解释. 他们通过研究发现 PDPC 方法比相对强度法(过去一定时间段内发震次数多的地方将来更有可能发生地震)或随机预测具有更好的预测效果. Holliday 等(2005, 2006)对 PDPC 方法的计算过程进行了系统的分析, 并改进了该方法, 找到了南加州地区的最佳计算参数值. 自此, 该方法被正式命名为“图像信息(PI)方法”. Nanjo 等(2006a, b)进一步将 PI 方法应用到日本的地震预测研究中, 并绘制了 2000 年 1 月—2009 年 12 月日本有可能发生 $M \geq 5.0$ 地震的地区预测图. Chen 等(2005, 2006)和 Wu 等(2008a, b)分别以 1999 年

台湾集集 $M_S7.6$ 地震和 2006 年台湾恒春 $M_S7.2$ 地震为震例, 利用 PI 方法对其进行地震危险性回溯性检验. 此外, 蒋长胜和吴忠良(2008)以及蒋长胜等(2009)、Zhang 等(2009)也对 PI 方法进行了较为系统的研究, 并利用该方法分别对我国川滇、华北等地区进行了地震危险性的回溯性检验. Zhang 等(2013)还利用该方法对 2008 年于田 $M_S7.3$ 地震和汶川 $M_S8.0$ 地震进行了地震危险性的回溯性预测研究. 结果表明, 对于大地震, 选择较大的格点尺寸和较长的预测时间窗能够获得更好的预测效果.

继 2008 年汶川 $M_S8.0$ 地震后, 龙门山断裂带再次发生了 2013 年芦山 $M_S7.0$ 地震. 研究芦山地震前是否存在 PI 图像异常, 对于检验 PI 方法的有效性及其在大地震预测中的可行性具有重要意义. 在前人工作基础上, 本文将利用 PI 方法研究川滇地区不同时段内 PI 异常图像的演化过程, 并探索芦山 $M_S7.0$ 地震前可能存在的图像异常及其预测意义.

1 PI 方法简介

PI 方法的基本步骤是: 先把研究区域进行网格划分, 对每个网格内的地震活动构建其相应地震活动强度的时间序列, 通过提取每个网格多时间尺度地震活动强度的异常变化和对所有网格间地震活动强度变化的归一化处理, 计算每个网格内显著地震事件发生的概率, 再减去背景概率, 检测出发震概率高的网格(即地震热点).

PI 方法的具体实现过程如下(Holliday *et al*, 2005):

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 个边长为 Δx 的网格, 并对每个网格创建一个时间序列 $N_i(t)$, 即第 i 个网格单位时间内发生的震级大于完备震级 M_0 的地震次数.

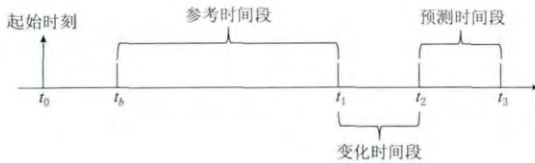


图 1 PI 方法所选时刻示意图

t_0 为研究资料的起始时刻, t_b 为以 Δt 为步长从 t_0 时刻向 t_1 时刻滑动的任意时刻, 一般情况下取 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$

Fig. 1 Schematic diagram of time intervals for PI method

t_0 is initial time, t_b is the moment sliding from t_0 to t_1 with step interval Δt , where $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$

2) 定义 3 个时间段(图 1): ① 参考时间段 $t_b - t_1$; ② 变化时间段 $t_1 - t_2$; ③ 预测时间段 $t_2 - t_3$, 预测的结果在这期间有效.

3) 计算地震发生率函数 $I_i(t_b, t)$. 在两个时刻 t_b 与 t 之间(其中 t 为 t_1 或 t_2 , $t_b < t_1$), 地震发生率函数 $I_i(t_b, t)$ 定义为从 $t_b - t$ 的单位时间内发生在第 i 个网格中震级大于 M_0 的平均地震次数. 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) 将地震发生率函数 $I_i(t_b, t)$ 标准化. 为了比较不同时段的地震发生率函数, 需要这些地震发生率函数具有相同的统计属性. 因此须对地震发生率函数进行标准化处理, 即

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

$$\bar{I}_i(t_b, t) = \frac{\sum_{i=1}^N I_i(t_b, t)}{N}, \quad (3)$$

$$\sigma(t_b, t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [I_i(t_b, t) - \bar{I}_i(t_b, t)]^2}{N-1}}. \quad (4)$$

式中: $\hat{I}_i(t_b, t)$ 为标准化地震发生率函数, $\bar{I}_i(t_b, t)$ 为所有网格在 t 时刻地震发生率函数的平均值, $\sigma(t_b, t)$ 为所有网格在 t 时刻地震发生率函数的标准偏差.

5) 计算 t_1-t_2 时间段标准化地震发生率函数的变化量

$$\Delta \hat{I}_i(t_b, t_1, t_2) = \hat{I}_i(t_b, t_2) - \hat{I}_i(t_b, t_1). \quad (5)$$

6) 计算 $\Delta \hat{I}_i(t_b, t_1, t_2)$ 的平均变化. 为了减少地震随机波动(噪声)的影响, 需要计算所有网格的标准化地震发生率函数的变化量在 t_0-t_1 时间段的平均值, 即

$$\overline{\Delta \hat{I}_i}(t_0, t_1, t_2) = \frac{1}{t_1 - t_0} \sum_{t_b=t_0}^{t_1} \Delta \hat{I}_i(t_b, t_1, t_2). \quad (6)$$

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 $P_i(t_0, t_1, t_2)$, 即标准化地震发生率函数平均变化的平方:

$$P_i(t_0, t_1, t_2) = \overline{\Delta \hat{I}_i}^2(t_0, t_1, t_2). \quad (7)$$

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, 即

$$\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) = P_i(t_0, t_1, t_2) - \bar{P}_i(t_0, t_1, t_2), \quad (8)$$

式中, $\bar{P}_i(t_0, t_1, t_2)$ 为所有网格发震概率的平均值.

对 $\Delta P_i(t_0, t_1, t_2) > 0$ 的网格(地区)命名为热点(危险区), 并假设在 t_2-t_3 的时间段内, 热点区将发生预测地震震级 $M_f (M_f \geq M_0 + 2.0)$ 以上的地震(Holliday *et al*, 2005).

此外, 本文参照前人的做法引入“阈值 ω ”的概念(Rundle *et al*, 2002; Chen *et al*, 2005; Holliday *et al*, 2005), $\omega = \lg(\Delta P / \Delta P_{\max})$. 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. 阈值的大小将最终决定预测热点的多少, 并且这个下限的选取将根据实际需求或回溯性检验得到的最佳结果来确定.

2 研究区域、数据和计算参数

2.1 研究区域

本文选取川滇地区($21^\circ-35^\circ\text{N}$, $97^\circ-109^\circ\text{E}$)为研究对象. 川滇地区位于青藏高原东南部、欧亚板块与印度板块汇聚和相互作用的边缘地带, 特殊的构造部位和强烈的地壳运动背景, 使得该地区成为中国大陆内部地震活动最强烈的区域之一. 1900 年以来, 川滇地区发生了 $M_s \geq 7.0$ 地震 24 次, 其中 $M_s \geq 8.0$ 地震 1 次(2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震). 2013 年 4 月 20 日芦山 $M_s 7.0$ 地震发生在川滇地区龙门山断裂带的南段. 这次地震震源机制解为逆冲型. 截止到 2013 年 4 月 30 日震区发生 $M_s \geq 3.0$ 地震 117 次, 其中 $M_s \geq 5.0$ 余震 4 次, 最大余震为 2013 年 4 月 21 日 17 时 5 分芦山、邛崃交界 $M_s 5.4$ 地震.

2.2 数据

本文所用的数据来自中国地震台网中心提供的全国地震统一编目^①. 1970 年 1 月 1

① 全国地震编目系统. <http://10.5.202.22/bianmu/validate.jsp>. 查询日期: 2013 年 7 月 8 日.

日—2013年4月30日,共记录到川滇地区 M_L 3.0—3.9 地震 1万7215次, M_L 4.0—4.9 地震 2571次, M_L 5.0—5.9 地震 436次, M_L 6.0—6.9 地震 86次, M_L 7.0—7.9 地震 15次, M_L 8.0—8.9 地震 1次。为了降低余震对 PI 方法预测结果的影响,本文采用 K-K 方法

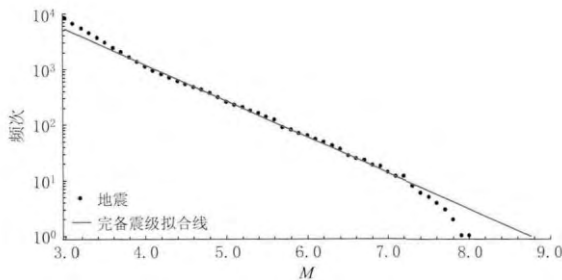


图2 川滇地区1970年1月1日—2013年4月30日地震目录的完整性分析

Fig. 2 Analysis of the seismic catalogue completeness in Sichuan-Yunnan region from 1 January 1970 to 30 April 2013

了研究,认为选择 $2^\circ \times 2^\circ$ 的网格和 8—9 年的预测时间窗预测效果最好。本文参照上述结果,研究川滇地区汶川 M_S 8.0 地震后到芦山地震前的 PI 图像演化。选取预测时间段为 2009 年 1 月 1 日—2018 年 1 月 1 日 ($t_2 - t_3$), 相应的变化时间段为 2000 年 1 月 1 日—2009 年 1 月 1 日 ($t_1 - t_2$) (表 1 中模型参数 1)。为了考察地震热点演化的稳定性,我们以 1 年为滑动间隔,给出其它 4 个预测窗口的地震热点图像(参见表 1 中模型②—⑤)。这样共给出 5 个预测窗口的地震热点图像。由于选取的地震目录下限 M_0 与预测的目标地震震级 ($M_T = M_0 + 2$) 有关,因此为了预测川滇地区 $M_L \geq 6.5$ 地震,我们选取 $M_0 = M_L 4.5$, 同时满足对地震目录完备性的要求。川滇地区按 $2^\circ \times 2^\circ$ 网格化,共划分为 42 个网格。

表 1 PI 不同模型计算参数的选取

Table 1 Different model parameters selected for PI calculation

模型	M_0	网格	t_0	t_1	t_2	t_3
①	4.5	$2^\circ \times 2^\circ$	1970-01-01	2000-01-01	2009-01-01	2018-01-01
②	4.5	$2^\circ \times 2^\circ$	1970-01-01	2001-01-01	2010-01-01	2019-01-01
③	4.5	$2^\circ \times 2^\circ$	1970-01-01	2002-01-01	2011-01-01	2020-01-01
④	4.5	$2^\circ \times 2^\circ$	1970-01-01	2003-01-01	2012-01-01	2021-01-01
⑤	4.5	$2^\circ \times 2^\circ$	1970-01-01	2004-01-01	2013-01-01	2022-01-01

3 计算结果

依据 2.3 节的计算参数,本文获得了 5 个预测时段 PI 的地震热点分布图(图 3)。图 3a 给出了 2009 年 1 月 1 日—2018 年 1 月 1 日的地震热点分布,PI 异常图像显示鲜水河断裂带、龙门山断裂带和安宁河断裂带交汇区(以下简称为“三岔口地区”)存在地震热点。按照该方法的预测规则,2009 年 1 月 1 日—2018 年 1 月 1 日这一区域发生 $M_L \geq 6.5$ 地震的概率较高。而实际上,2009 年以来研究区域内仅发生 1 次 $M_L \geq 6.5$ 地震,即 2013 年 4 月 20 日芦山 M_S 7.0 地震。该地震落到了计算得到的地震热点内。当预测时间后推 1 年(2010 年 1 月 1 日—2019 年 1 月 1 日)时,地震热点分布范围未改变,仍位于三岔口地区(图 3b)。而

(Keilis-Borok *et al*, 1980), 利用 Super-Seis 软件对原始地震目录进行了余震删除。利用删除余震后的地震目录绘制 G-R 关系图(图 2)发现,研究区域 1970 年以来地震目录的完备震级为 $M_c = M_L 3.5$ 。因此,本研究中所选取的震级下限 ($M_0 = M_L 4.5$) 能够满足地震目录完备性的需求。

2.3 计算参数

2008 年川滇地区发生了汶川 M_S 8.0 地震,Zhang 等(2013)以大陆西部为研究区域对 2008 年汶川 M_S 8.0 地震和 2008 年于田 M_S 7.3 地震前的 PI 图像演化进行

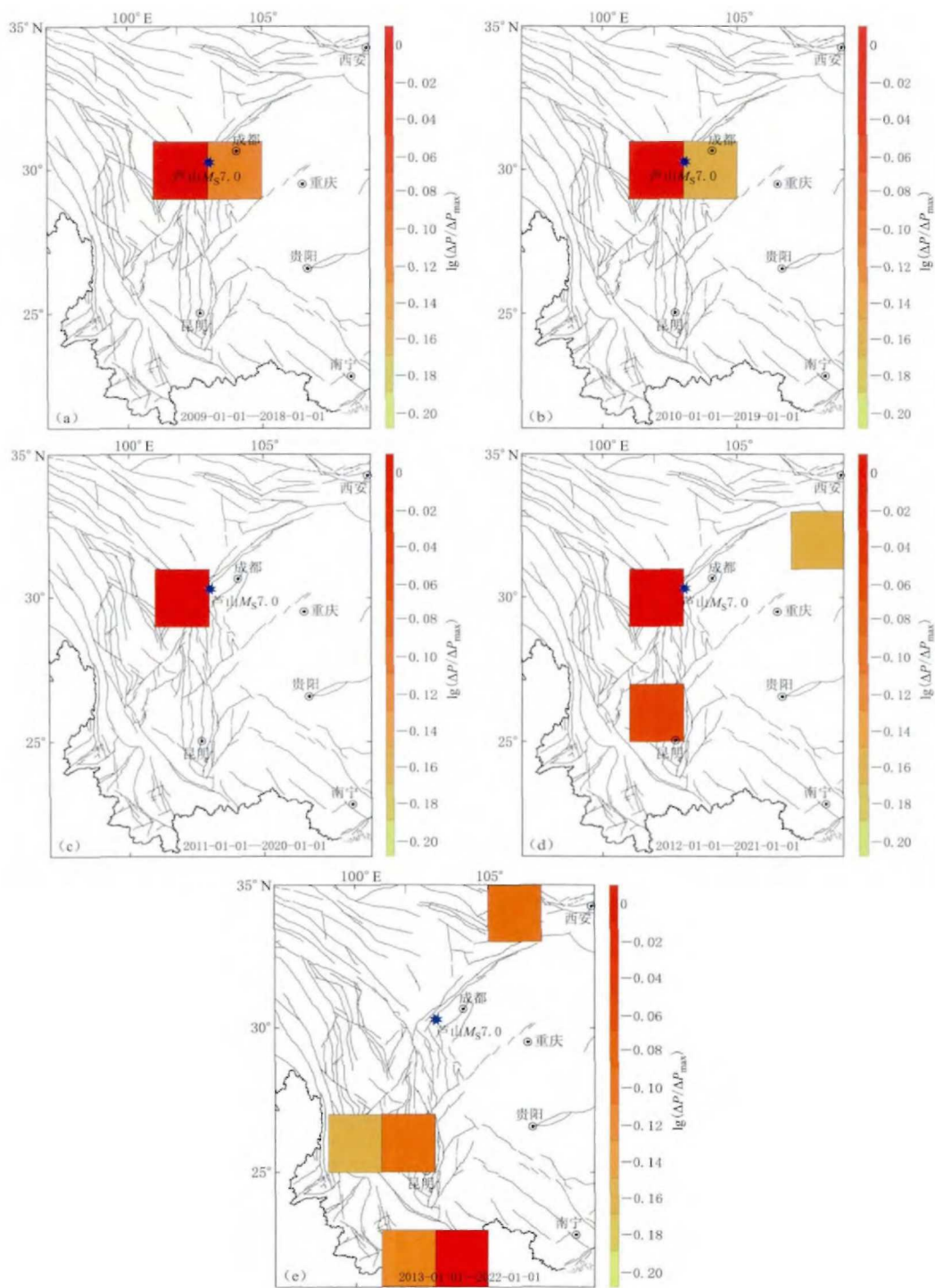


图3 不同模型计算参数下的PI图像(网格为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$)

(a)–(e)分别为基于表1中模型①–⑤参数得到的计算结果,图中小方块为计算所得的热点,阈值 $w = -0.2$

Fig. 3 The PI anomalies computed with different model parameters (grids size $2^{\circ} \times 2^{\circ}$)

(a)–(e) are the results based on parameters of the models ①–⑤ in Table 1, the colored boxes are the calculated hotspots, with threshold of -0.2 . The asterisk denotes the location of Lushan $M_5 7.0$ earthquake

当预测时间窗向后推至 2011 年 1 月 1 日—2020 年 1 月 1 日时,地震热点收缩至三岔口西部地区(图 3c). 将预测时间窗推至 2012 年 1 月 1 日—2021 年 1 月 1 日时,除三岔口西部地区的地震热点继续存在外,在川滇菱形地块东南(磨盘山—绿汁江断裂、安宁河断裂南部、普渡河断裂)与川陕交界处出现新的地震热点(图 3d). 预测时间窗推至 2013 年 1 月 1 日—2022 年 1 月 1 日时,芦山 $M_S 7.0$ 地震附近的热点消失,川陕交界的地震热点也消失. 然而川滇菱形地块东南的地震热点仍持续存在;此外,在川滇菱形地块东南与甘川陕交界处出现了新的地震热点(图 3e). 为此,需要关注上述区域未来发生强震的可能性.

4 讨论

4.1 地震热点所反映的地震活动异常

由 PI 方法的内涵可知,地震热点反映的是热点地区在变化时间段 t_1-t_2 内的偏离平均状态(背景时段 t_0-t_1)的地震活动. 图 4 给出了图 3a 中三岔口地区两个热点地区($29^\circ-31^\circ\text{N}$, $101^\circ-105^\circ\text{E}$)的地震活动时间序列图. 该区 t_0-t_1 时间段(1970 年 1 月 1 日—2000 年 1 月 1 日)内共发生 $M_L \geq 4.5$ 地震 25 次,年发生率为 0.83; t_1-t_2 时间段(2000 年 1 月 1 日—2009 年 1 月 1 日)内共发生 $M_L \geq 4.5$ 地震 9 次,年发生率为 1.0,高于背景时段 t_0-t_1 的地震年发生率. 此外,图 5 给出了图 3e 云南南部两个地震热点地区($21^\circ-23^\circ\text{N}$, $101^\circ-105^\circ\text{E}$)的地震活动时间序列图. 这里同样统计了该区域 t_0-t_1 时间段(1970 年 1 月 1 日—2004 年 1 月 1 日)内地震年发生率为 1.18(40 次/34 年), t_1-t_2 时间段(2004 年 1 月 1 日—2013 年 1 月 1 日)内的地震年发生率为 0.78(7 次/9 年). 该区域变化时间段的地震年发生

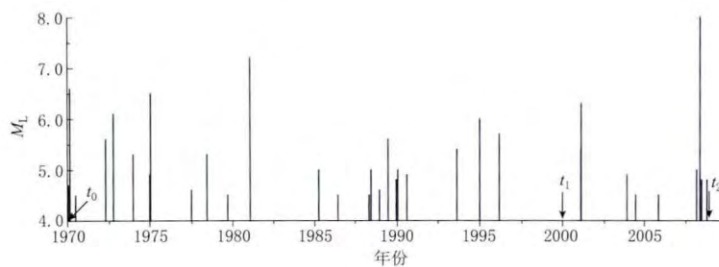


图 4 图 3a 中龙门山、鲜水河、安宁河断裂交汇区两个地震热点内的地震活动时间序列图

Fig. 4 Time series of the seismic activity within the two PI hotspots located on the convergent region of the Longmenshan, Xianshuihe and An'ninghe faults shown in Fig. 3a

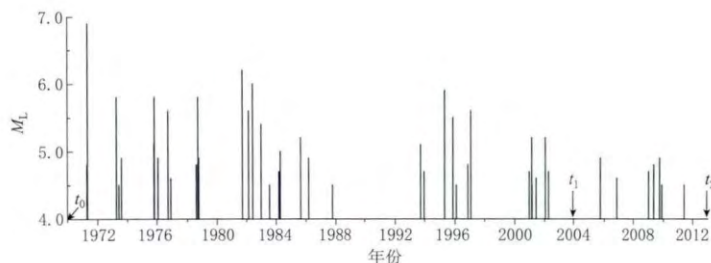


图 5 图 3e 中云南南部两个地震热点内的地震活动时间序列图

Fig. 5 Time series of the seismic activity within the two PI hotspots in the southern Yunnan region shown in Fig. 3e

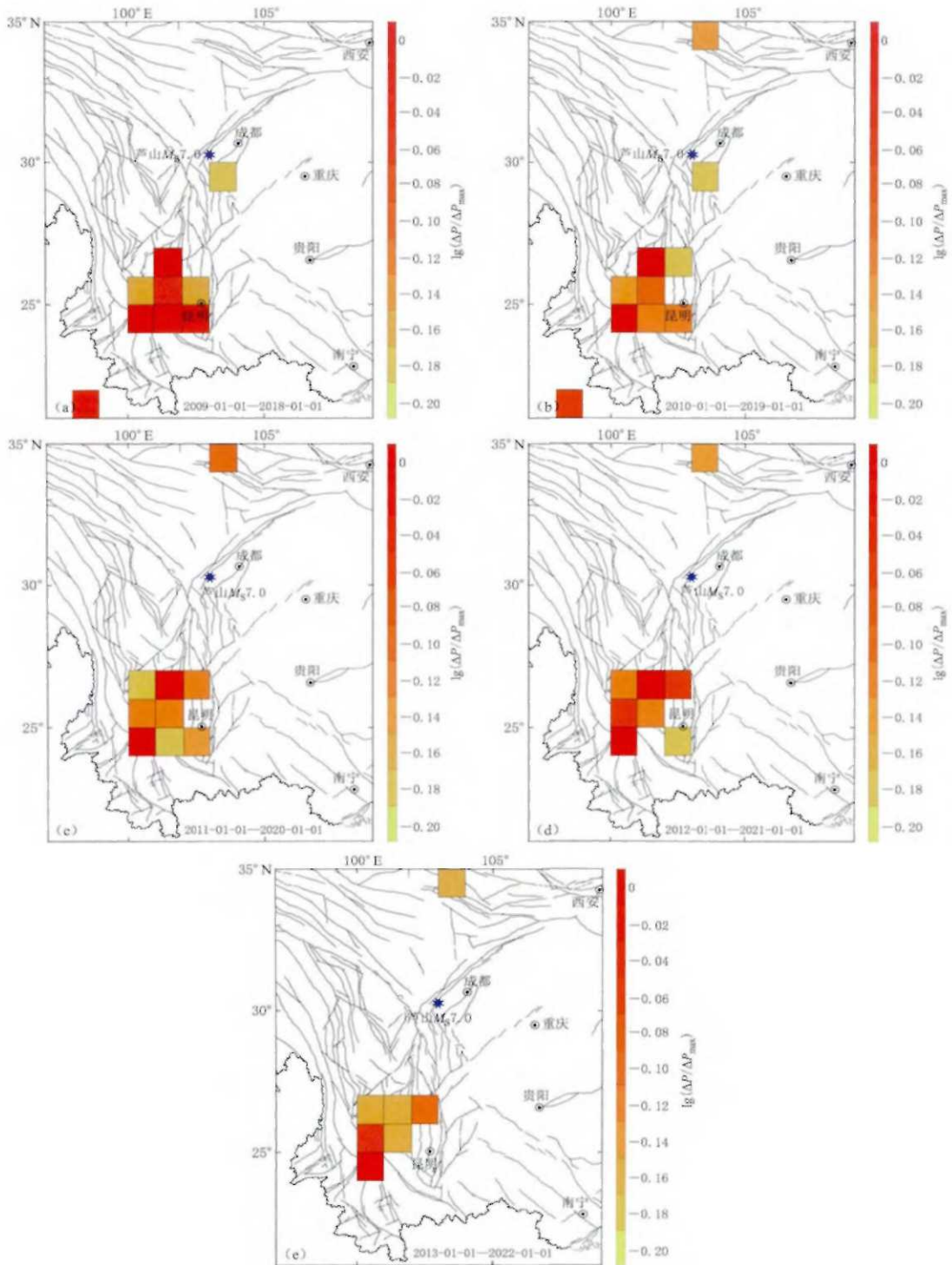


图 6 不同模型计算参数下的 PI 图像(除网格尺度为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 外, 其它同图 3)

Fig. 6 PI maps based on different parameters

(a)–(e) are the same as those in Fig. 3 except grid size is $1^{\circ} \times 1^{\circ}$

率低于背景时间段的地震年发生率。实际计算过程中不仅是多个时间尺度的比较(式(6)中 t_b 从 t_0 滑动至 t_1)，还有各网格地震发生率函数与全区网格地震发生率函数平均值的比较(式(2))，因此，无论与背景时间段的地震发生率相比，还是与计算区域所有网格相比，计算得到的“地震热点”都是地震活动状态偏离度大的地区。

4.2 网格尺度对预测结果的影响

本文对比研究了网格尺度为 $1^\circ \times 1^\circ$ 时图像信息的演化过程(图 6)。可以看出，2009—2010 年芦山 $M_s 7.0$ 地震附近的新津—成都—德阳断裂南部、龙泉山西缘断裂南段、马边—盐津断裂带、峨边断裂带、天全—荥经断裂带(29° — $30^\circ N$, 103° — $104^\circ E$)出现地震热点(图 6a, b)，2011 年后该热点消失(图 6c)。与此同时，川滇菱形地块的南部始终存在大面积的地震热点。

对比图 6 与图 3，无论网格尺度是 $1^\circ \times 1^\circ$ 还是 $2^\circ \times 2^\circ$ ，2009—2010 年芦山地震附近都有地震热点存在，但网格尺度为 $2^\circ \times 2^\circ$ 时芦山地震附近地震热点更为明显，图像演化更加稳定，持续时间更长。由此可以看出，尺度较大的网格或许更能反映震级较大地震的孕震区异常信息。

需要指出的是，由于本文基于经验时空窗的 K-K 算法，删除余震可能会造成地震目录的一定畸变，震级下限 $M_L 4.5$ 的选取带有一定的经验性，空间网格也仅比较了 $2^\circ \times 2^\circ$ 与 $1^\circ \times 1^\circ$ ，未作更全面的考察。以上操作均使计算结果带有一定的主观性。

5 结论

1) 利用 1970 年以来中国地震台网中心提供的地震目录，在剔除余震、选取完备震级的基础上，基于前期研究工作的结果选取了预测效能较高的计算参数，即网格尺度为 $2^\circ \times 2^\circ$ 、预测时间窗为 9 年，研究了汶川 $M_s 8.0$ 地震后到四川芦山 $M_s 7.0$ 地震前川滇地区的图像信息演化过程。结果表明，2009—2010 年芦山 $M_s 7.0$ 地震附近的鲜水河断裂带、龙门山断裂带、安宁河断裂带交汇的三岔口地区(29° — $31^\circ N$, 101° — $105^\circ E$)存在明显的地震热点，2011—2012 年该地震热点缩小至(29° — $31^\circ N$, 101° — $103^\circ E$)范围，2012 年后该地震热点消失。

2) 地震热点反映的是热点地区在变化时间段内的偏离平均状态(背景时段)的地震活动。网格尺度及研究范围的选取对预测结果均有影响。对于 $M_s \geq 7.0$ 目标地震，网格尺度为 $2^\circ \times 2^\circ$ 时的预测效果要优于 $1^\circ \times 1^\circ$ 时的预测效果，即一般情况下，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。

3) 图 3 和图 6 中川滇菱形地块南部、甘川交界地区还存在地震热点，2022 年前该热点地区发生 $M_L \geq 6.5$ 地震的概率较高^①。

审稿专家对本文提出的宝贵的修改建议，在此表示感谢。

参 考 文 献

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):

^① 在本文校对过程中发生了 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震($34.5^\circ N$, $104.2^\circ E$)，位于图 6b-e 中川甘交界的地震热点上，显示了 PI 方法用于强震地点预测的良好前景。

852–861.

- Jiang C S, Wu Z L. 2008. Retrospective forecasting test of a statistical physics model for earthquakes in Sichuan-Yunnan region[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).
- 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 Letts*, **32**(22): L22315. doi: 10.1029/200567L023991.
- Chen C C, Rundle J B, Li H C, Holliday J R, Nanjo K Z, Turcotte D L, Tiampo K F. 2006. From tornadoes to earthquakes: Forecast verification for binary events applied to the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, **17**(3): 503–516.
- 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**(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 ($M > 5$) earthquake events in southern California[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(11/12): 2433–2454.
- Keilis-Borok V I, Knopoff L, Rotvain I M. 1980. Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes[J]. *Nature*, **283**(5744): 259–263.
- Nanjo K Z, Rundle J B, Holliday J R, Turcotte D L. 2006a. Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(11/12): 2417–2432.
- Nanjo K Z, Holliday J R, Chen C C, Rundle J B, Turcotte D L. 2006b. 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.
- Rundle J B, Klein W, Tiampo K F, Gross S. 2000. Linear pattern dynamics in nonlinear threshold systems[J]. *Phys Rev E*, **61**(3): 2418–2432.
- Rundle J B, Tiampo K F, Klein W, Sá Martins J S. 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*, **99**(Suppl. 1): 2514–2521.
- 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.
- Wu Y H, Chen C C, Rundle J B. 2008a. Detecting precursory earthquake migration patterns using the pattern informatics method[J]. *Geophys Res Letts*, **35**(19): L19304.
- Wu Y H, Chen C C, Rundle J B. 2008b. Precursory seismic activation of the Pingtung (Taiwan) offshore doublet earthquakes on 26 December 2006: A pattern informatics analysis[J]. *Terre Atmos Ocean Sci*, **19**(6): 743–749.
- Zhang Y X, Zhang X T, Yin X C, Wu Y J. 2009. Study on the forecast effects of PI method to the North and Southwest China[C]//*Concurrency and Computation: Practice and Experience*. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.: 1559–1568.
- 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.

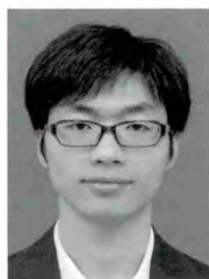
作者简介



金明培 中国地震局滇西地震预报实验场高级工程师。2007年云南大学固体地球物理专业毕业，获理学硕士学位。长期从事地震监测、预报、实验研究工作；现主要从事接收函数、震源新参数和震源滑动模型等数字地震学方面的研究工作。中国地震学会和云南省地球物理学会会员。



赵旭 中国地震台网中心助理研究员，中国科学院地质与地球物理研究所在读博士生。2007年中国地震局地震研究所防震减灾与防护工程专业毕业，获硕士学位。曾从事地震波形数据快速处理、地震精定位方法研究以及地球三维速度结构反演方面的研究。现主要从事数字地震学方面的研究工作。美国地球物理学会会员。



刘琦 中国地震局地震预测研究所助理研究员，中国地震局地质研究所构造地质专业在读博士。2007年吉林大学应用地球物理专业毕业，获工学学士学位；2009年吉林大学地球探测与信息技术专业毕业，获工学硕士学位。曾从事应用地球物理学和地震勘探学方面的研究，现主要从事地应变观测与地震关系等方面的地壳形变研究，以及地球物理与构造地质方面的交叉研究。欧洲地球科学联合会、中国地震学会和中国地球物理学会会员。



叶庆东 成都理工大学地球探测与信息技术专业博士后。2011年武汉大学固体地球物理专业毕业，获硕士学位；2014年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业，获博士学位。目前主要从事面波成像与微地震定位方面的研究。



张小涛 中国地震台网中心助理研究员。2006年青岛科技大学信息科学技术学院计算机专业毕业，获工学学士学位；2009年中国地震局地震预测研究所固体地球物理专业毕业，获理学硕士学位。现主要从事地震预测新方法的研究。



沈玉松 广东省地震局工程师。2001年中国科学技术大学地球与空间科学学院地球物理专业毕业，获理学学士学位；2012年中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理专业毕业，获博士学位。主要从事地震监测和数字地震资料的分析处理工作，现从事地震震源机制分析、三维区域地震震相走时表及地震定位精度评价等方面的研究。