

AI 算法用于广西中强地震的回溯性震例研究*

阎春恒¹, 周 斌¹, 陆丽娟¹, 甘延锋², 郭培兰¹

(1. 广西壮族自治区地震局, 广西 南宁 530022; 2. 广西防震减灾与紧急救援办公室, 广西 南宁 530022)

摘要: 运用改进的 AI 算法对 1970 年以来广西及其邻近北部湾海域 $M_L \geq 4.5$ 地震进行回溯性研究。结果表明, AI 指数能够量化地给出中强地震前小震活动的“加速”或“减速”的变化程度, 在 1~3 年背景下, 这种异常现象较明显, 可为该地区开展中短期地震趋势分析提供新的判据。

关键词: AI 算法; 小震活动; 回溯性统计; 广西地区

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)01-0016-08

0 引言

近年来, 一些学者将现代统计物理的理论和方 法应用到地震预测研究中, 取得了探索性的成果, 如地震加速矩释放 (AMR) 现象 (Bufe, Varnes, 1993; Sornette, Sammis, 1995; Knopoff *et al.*, 1996; Jaumé, Sykes, 1999)、加卸载响应比 (LURR) (Yin *et al.*, 1995, 2000, 2002; Smith, Sammis, 2004; Trotta, Tullis, 2006; 罗贵安等, 1996; 陈学忠等, 1996)、基于复杂系统统计力学的图像信息学算法 (PI) (Rundle *et al.*, 2000a, 2000b; Nanjo *et al.*, 2006; 蒋长胜, 吴忠良, 2008)、态矢量 (Reichl, 1980; 尹祥础等, 2004; 余怀忠, 程佳, 2011)、地震活动加速指数 AI 算法 (林柏辰, 李显智, 2007; 郑建常等, 2010) 等。其中, AI 算法具有综合考虑研究区的地震活动背景, 并对地震样本量要求较低的特点, 比较适合于弱震区地震活动性研究 (冯建刚等, 2009; 郑建常等, 2010)。郑建常等 (2010) 在林柏辰和李显智 (2007) 研究的基础上对 AI 算法做了部分改进, 在华东地区地震活动研究中取得较好的效果。广西及其邻近北部湾海域地震活动总体水平不高, 由于受地震样本量不足的限制, 运用传统地震活动性分析方法开展地震预测研究的效果不甚理想, 本文运用改进的 AI 算法对该地区中强地震前小震活动进行回溯性研究, 并对 AI 算法在广西地区地震趋势分析中的应用进行探讨。

1 AI 算法简介

AI (Acceleration Index) 算法的目的主要是分析地震活动的异常变化, 这里的异常是指超过或远低于一个地区正常背景活动水平的变化。正常的背景活动定义为与大地震无关的时间区间内的地震活动, 据此计算出的背景值记为 UM (Usual mean)。对于和大地震无关的记录的选择, 遵照以下原则: (1) 删除 $M_L \geq 4.5$ 地震后 t_B 时段内的余震, 虽然精确删除余震的工作量较大, 但是可以保证 UM 计算结果的准确性; (2) 消除“前震”记录, 考虑到大地震前较短时间内地震活动可能受处于临界状态应力场的作用, 因此舍弃 $M_L \geq 4.5$ 地震之前 t_A 时段内整个研究区的所有地震记录。

将研究区网格化, 记为 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$, N 为网格数。将研究时段的开始时间记为 t_0 , $t_0 \sim t_1$ 为选取的背景活动时段, 待研究的大地震的发生时刻记为 t_2 ; 背景研究时段内发 $M_L \geq 4.5$ 地震 q 个, 以 $t_j (j = 1, 2, \dots, q)$ 表示这些地震的发震时刻, 第 j 个地震的前震时段开始时刻记为 t_{A_j} , 余震时段的结束时刻记为 t_{B_j} 。定义:

$$TQ = t_1 - t_0 - \sum_{i=1}^q (t_{B_j} - t_{A_j}), \quad (1)$$

$$NQ = n(x_i, t_0, t_1) - \sum_{j=1}^q n(x_j, t_{A_j}, t_{B_j}). \quad (2)$$

* 收稿日期: 2013-04-10.

基金项目: 桂科攻项目 (12426001) 和广西壮族自治区地震局科研合同制项目 (GXJ2011006) 联合资助.

式中, $n(x_i, t_0, t_1)$ 表示在 $t_0 \sim t_1$ 时段内发生在 x_i 网格内的地震数。定义 $UM = NQ/TQ$, 则 UM 为背景活动时段内小地震发生的平均速率。将我们所感兴趣的大地震前的一段时间区间记为 Δt_{for} , 定义该时段内地震活动平均值 RM (Resent mean), 表示为

$$RM = n(x_i, t_2 - \Delta t_{for}, t_2) / \Delta t_{for}. \quad (3)$$

定义地震活动加速指数

$$AI = \frac{RM - UM}{UM_{max}}. \quad (4)$$

式中, UM_{max} 为所有网格中的背景活动最大值。由式 (4) 可以看出, AI 反映的是大地震前地震活动速率在研究时段内相对于前期背景时段内的变化情况。当 AI 值超过或低于设定的阈值时, 就认为该地区地震活动异常, 大于正的阈值表示该地区地震活动开始加速, 低于负的阈值则表明该地区地震活动异常减弱。在最初的算法中 (林柏辰, 李显智, 2007), 采用的是人工给定阈值的方法。郑建常等 (2010) 采用此方法对华东地区的中强地震作回顾性检验时, 根据研究区 AI 扫描结果的极值, 动态修改阈值的上下限, 取得较好的效果。本文根据广西地区不同阈值选择的实验结果, 将阈值设定为研究区 AI 扫描结果极值的 20%, 这样即考虑了广西地区地震活动整体水平的“涨落”, 也方便系统地计算研究。

2 研究资料的选取

本文研究区为广西及其邻近北部湾海域 ($20^\circ \sim 27^\circ N$, $104^\circ \sim 113^\circ E$), 选取 1970 年以来研究区发生的 13 次 $M_L \geq 4.5$ 地震作为回溯性研究震例。地震目录来源于广西地震台网中心, 统一采用 M_L 震级标度。根据广西区域测震台网发展历程 (姚宏, 2010), 将研究资料分成 1970 ~ 1986 年、1987 ~ 1993 年、1994 ~ 2006 年和 2007 ~ 2013 年 4 个时段, 采用 $G-R$ 关系分析不同时段地震目录的完整性和可靠性, 将不同时段的地震级下限选定为 $M_L 2.4$ 、 $M_L 2.2$ 、 $M_L 2.0$ 和 $M_L 1.9$ (图 1)。同一震例计算中遇到资料跨越多个时段, 统一采用震级最大的下限。

对地震目录进行前震和余震删除是该算法的一个重要环节。目前对于中强地震前震时段的选

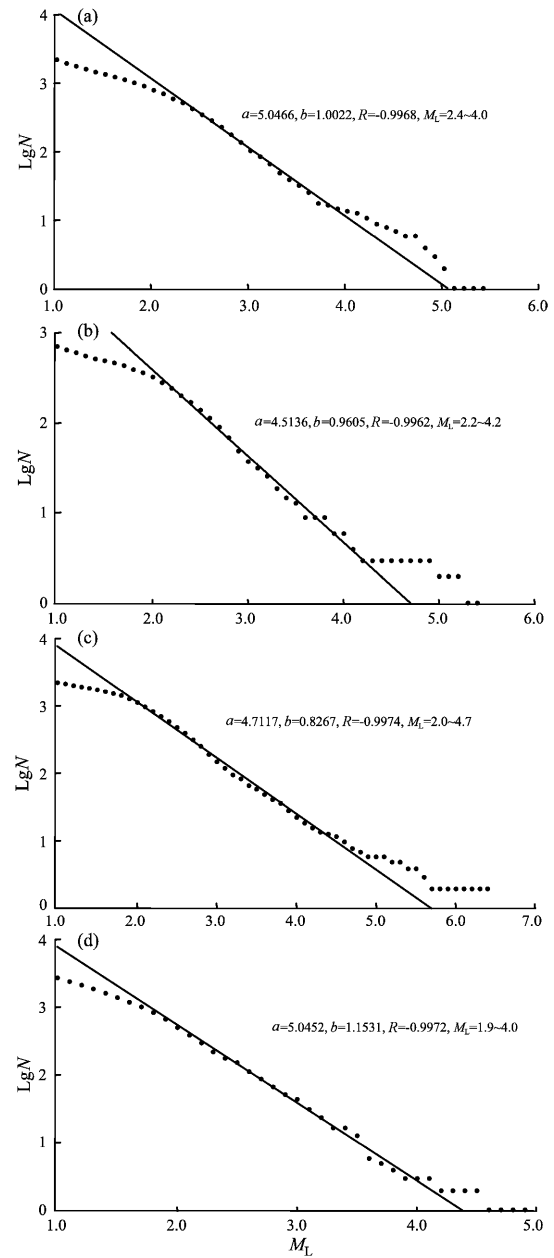


图 1 广西及其邻近北部湾海域

$M_L \geq 1.0$ 地震 $G-R$ 关系

(a) 1970 ~ 1986 年; (b) 1987 ~ 1993 年;

(c) 1994 ~ 2006 年; (d) 2007 ~ 2013 年

Fig. 1 $G-R$ relationship of $M_L \geq 1.0$ earthquakes in Guangxi and its adjacent Beibu gulf region

择尚无统一的认识 (Jones, Molnar, 1979; 林邦慧等, 1994), 林柏辰和李显智 (2007), 郑建常等 (2010) 采用该算法进行研究时发现, 在适当的范围内, 前震时段的改变对背景值的影响并不明显, 考虑到实际工作中一般将中强地震前 90 d 视为短期阶段, 本文选取震前 90 d 作为前震时段。对于

序列余震的处理,本文采用手工方法进行逐个核对删除,以最大化保证资料的完整性。按照以上选取标准,对1970年以来广西及其邻近北部湾海域中强地震的前震和余震进行了删除。

3 中强地震的回溯性研究

根据广西及其邻近北部湾海域地震活动的实际情况,对计算过程中网格大小、滑动步长、背景时段和研究时段的选取进行了对比研究,最终

选取计算窗长为 $0.6^{\circ} \times 0.6^{\circ}$,滑动步长为 0.2° ,研究时段为中强地震前1年,背景活动时段分别为研究时段前7年、5年、3年和1年共4个阶段。按以上参数分别对13次中强地震前的地震活动进行AI值空间扫描计算,并对不同背景时段的AI图像进行对比分析。结果显示,对比不同的背景时段,13次中强地震前1年的AI图像呈现出“高值异常、低值异常、无明显异常”3种不同的演化特征(表1)。由于篇幅所限,本文只展示部分典型震例的扫描结果。

表1 广西及其邻近北部湾海域 $M_L \geq 4.5$ 以上地震及 AI 值扫描结果

Tab. 1 $M_L \geq 4.5$ earthquakes in Guangxi and its adjacent Beibu Gulf region and their AI scanning results

代号	发震时间/年-月-日	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	震级 M_L	震中地名	AI 值扫描结果
a	1974-11-24	22.60	109.45	4.5	丰塘	低值异常,异常收缩
b	1977-10-19	23.40	107.48	5.4	平果	低值异常,异常逐渐收缩
c	1983-12-05	24.88	106.86	5.0	天峨	无明显异常
d	1988-11-10	21.31	108.51	5.4	北部湾	低值异常,异常逐渐增强
e	1993-02-10	23.63	107.88	4.9	大化	高值异常
f	1994-12-31	20.43	109.35	6.3	北部湾	无明显异常
	1995-01-10	20.48	109.35	6.4		
g	1995-07-25	23.21	105.86	4.7	那坡	无明显异常
h	1998-04-16	25.11	107.98	5.3	环江	无明显异常
i	2005-10-27	23.58	107.50	4.8	平果	低值异常,异常消失
j	2006-09-17	21.41	109.55	4.5	合浦	低值异常,异常逐渐消失
k	2007-07-17	25.10	107.03	4.5	天峨	高值异常,异常收缩
l	2010-09-18	25.20	106.73	4.8	罗甸、天峨交界	低值异常,异常消失
m	2013-02-20	23.80	107.41	4.9	田东、平果、巴马交界	高值异常,异常收缩

3.1 出现高值异常的典型震例分析

1993年大化4.9级、2007年天峨4.5级和2013年田东、平果、巴马交界4.9级地震前都出现了显著高值异常。图2为大化4.9级地震前AI值空间扫描结果,与震前7年背景比较,震前1年震中区60 km范围内出现显著的AI值高值异常,背景时段缩短至3年和1年,高值异常区域依然存在,异常极大值由1.168降至0.573。天峨4.5级地震前AI值空间扫描结果显示(图3),与震前3年以上背景比较,震前1年研究区的小震活动主要集中在震中100 km范围内,背景时段缩短至1年,高值异常范围缩小至震中60 km,天峨4.5级地震刚好发生在异常最显著的区域。大化4.9级和天峨4.5级地震分别发生于岩滩—大化库区和龙滩库区,结合库区地震活动的特点

分析认为震前的高值异常可能与库区蓄水的加载作用有关。

3.2 出现低值异常的典型震例分析

13次震例中,有6次震例表现为低值异常(表1),占震例总数的46%。在震前1~3年背景时段下,低值异常现象较为明显。随着背景时段的缩短,1977年平果5.4级、1988年北部湾5.4级(图4)和1974年丰塘4.5级地震(图5)前伴随出现低值异常增强或向震中位置收缩现象,2005年平果5.4级和2006年合浦4.5级地震前出现低值异常区收缩并逐渐消失现象。其中6次低值异常的震例中有5次位于非水库地区,表明广西地区的构造地震发生前1~3年背景下,震中区普遍都会出现地震活动“减速”现象,这一特征可作为广西中强地震活动的中短期异常判定指标。

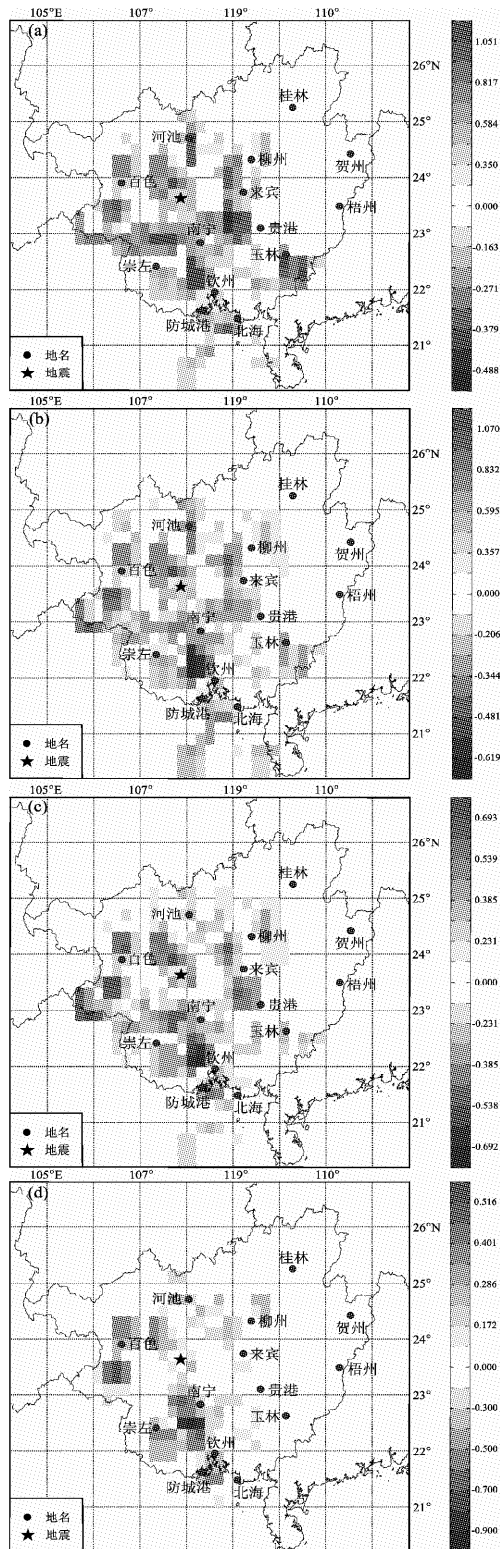


图 2 1993 年大化 $M_L 4.9$ 地震前研究时段为 1 年, 背景时段分别为 7 年 (a)、5 年 (b)、3 年 (c) 和 1 年 (d) 的 AI 指数扫描结果

Fig. 2 AI scanning result in study period of 1 year before Dahua $M_L 4.9$ earthquake in 1993 compared to background time of 7 years (a), 5 years (b), 3 years (c) and 1 year (d) respectively

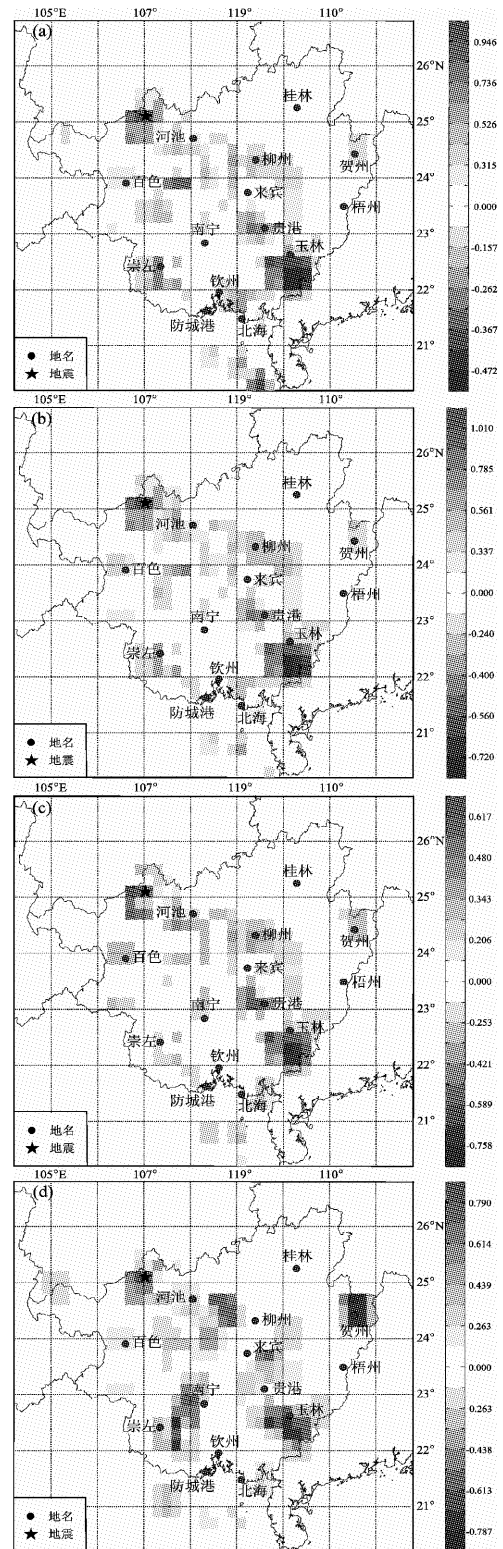


图 3 2007 年天峨 $M_L 4.5$ 地震前研究时段为 1 年, 背景时段分别为 7 年 (a)、5 年 (b)、3 年 (c) 和 1 年 (d) 的 AI 指数扫描结果

Fig. 3 AI scanning result in study period of 1 year before Tian'e $M_L 4.5$ earthquake in 2007 compared to background time of 7 years (a), 5 years (b), 3 years (c) and 1 year (d) respectively

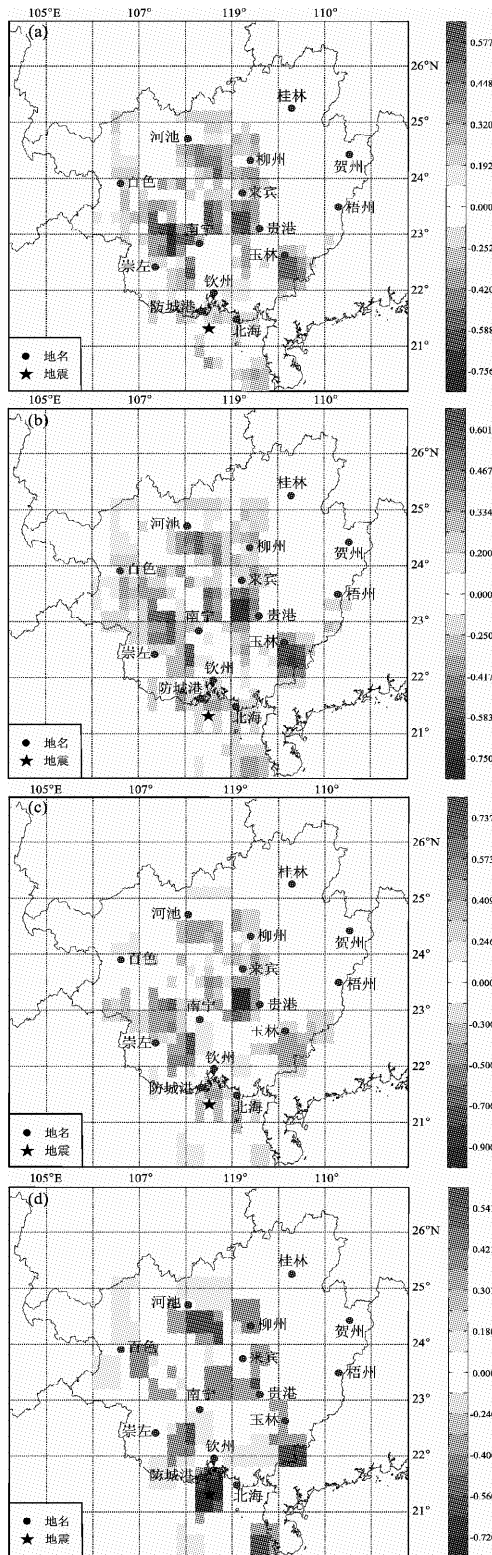


图4 1988年北部湾 $M_L 5.4$ 地震前研究时段为1年,背景时段分别为7年(a)、5年(b)、3年(c)和1年(d)的AI指数扫描结果

Fig. 4 AI scanning result in study period of 1 year before Beibu Gulf $M_L 5.4$ earthquake in 1988 compared to background time of 7 years (a), 5 years (b), 3 years (c) and 1 year (d) respectively

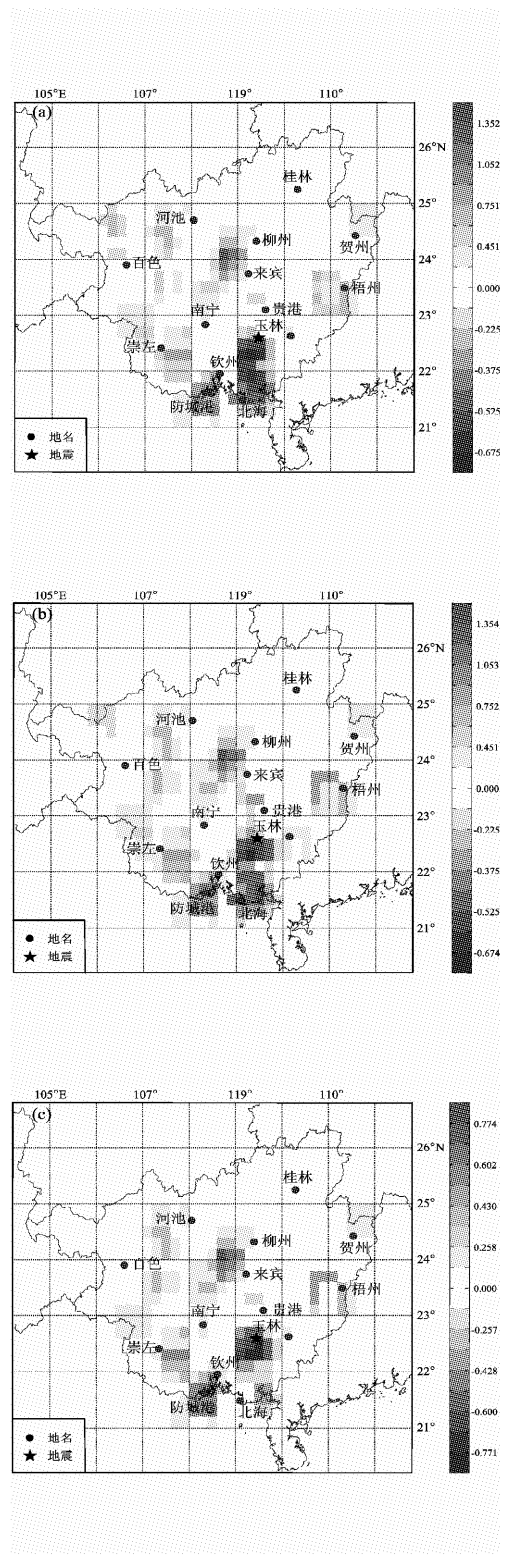


图5 1974年丰塘 $M_L 4.5$ 地震前研究时段为1年,背景时段分别为3年(a)、2年(b)和1年(c)的AI指数扫描结果

Fig. 5 AI scanning result in study period of 1 year before Fengtang $M_L 4.5$ earthquake in 1974 compared to background time of 3 years (a), 2 years (b) and 1 year (c) respectively

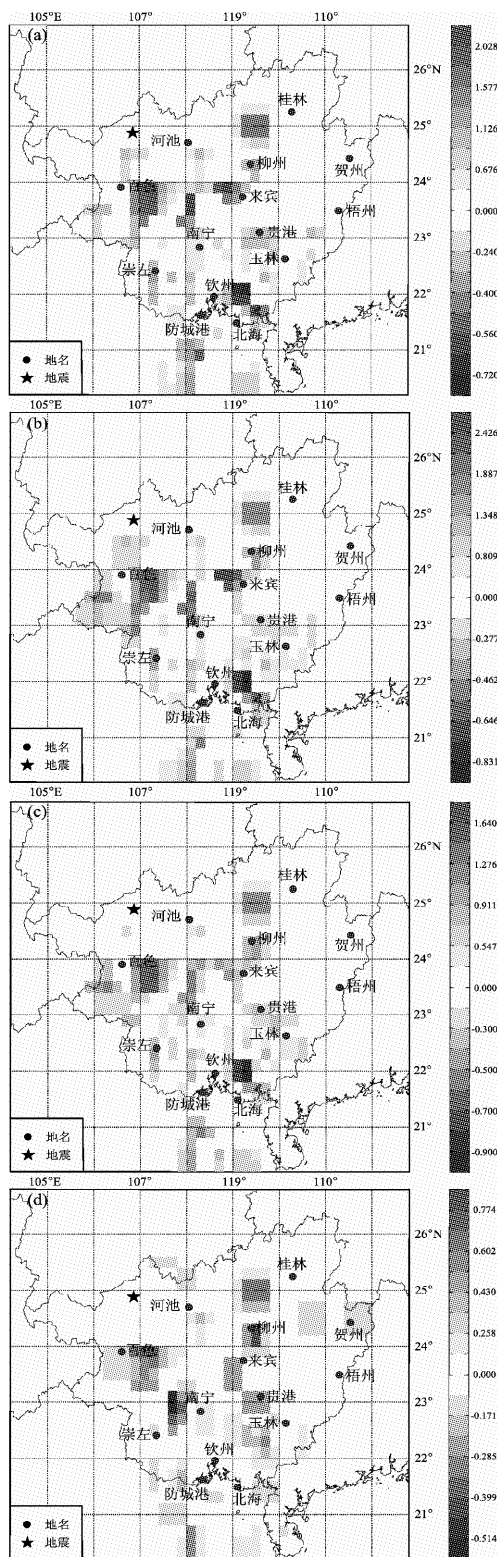


图6 1983年天峨 $M_L 5.0$ 地震前研究时段为1年, 背景时段分别为7年(a)、5年(b)、3年(c)和1年(d) AI指数扫描结果

Fig. 6 AI scanning result in study period of 1 year before Tian'e $M_L 5.0$ earthquake in 1983 compared to background time of 7 years (a), 5 years (b), 3 years (c) and 1 year respectively

3.3 无明显异常的震例分析

1983年天峨5.0级(图6)、1995年北部湾6.3、6.4级双震、1995年那坡4.7级和1998年环江5.3级地震前的AI值扫描结果未出现明显异常。这4次地震的共同特点是都发生在2000年以前,震中位于广西较偏远地区,地震监测能力相对较弱,AI值扫描结果可能受震中区附近地震记录不完整的影响。

4 结论

(1) 对1970年以来广西及其邻近北部湾海域13次4.5级以上中强震进行AI值空间扫描,分析了每次地震前1年小震活动相对不同背景时段的扫描图像,发现有9次地震前出现了AI值扫描异常,其中6次为低值异常,3次为高值异常,异常现象在1~3年背景下较突出。6次低值异常震例中有5次位于非水库地区,表明震前AI值低值异常是广西地区中强构造地震孕育过程中较普遍存在的现象。4次位于水库地区的震例中有2次出现AI值高值异常,1次出现低值异常,表明水库地区中强地震前通常会表现出高值或低值异常。无明显异常的4次震例都位于广西地震台网的网缘地区,扫描结果可能受区域监测能力相对较弱的影响。

(2) 对广西及其邻近北部湾海域 $M_L \geq 4.5$ 地震的回溯性统计检验结果表明,在小震目录较为完整的情况下,中强地震震中区及附近区域震前1年的小震活动与之前1~7年的活动背景相比,会出现明显的“加速”或“减速”现象,1~3年背景下异常现象较为显著,这显示广西中强地震可能存在中短期尺度的“前兆性”异常。虽然部分震例AI值扫描图像的异常范围较大,但是异常变化最显著的区域基本都位于研究震例所在的地区,可通过对不同背景时段扫描图像的比较分析,锁定未来中强地震的发震区域。因此,AI算法对广西地区中强地震具有一定的预测预报效能,可为该地区开展地震趋势分析提供新的判定指标,同时可供其它少震弱震区参考借鉴。值得注意的是,起算震级的确定、余震记录的删除、背景时段和研究时段的选取、研究窗长和扫描步长的选择是AI算法的关键,应用中应当结合研究区的实际情况具体分析。

感谢郑建常博士提供计算程序。

参考文献:

- 陈学忠,尹祥础,宋治平. 1996. 云南普洱地区 6 级以上地震前的 Y 值异常特征[J]. 地震研究, 19(4): 352-356.
- 冯建刚,周龙泉,杨立明,等. 2009. 青藏块体东北缘中强地震前小震频度异常研究[J]. 地震, 29(3): 19-26.
- 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.
- 林柏辰,李显智. 2007. 地震数目改变率的计算及应用[D]. 台湾:国立中央大学土木工程学研究所, 1-84.
- 林邦慧,李大鹏,刘杰,等. 1994. 前震和前震序列的研究[J]. 地震学报, 16(A00): 24-38.
- 罗贵安,宋治平,尹祥础,等. 1996. 云南永善 7.1 级地震前加卸载响应比的时空异常特征[J]. 地震研究, 19(2): 134-139.
- 姚宏. 2010. 广西区域测震台网监测能力评定[J]. 地震地磁观测与研究, 19(1): 107-113.
- 尹祥础,余怀忠,张永先,等. 2004. 态矢量—分析地震活动性的一种新方法[J]. 中国地震, 20(1): 31-39.
- 余怀忠,程佳. 2011. 态矢量方法及其应用研究[J]. 地球物理学进展, 26(1): 32-40.
- 郑建常,冀东普,王鹏,等. 2010. 华东地区地震活动加速指数 AI 算法应用探讨[J]. 地震, 30(3): 129-139.
- Bufe C. G., Varnes D. J. . 1993. Predictive modeling of the seismic cycle of the greater San Francisco Bay Region[J]. J. Geophys. Res. , 98(B6): 9 871-9 883.
- Jaumé S. C. , Sykes L. R. . 1999. Evolving towards a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquake[J]. Pure Appl. Geophys. , 155(2-4): 279-306.
- Jones, I. M. , Molnar P. . 1979. Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults[J]. J. Geophys. Res. , 84(B7): 3 596-3 608.
- Knopoff L. , Levshina T. , Keilis-Borok V. I. , *et al.* 1996. Increased long-range intermediate-magnitude earthquake activity prior to strong earthquakes in California[J]. J. Geophys. Res. , 101(B3): 5 779-5 796.
- Nanjo K. Z. , Rundle J. B. , Holliday J. R. , *et al.* 2006. Pattern informatics and its application for optimal forecasting of large earthquakes in Japan[J]. Pure Appl. Geophys. , 163: 2 417-2 432.
- Reichl L. E. . 1980. A Modern Course in statistical Physics[D]. Texas: University of Texas Press.
- Rundle J. B. , Klein W. , Tiampo K. , *et al.* . 2000a. Linear pattern dynamics in nonlinear threshold systems[J]. Phys. Rev. E. , 61(3): 2 418-2 431.
- Rundle J. B. , Klein W. , Turcotte D. L. , *et al.* 2000b. Precursory seismic activation and critical-point phenomena[J]. Pure Appl. Geophys. , 157(11-12): 2165-2182.
- Smith S. W. , Sammis C. G. . 2004. Revisiting the tidal activation of seismicity with a damage mechanics and friction point of view[J]. Pure Appl. Geophys. , 161(11/12): 2 393-2 404.
- Sornette D. , Sammis C. G. . 1995. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: implications for earthquake prediction[J]. J. Phys. I. , 5(5): 607-619.
- Trotta J. E. , Tullis T. E. . 2006. An independent assessment of the load/unload response ratio (LURR) proposed method of earthquake prediction[J]. Pure Appl. Geophys. , 163(11/12): 2 375-2 387.
- Yin X. C. , Chen X. Z. , Song Z. P. , *et al.* 1995. A new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory[J]. Pure Appl. Geophys. , 145(34): 701-715.
- Yin X. C. , Mora P. , Peng K. Y. , *et al.* 2002. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction [J]. Pure Appl. Geophys. , 159(10): 2 511-2 523.
- Yin X. C. , Wang Y. C. , Peng K. Y. , *et al.* 2000. Development of a new approach to earthquake Prediction-load/unload response ratio (LURR) theory[J]. Pure Appl. Geophys. , 157(11/12): 2 365-2 383.

Retrospective Research for $M_L \geq 4.5$ Earthquakes in Guangxi and its Adjacent Beibu Gulf Region by AI Algorithm

YAN Chun-heng¹, ZHOU Bin¹, LU Li-juan¹, GAN Yan-feng², GUO Pei-lan¹

(1. *Earthquake Administration of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, Guangxi, China*)

(2. *Earthquake Disaster Prevention and Emergency Rescue Office of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, Guangxi, China*)

Abstract

By using the improved Acceleration Index algorithm (AI), we did a retrospective research for $M_L \geq 4.5$ earthquakes in Guangxi and its adjacent Beibu gulf region since 1970. The results show that the AI index can show the quantification change degree of strengthening or weakening activity of micro-earthquakes before the moderate-to-strong shocks, and the outstanding feature is more remarkable in 1 year before the moderate-to-strong shock compared to background time of 1 ~ 3 years. It will provide a new identification index for short-in-intermediate-term seismic tendency analysis.

Key words: AI algorithm; micro-earthquakes activity; retrospective statistic; Guangxi region