

苏珊, 郭培兰. 广西及邻区  $b$  值变化特征[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 102–108. [SU Shan, GUO Peilan. Variation Characteristics of  $b$  Value in Guangxi and Its Adjacent Areas[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 102–108]

## 广西及邻区 $b$ 值变化特征

苏珊, 郭培兰

(广西壮族自治区地震局, 南宁 530000)

**摘要:** 基于广西台网提供的地震目录, 利用中国地震局地球物理研究所编制的基于格点搜索的  $b$  值分析程序, 对广西及邻区进行  $b$  值时空分析。  $b$  值空间分布结果表明: 研究区存在两个  $b$  值显著变化区域, 分别为广西中西部  $b$  值显著下降区和粤桂交界  $b$  值显著上升区, 两个区域内分别发生了2019年靖西 5.2级和2019年北流 5.2级地震。计算这两个区域的  $b$  值时间变化情况: 广西中西部地区在长时间  $b$  值下降的背景下, 震前一年左右时间内出现  $b$  值显著的回升后快速降低转折, 而后发生靖西 5.2级地震, 结合2008年汶川 8.0级地震和2011年日本东北 9.0级地震相似的  $b$  值分析结果, 认为该种  $b$  值变化特征具有显著前兆意义; 粤桂交界区域2019年10月发生北流 5.2级地震, 发震前后  $b$  值上升态势不变, 结合地下速度结构分析, 认为北流地震具有明显的坚固体孕震特征, 是  $b$  值升高异常的成因。

**关键词:**  $b$  值; 靖西地震; 北流地震

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0102-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.14

## Variation Characteristics of $b$ Value in Guangxi and Its Adjacent Areas

SU Shan, GUO Peilan

(Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China)

**Abstract:** Based on the earthquake catalogue provided by Guangxi Seismic Network and the  $b$  value analysis program based on grid search compiled by Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, this paper makes a spatial-temporal analysis of  $b$  value in Guangxi and its adjacent areas. The results show that there are two regions with significant changes of  $b$  value in study area, namely, the region with significant decrease of  $b$  value in the central and western part of Guangxi and the region with significant increase of  $b$  value at the junction of Guangdong and Guangxi, and the Jingxi  $M5.2$  earthquake in 2019 and the Beiliu  $M5.2$  earthquake in 2019 occurred in the two regions respectively. The time variation of  $b$  value in these two regions is calculated: Under the background of long-term  $b$  value decline in the central and western regions of Guangxi, the  $b$  value rises significantly in about one year before the earthquake and then decreases rapidly, followed by the Jingxi 5.2

收稿日期: 2022-02-22

基金项目: 地震科技星火项目计划(XH22004YA); 广西局科研合同制项目(202102)联合资助。

作者简介: 苏珊(1992-), 女, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事地震预测研究、地震震源机制解、应力场反演及  $b$  值计算研究工作。

E-mail: 373987408@QQ.com

earthquake. Based on the similar  $b$  value analysis results of the Wenchuan  $M8.0$  earthquake in 2008 and the Tohoku  $M9.0$  earthquake in 2001, it is considered that the variation characteristics of  $b$  value has significant precursory significance. The Beiliu  $M5.2$  earthquake occurred in the junction area of Guangdong and Guangxi in October 2019, and the rising trend of  $b$  value was unchanged before and after the earthquake. Combining with the analysis of underground velocity structure, it is considered that the Beiliu earthquake has obvious seismogenic characteristics of solid body, which is the cause of the abnormal rise of  $b$  value..

**Keywords:**  $b$  value; Jingxi earthquake; Beiliu earthquake,

## 0 引言

2008年至2021年,广西及邻区先后发生平果  $M4.5$ 、苍梧  $M5.4$ 、北流  $M5.4$ 和靖西  $M5.2$ 等13次4级以上地震,地震活动显著增强,多数地震沿桂西地区的北西—南东向断裂呈带状分布,桂东南的北东—南西向断裂发生了两次5级以上地震(图1)。广西及邻区地处地震活跃的川滇地区与相对稳定的华南地块过渡地带,区内地震分布具有明显的分区特征,整体为西强东弱。既往研究表明,区域应力环境与地震发生机理和孕震过程等密切相关,其变化趋势是地震危险性研判的重要指标,亟待进一步研究。

1944年 Gutenberg 和 Richter<sup>[1]</sup>提出的震级—频度公式( $G-R$ 关系) $\lg N=a-b \times M$ ,其中  $b$ 值时地震学中最重要地震活动性参数之一。实验室岩石声发射微震实验结果表明,应力与  $b$ 值之间存在一个负相关关系,当应力增强时,  $b$ 值降低,而当应力减弱时,  $b$ 值升高,这一关系在真实的地震活动中也得到体现,  $b$ 值也因此被作为地下应力指示计<sup>[2-6]</sup>。大震分发生与地下应力的集中增强密切相关,而  $b$ 值与应力的负相关关系使它的时空变化特征对于地震危险性评估和地震预报有着重要意义。在实际应用中,  $b$ 值的时空变化与大震的发生关系往往更为复杂。对川滇1981年以来19次  $M6.5$ 地震与  $b$ 值的时空分布关系研究结果表明,川滇地区  $b$ 值空间分布特征与强震活动之间联系并不显著,但震前  $b$ 值的时间分布呈现系统地下降,58%的震源区的  $b$ 值在强震前出现显著下降趋势<sup>[7]</sup>。陈学忠等<sup>[8-9]</sup>对1976年唐山  $M7.8$ 和2019年长宁  $M7.8$ 地震前  $b$ 值时空变化特征进行研究,结果表明这两次地震前出现显著的  $b$ 值下降现象。史海霞等<sup>[10]</sup>在对2008年汶川  $M8.0$ 地震前  $b$ 值时空变化特征的研究中发现,震前  $b$ 值从2002年始至地震前呈现出一个长期趋势性减小,而后出现持续约两年的稳定

并略有上升趋势,在地震前约半年,出现快速、显著的下降,这个结果与与 Nanjo 等<sup>[11]</sup>报道的日本东北9.0级地震前  $b$ 变化特征非常相似。本文将系统的研究2008年以来广西及邻区  $b$ 值的时空变化,探索其与区域中强震孕育之间的联系,为地震风险评估提供参考。

## 1 资料和研究方法

### 1.1 研究资料的选取

本文将广西及邻区( $104^{\circ} \sim 113^{\circ}E$ ,  $20^{\circ} \sim 27^{\circ}N$ )作为研究区,广西地区2008年1月广西数字测震台网竣工投入正式运行<sup>[12]</sup>,区域监测能力得到较大提升,因此选取研究区内2008年1月至2022年3月地震目录作为计算  $b$ 值的基础数据。根据在此期间研究区域内的地震震级—频度( $G-R$ 关系)分布图(图2),震级在  $M_L1.5 \sim 4.3$ 的范围内  $G-R$ 关系线性拟合效果最好,确定最小完备性震级  $M_C=M_L1.5$ ,震级上限为  $M_L4.3$ 。

### 1.2 $b$ 值分析方法

本文采用基于格点搜索的  $b$ 值分析方法程序对研究区进行  $b$ 值时空分析<sup>[13]</sup>。该程序选用最大似然法<sup>[14]</sup>来计算  $b$ 值:

$$b = \frac{\log e}{\bar{M} - M_{\min}} \quad (1)$$

$b$ 值95%的置信概率为:

$$\sigma(b) = 1.96 \frac{b}{\sqrt{N-1}} \quad (2)$$

其中  $\bar{M}$ 为平均震级,  $M_{\min}$ 为所给地震事件样本中的最小震级,  $N$ 为样本数量。

在计算  $b$ 值随时间的变化时,采用基于地震事件数量选取窗长和步长的方法,即选取等事件数量作为计算  $b$ 值的窗长,并将窗口以等事件数量的增量进行滑动,使得各个时间节点上用于计算  $b$ 值

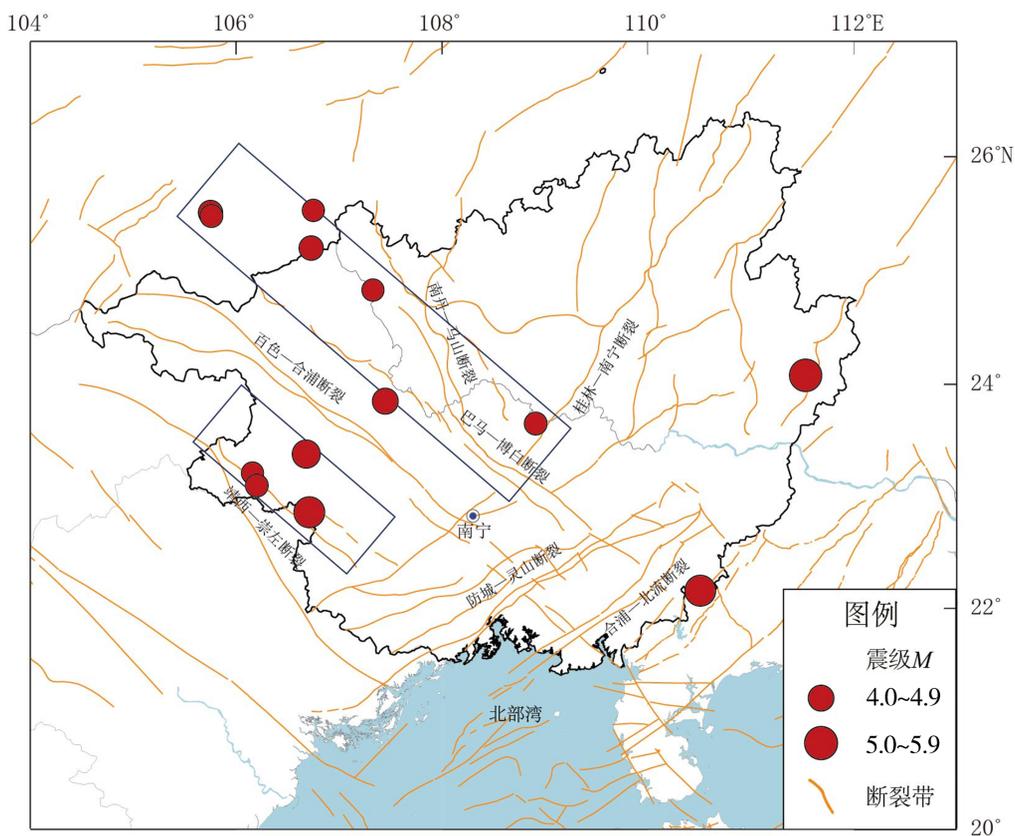


图1 2008年以来广西及邻区  $M_4$  级以上地震分布

Fig.1 Distribution of earthquakes with  $M \geq 4$  in Guangxi and its adjacent areas since 2008

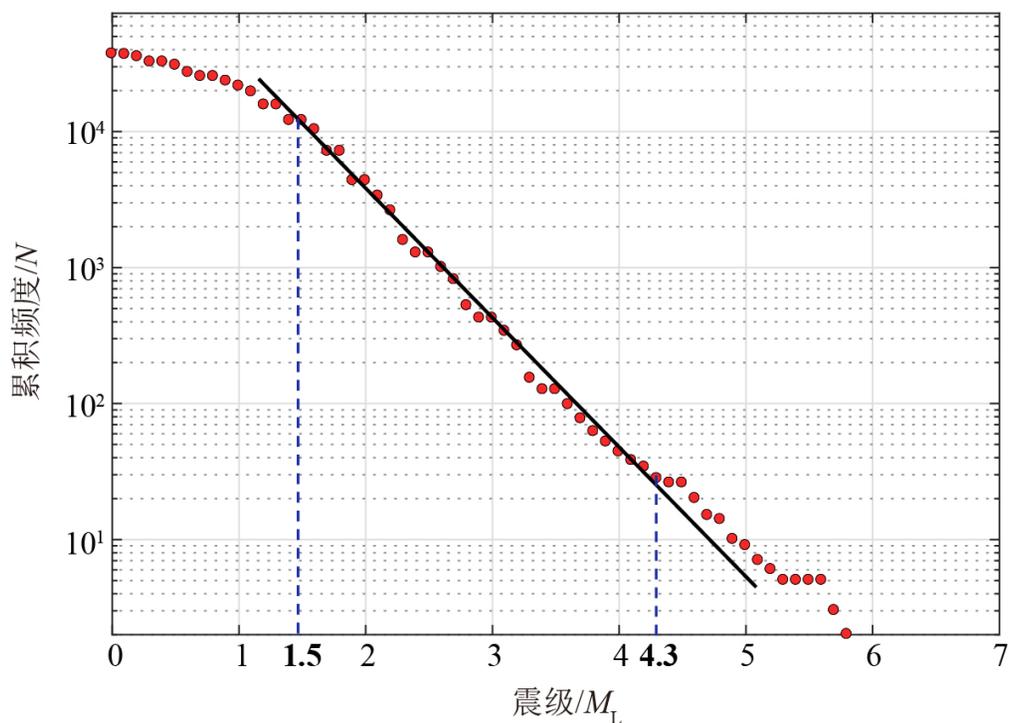


图2 2008年1月至2022年3月广西及邻区地震震级-频度 ( $G-R$ ) 关系

Fig.2 The  $G-R$  relationship between magnitude and frequency of earthquakes in Guangxi and its adjacent areas from January 2008 to March 2022

的地震事件数量是均匀的, 确保计算结果不受样本量变化的影响。

计算**b**值在空间上的变化特征时, 首先将研究区划分为一定大小的格点, 以格点为中心选取固定大小的正方形区域作为它的空间窗, 计算每个空间窗内**b**值随时间的变化曲线, 而后, 挑选出研究区内**b**值显著下降的格点, 并将其作为异常点, 多个异常点集中的区域作为**b**值异常区。选取这个异常区内的地震计算**b**值随时间的变化, 从而可以得到整个**b**值异常区的范围及其**b**值随时间变化的特征。本文将研究区划分为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的格点, 选取的空间窗大小为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。

对于**b**值的时间变化曲线**b(t)**, **b**值的相对变化表示为:

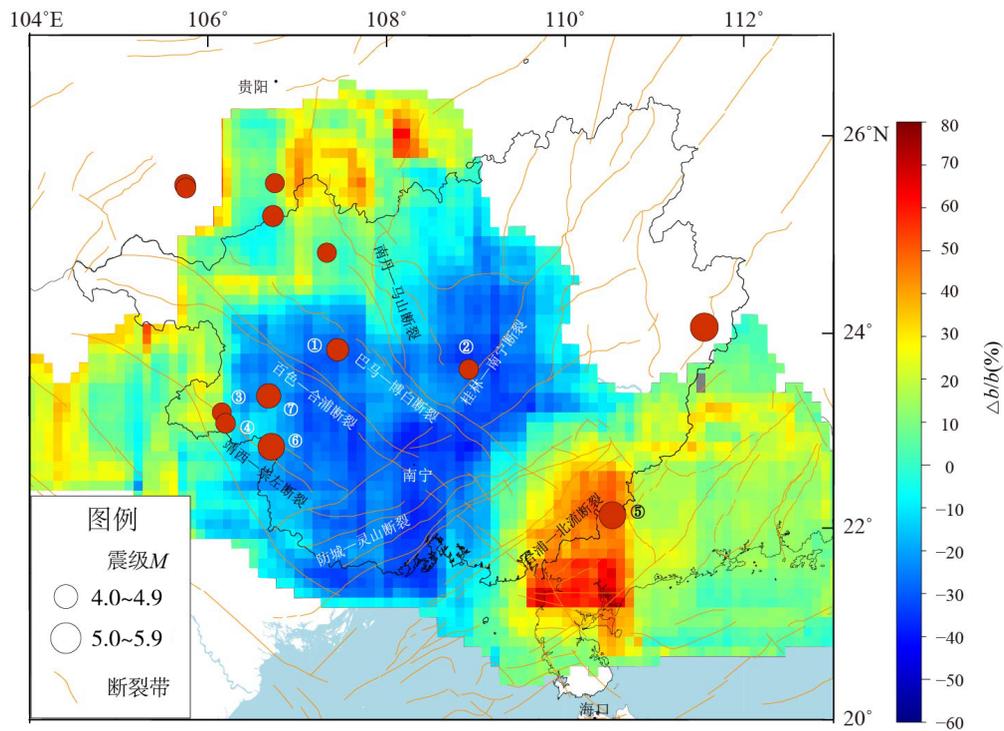
$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{b_2 - b_1}{b_1} \times 100 \quad (3)$$

其中 $b_1$ 是时间 $t_1$ 的**b**值, 而 $b_2$ 是时间 $t_2$ 的。通过计算各节点**b**值的相对变化, 可以得到**b**值相对变化的空间分布。

## 2 结果

本文将研究区划分为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的格点, 选取的

空间窗大小为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ , 每个格点以100个地震计算**b**值, 每3个地震向前滑动计算时间变化曲线。Lei<sup>[15]</sup>研究发现, 统计窗口中事件数量越大, **b**值曲线越平滑, 事件数量越少, **b**值演化的分辨率越高。经过试算后, 最终确定100个地震事件为窗长、3个事件为步长, 在保证**b**值变化信息不丢失的情况下尽量平滑曲线, **b**值置信概率为95%。在计算过程中, 如果格点内得到**b**值数量较少, 则其时间曲线上节点的均匀性可能较低, 无法反应出可靠的**b**值变化信息<sup>[8]</sup>。我们设定时间曲线上最少数据点数为10个, 最终共得到研究区内4014个格点的**b**值随时间变化曲线。图3展示了2008年以来研究区内**b**值变化的空间分布情况: 广西中西部地区存在一个显著的**b**值下降区域, 覆盖靖西—崇左、百色—合浦、巴马—博白三条北西向断裂和桂林—南宁、防城—灵山两条南东向断裂, 也是这五条断裂的交汇区域。该**b**值下降区域先后发生了5次M4以上地震, 包括2019年11月25日靖西M5.2和2021年8月4日德保M4.8地震; 位于广西东南部粤桂交界区域的合浦—北流断裂附近存在一个**b**值上升区域, 于2019年10月12日发生北流M5.2地震。



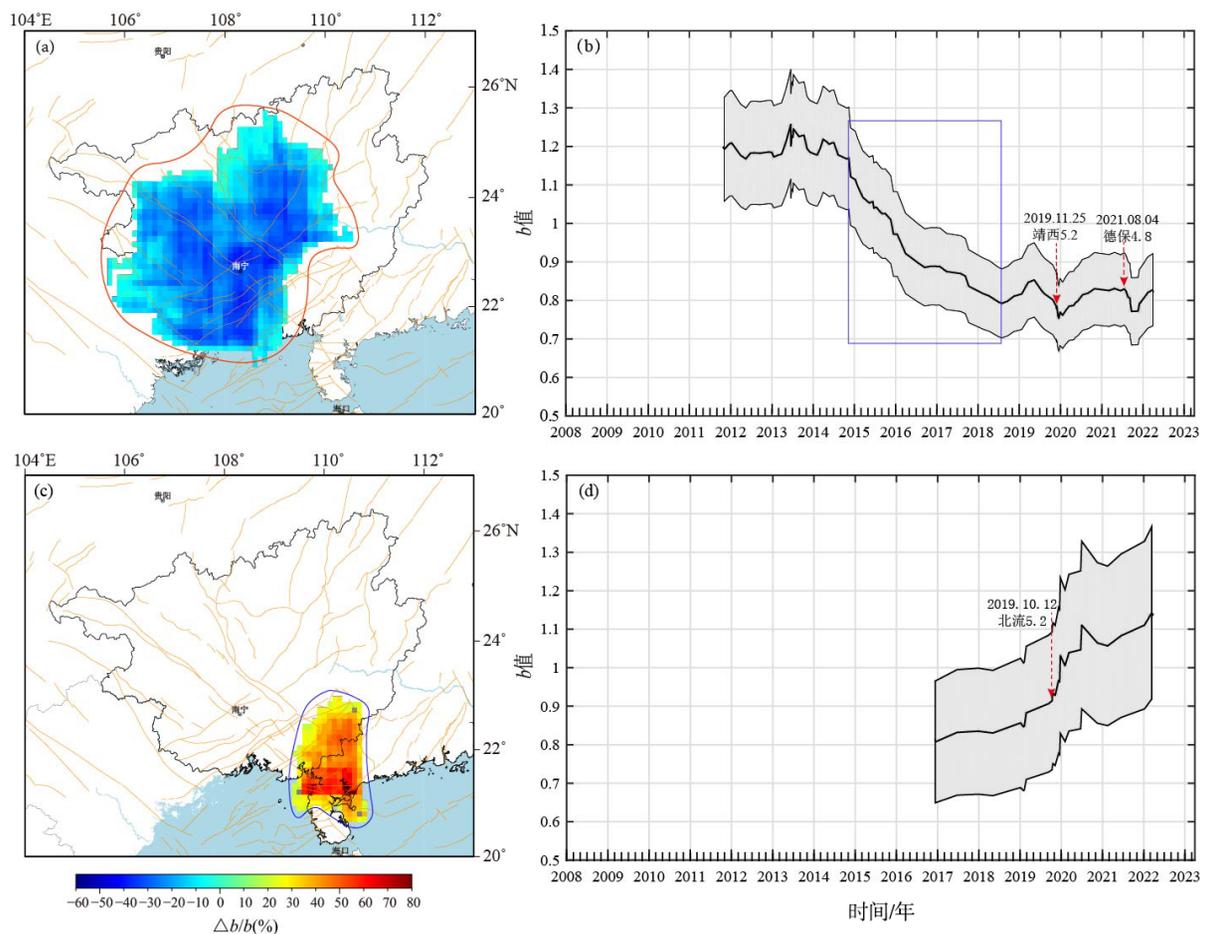
(发生在**b**值下降或上升区域的M4以上地震: ①2013-02-20平果M4.5; ②2016-09-17来宾M4.1; ③2017-08-15靖西M4.0; ④2017-10-03靖西M4.1; ⑤2019-10-12北流M5.2; ⑥2019-11-25靖西M5.2; ⑦2021-08-04德保M4.8)

图3 2008-01—2022-03广西地区**b**值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of *b* value in Guangxi from January 2008 to March 2022

为分析研究区内  $b$  值显著变化区域的时间曲线, 本文筛选了  $b$  值下降超过 10% 和上升超过 30% 的区域(图 4(a), (c)), 分别计算  $b$  值在这两个区域的时间变化情况。受区域范围和地震数量的影响,  $b$  值下降区域以 300 个地震为时间窗 10 个地震滑动计算  $b$  值(图 4(b)), 上升区域以 100 个地震为时间窗 5 个地震滑动计算  $b$  值(图 4(d))。最终结果显示,  $b$  值下降区域在 2019 年靖西  $M5.2$  地震之前, 存在一个近 4 年的长时间  $b$  值下降(图 4(d))

方框内), 2014 年 11 月至 2018 年 8 月  $b$  值从 1.17 下降到了 0.8, 而后  $b$  值出现显著的回升, 持续六个月至 2019 年 4 月, 2019 年 5 月开始  $b$  值再次下降直至发震。靖西 5.2 级地震后,  $b$  值短暂回升转平之后发生 2021 年德保  $M4.8$  地震。在粤桂交界地区, 2019 年北流 5.2 级地震前  $b$  值处于从低值上升阶段, 震后而后出现短暂的  $b$  值上升速率增加, 约一年后恢复震前上升速率。



(a)  $b$  值下降超过 10% 的区域; (b)  $b$  值下降区域时间变化曲线; (c)  $b$  值上升超过 30% 的区域; (d)  $b$  值上升区域时间变化曲线

图 4 2008-01—2022-03 广西及邻区  $b$  值空间分布和时间变化情况

Fig.4 Spatial distribution and temporal variation of  $b$  value in Guangxi and its adjacent areas from January 2008 to March 2022

### 3 讨论

孟昭彤等<sup>[16]</sup>根据以往震列总结出了 4 种大震前  $b$  值随时间变化的类型: ①在大地震发生之前的几年时间,  $b$  值升高, 主震发生之后,  $b$  值下降; ②在大地震发生之前几年,  $b$  值降低, 主震发生之后,  $b$  值升高; ③大震发生前  $b$  值会明显下降, 并

在回升过程中发生大震; ④在大地震发生前,  $b$  值升高, 但在主震前短时间内有下降的前兆。显然图 4(b) 中展示的  $b$  值变化情况与以上 4 种类型皆不相符, 靖西地震发生在长时间  $b$  值下降导致的低  $b$  值背景下, 发震前出现显著的回升后快速降低转折。这种  $b$  值变化特征与 2008 年汶川 8.0 级地震<sup>[10]</sup> 和 2011 年日本东北 9.0 级地震非常相似。一般认为,  $b$  值与应力呈反比, 地下高应力状态更有利于

地震的发生,大震之前低 $b$ 值的特性已经得到普遍验证<sup>[17-20]</sup>。广西中西部地区长时间的 $b$ 值下降反映了区域内应力的持续性增强,而GNSS基线结果显示,华南块体西部2011至今持续受到川滇地块的顺时针压扭作用,为区域应力增强提供了动力来源<sup>[21]</sup>。马瑾等<sup>[22]</sup>通过对地震前亚失稳状态的研究,将粘滑型地震孕育分为平稳变形,偏离线性,亚失稳,失稳和失稳后5个阶段,其中偏离线性阶段是应力释放的开始,在此阶段处于由应力积累向应力释放的过渡阶段,应力释放尚不占优势,亚失稳阶段应力释放逐步占据优势。这或许可以解释靖西地震前一年左右出现的 $b$ 值上升再下降的扰动变化现象,即 $b$ 值上升意味着地震孕育处于偏离线性阶段,在这个阶段应力累积已经结束而释放并未完全开始,造成了阶段性的区域地震活动性减弱, $b$ 值上升。而后地震孕育进入亚失稳阶段,应力释放逐渐显著, $b$ 值也同步下降,直至失稳,地震发生。图4(d)中展示的 $b$ 值上升区于2019年10月12日发生北流5.2级地震,地震前后,除了震后余震造成的相对短时间的 $b$ 值扰动,其上升的整体态势不变,这不同于研究领域对于震前 $b$ 值下降的一般认识。1996年丽江 $M7$ 地震震前同样具有高 $b$ 值动态演化特点,同时震中及震后余震区位于高波速比异常区<sup>[23]</sup>,其所反映出的孕震模式被称为坚固体孕震模式,即非均匀地壳中高速扰动体(坚固体)的存在是局部地区应力高度集中的根本条件,当高速扰动体被低速扰动区包围时,即震源体的刚度比四周的环境刚度大时可以满足失稳条件导致突然破裂发生大地震;否则可以导致缓慢破裂而不发生大地震<sup>[24]</sup>,区域出现高 $b$ 值特征。黄强强等<sup>[25]</sup>针对北流地震震源区短周期密集台阵背景噪声成像的研究结果表明,震源区存在NNW-SSE向的高速异常,而震中上方为上凸形态的高速异常,这些高速异常可能为中生代花岗岩基,这种局部异常高速体可能是华南“马赛克”结构中微陆块在上地壳中的延伸,上地壳结构的不均匀性和大尺度构造相互作用,会在局部区域导致应力积累,从而引发中强地震,这种地震成因机理与坚固体孕震模式非常类似,推测为北流地震震源区及周边 $b$ 值持续上升的根本原因。

事实上靖西5.2级地震前 $b$ 值变化特征并不孤立,考虑 $b$ 值地下应力计的性质,其所反应的区域应力累积、释放等与地震孕震相关内在机制还有待深入研究。但不能否认,在 $b$ 值长期下降的背景

下其值出现先上升后下降的变化形态是具有明显的前兆意义的,需要持续关注,同时这种 $b$ 值变化特征对于中强地震的普适性还需要深入研究。北流地震前后区域内 $b$ 值始终升高的现象,与地震孕震模式密切相关,震源区地下高速异常表明其具有明显的坚固体孕震特征。

## 4 结论

本文基于广西台网提供的地震目录,利用基于格点搜索的 $b$ 值分析方法程序,对研究区进行 $b$ 值时空分析,主要认识如下:

(1)华南西部存在两个 $b$ 值显著变化区域,分别为广西中西部 $b$ 值显著下降区和粤桂交界 $b$ 值显著上升区,这两个区域内分别发生的2019年靖西5.2及地震和2019年北流5.2级地震。

(2)广西中西部地区在长时间 $b$ 值下降导致的低 $b$ 值背景下,出现显著的回升后快速降低转折,而后发生靖西5.2及地震。这种 $b$ 值变化特征与2008年汶川8.0级地震和2001年日本东北9.0级地震震前区域 $b$ 值变化非常相似,具有明显前兆意义。

(3)粤桂交界区域2019年10月发生北流5.2级地震,发震前后 $b$ 值上升态势不变,结合地下速度结构分析,认为其具有明显的坚固体孕震特征,从而导致 $b$ 值升高异常。

## 参考文献

- [1] Gutenberg R, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Bull Seism Soc Am, 1944, 34(4): 185-188.
- [2] Scholz C H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. Bull Seism Soc Am, 1968(58): 399-415.
- [3] Weeks J, Lockner D, Beyerlee J. Change in  $b$ -values during movement on cut surfaces in granite[J]. Bull Seism Soc Am, 1978, 68(2): 333-341.
- [4] Weiss J. The role of attenuation on acoustic emission amplitude distributions and  $b$ -values[J]. Bull Seism Soc Am, 1997, 87(5): 1362-1367.
- [5] Schorlemmer D, Wiemer S, Wyss M. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes[J]. Nature, 2005, 437(22): 539-542.
- [6] Tormann T, Wiemer S, Metzger S, et al., Size distribution of Parkfield's microearthquakes reflects changes in surface creep rate[J]. Geophys J Int, 2013, 193: 1474-1478.
- [7] 王辉, 曹建玲, 荆燕, 等. 川滇地区强震活动前 $b$ 值的时空

- 分布特征[J]. 地震地质, 2012, 34(03): 531-543.
- [8] 陈学忠, 李艳娥, 陈丽娟. 唐山  $M_s$ 7.8地震前  $b$  值异常特征[J]. 地球物理学报, 2021, 64(10): 3612-3618.
- [9] 陈学忠, 李艳娥, 宫悦, 等. 2019年四川长宁  $M_s$ 6.0地震前破裂区内视应力和  $b$  值的变化[J]. 地震科学进展, 2021, 51(02): 49-58.
- [10] 史海霞, 孟令媛, 张雪梅, 等. 汶川地震前的  $b$  值变化[J]. 地球物理学报, 2018, 61(05): 1874-1882.
- [11] Nanjo K Z, Hirata N, Obara K, et al. Decade-scale decrease in  $b$  value prior to the  $M9$ -class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes[J]. J Geophys Res, 2012, 39(20): 120304-1-120304-4. DOI: 10.1029/2012GL052997.
- [12] 姚宏. 广西区域数字地震台网建设与发展[J]. 华南地震, 2011, 31(04): 29-38. DOI: 10.13512/j.hndz.2011.04.007.
- [13] Chen Xuezhong, Li Yane, Chen Lijuan. The characteristics of the  $b$ -value anomalies preceding the 2004  $M_w$ 9.0 Sumatra earthquake[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2022, 13(01): 390-399.
- [14] Aki K. Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N=a-bM$  and its confidence limits[J]. Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 1965(43): 237-239.
- [15] Lei X. Evolution of  $b$ -value and fractal dimension of acoustic emission events during shear rupture of an immature fault in granite[J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2498.
- [16] 孟昭彤, 刘静伟, 谢卓娟, 等.  $b$  值的时空分布特征与地震危险性的关联分析[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(01): 30-38.
- [17] Wiemer S, Wyss M. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times? [J]. J Geophys Res, 1997, 102(B7): 15115-15128.
- [18] 易桂喜, 闻学泽, 苏有锦. 川滇活动地块东边界强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1719-1725.
- [19] 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2008年汶川  $M_s$ 8.0地震前龙门山—岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布[J]. 地球物理学报, 2011, 54(06): 1490-1500.
- [20] 闻学泽, 范军, 易桂喜, 等. 川西安宁河断裂上的地震空区[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(7): 797-807.
- [21] 黄惠宁, 郭培兰, 阎春恒, 等. 华南西部地区近期中强地震前定点形变异常特征分析[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 127-136.
- [22] 马瑾, S I SHERMAN, 郭彦双. 地震前亚失稳应力状态的识别—以  $5^\circ$  拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(05): 633-645.
- [23] 陈兴凯, 蔡静观. 丽江7级地震前高  $b$  值演化过程和孕震模式[J]. 地震研究, 1999(04): 330-336.
- [24] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)—一固体孕震模式的由来与证据[J]. 地震学报, 1995(03): 273-282.
- [25] 黄强强, 沈旭章, 王文天, 等. 广西北流地震震源区短周期密集台阵背景噪声成像[J]. 地球物理学报, 2022, 65(08): 2917-2930.