

小滇西地区 $M \geq 5$ 地震前 b 值时空变化特征^{*}

王光明, 付虹[✉], 孔德育, 李永莉

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 同时使用完整地震目录和去余震目录, 采用最大似然法对小滇西地区进行 b 值时空扫描, 研究该地区 $M \geq 5.0$ 地震前 b 值的时空变化特征。结果显示: 2 种地震目录 b 值时间曲线的整体变化趋势无明显的差异, 去余震目录的空间扫描结果低值异常更加突出; 小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震前, b 值随时间变化趋势呈现出多样化的特征, 但是 75% 的地震发生之前, 该地区处于低 b 值状态; 该地区 $M \geq 5.0$ 地震均发生在低 b 值区域或者高低 b 值过渡地区。另外, 在不同空间尺度的 b 值时间曲线中, 均发现了较长时间的低 b 值现象, 尽管起始时间不同, 但是结束时间相同, 分析认为该现象可能是 2014 年盈江 $M6.1$ 地震的前兆异常。因此, 小滇西地区低 b 值是本区 $M \geq 5.0$ 地震的一个异常指标, 可以根据空间扫描的低 b 值地区确定未来可能的震源位置, 但是 b 值无法单独作为一个临震指标, 需要与其他地震活动性参数联合使用; b 值时间曲线上的长期低值, 可能是较大地震的前兆异常。

关键词: b 值; 小滇西地区; 盈江地震; 地震前兆

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)02-0363-12

0 引言

Gutenberg 和 Richter (1944) 最早提出了震级-频度的统计关系; Mogi (1962) 和 Scholz (1968) 分别用岩石模拟实验发现介质的不均匀性和应力状态是导致 b 值变化的主要因素, 该发现为 b 值在地震预测研究中的应用建立了物理基础。

b 值用于地震预测研究始于 20 世纪 70 年代, 研究人员发现大地震前震中附近 b 值存在明显的时空变化 (低值异常), 因此认为将 b 值时空扫描应用于强震的中期预报是有意义的, 据此发展出在大范围内搜索、识别孕震空区的 b 值时空扫描方法 (吴开统等, 1986; 李全林等, 1979; 黄德瑜, 冯浩, 1981; 付虹等, 1997; 蔡静观等, 1997)。随着 b 值研究的深入, Wiemer 和 Wyss (1997)、Wyss 等 (2000) 提出了利用 b 值等地震活动性参数的空间分布, 分析和判定活动断裂带现今相对应力水平的方法; 易桂喜等 (2004, 2008, 2013, 2014) 在其基础上, 发展出结合历

史强震背景和精定位的震源深度剖面, 综合判定断裂带不同段落的现今活动习性与强震危险地段的方法; Schorlemmer 等 (2005) 研究揭示了不同震源机制类型地震事件的 b 值存在系统的变化, 该结果对利用 b 值分析和判定不同类型活动断裂带强震危险性具有指导意义; 基于余震 b 值相对于背景 b 值的变化, Gulia 和 Wiemer (2019) 提出了前震交通灯系统 (FTLS) 来识别后续是否会发生更大地震。

云南地区 b 值总体呈西高东低的特征 (李忠华等, 2000; 李涛等, 2010), 在大部分 6, 7 级以上强震前均存在 b 值时空分布异常, 而且 b 值异常区的面积越大, 未来强震震级越大 (晏凤桐, 李晏平, 1985; 王世芹等, 1999; 杨继登等, 1999; 刘虹和苏有锦, 2007)。基于上述特征, 学者们将 b 值和其它地震学参数以及云南地区强震活跃期和平静期相结合, 用于分析、判定特定区域的强震危险性 (李永莉等, 2002, 2003a, b, 2005; 钱晓东和秦嘉政, 2008; 毛燕等, 2016; 刘自凤等, 2019)。张广伟 (2016) 使用双差定位后的地震目

^{*} 收稿日期: 2020-01-02.

基金项目: 2020 年度震情跟踪定向工作任务 (2020010230)、地震科技星火计划 (XH20054Y)、云南省地震局科技人员传帮带项目 (C3-201706) 和中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项重点项目课题 (2017IES010201) 共同资助。

✉ 通讯作者: 付虹 (1963-), 研究员, 主要从事地震综合预测研究. E-mail: ynfuhong@qq.com.

录进行 b 值空间扫描,发现云南地区在 $9 \sim 10$ km 深度 b 值变化最明显,表明云南地区中强震孕震层主要位于 9 km 以下。

前人的研究主要聚焦于 6 级以上地震前 b 值的时空变化特征,对于 $M_{5.0} \sim 5.9$ 地震研究较少。云南小滇西地区(保山—腾冲—盈江一带) 5, 6 级地震活动较为频繁,尤其是 2000 年以来,发生多次 $M \geq 5.0$ 地震,为研究 $M \geq 5.0$ 地震前 b 值变化特征提供了较好的基础。本文同时使用完整地震目录和去余震目录,采用最大似然法对小滇西地区进行 b 值时空扫描,寻找该地区 $M \geq 5$ 地震前 b 值的时空变化特征,旨在云南地区地震监测能力随着观测技术的发展和台网布局的完善有了较大提升的基础上,探寻 $M \geq 5$ 地震前后的 b 值变化,为 $M \geq 5$ 地震预测提供可能的判据。

1 数据和方法

1.1 地震目录数据

云南地震台网于 2000 年左右完成数字化升级(模拟信号升级为数字信号),2007—2008 年实现

扩展升级,固定台站数量达到 46 个(不包含省外台站),2018 年新建 20 个台站投入使用,大大提高了区域地震监测能力(皇甫岗,李忠华,2010;张演等,2016)。本文选取 2001 年 1 月—2019 年 9 月的地震目录计算小滇西地区的 b 值。为研究余震序列对 b 值计算结果的影响,采用完整地震目录和去余震目录 2 种地震目录。本文参考苏有锦等(2003)的研究,对 $M \geq 5.0$ 的地震序列采用统一的方法删除余震:空间窗根据每个序列的空间分布确定,时间窗用 C-S 余震时间窗进行余震删除处理。

采用多参数法(冯建刚等,2012;刘丽芳等,2012)对 2 种地震目录进行最小完整性震级进行估算(每 500 个地震计算一个 M_c 值),结果如图 1 所示。尽管 2 种地震目录的地震数量不同,但是 M_c 值具有相同的变化趋势:在 2000—2008 年呈下降趋势,但较为平稳,2009 年之后下降趋势变大,2010 年后曲线转平。2 种地震目录的最优 M_c 值相同,为 $M_L 1.4$,但是由于本文研究的时间为 2001—2019 年,而 2001—2008 年 M_c 值较高,因此本文选取 $M_L \geq 1.8$ 的地震进行 b 值计算。

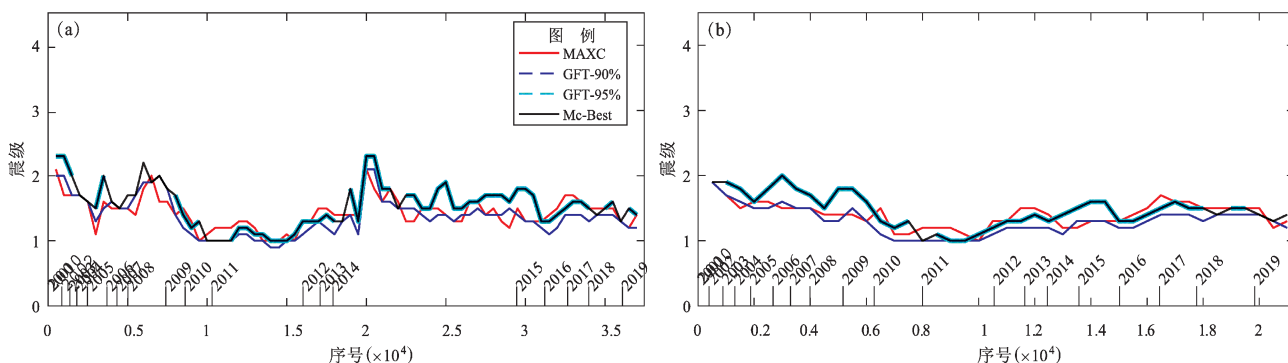


图 1 完整地震目录 (a) 和去余震目录 (b) 最小完整性震级估计

Fig. 1 Minimum complete magnitude estimation of complete earthquake catalog (a) and de-aftershock catalog (b)

小滇西地区(澜沧江断裂和南汀河断裂以西,国界以内)位于喜马拉雅东构造结的东南端,区内地质构造复杂,主要发育有 NS 向怒江断裂、龙陵—澜沧断裂、柯节断裂、普漂—施甸断裂、腾冲—银盘断裂、苏典—盈江断裂和 NE 向大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、畹町—安定断裂(Xu et al, 2015)。2001 年以来该地区中强地震较为活跃,共发生 $M \geq 5.0$ 地震 9 组 14 次,如图 2 所示,主要

分布在 2 个区域:腾冲—保山地区和盈江地区。

1.2 b 值计算方法

最大似然法具有计算简便、不易受个别较大地震影响、计算结果较为稳定的优点,因此本文使用该方法计算 b 值。具体计算公式如下:

$$b = \frac{\log e}{M - \left(M_c - \frac{\Delta M}{2} \right)} \quad (1)$$

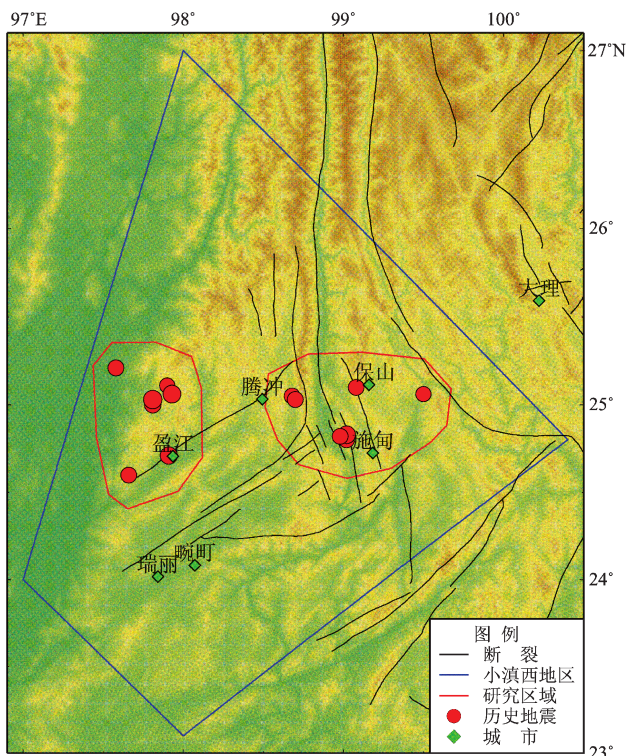


图2 2001—2019年小滇西地区 $M \geq 5$ 地震空间分布
Fig. 2 Distribution of $M \geq 5.0$ earthquakes occurred in the western region of Yunnan between 2001 and 2019

式中： M 为震级； ΔM 为震级分档，本文取 0.1； e 为自然对数的底数。估算 b 值的误差为：

$$\delta b = 2.30b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

式中： \bar{M} 为平均震级； n 为计算 b 值所用的样本量。

对研究区域进行扫描时，首先将研究区域进行网格化，经纬度的步长分别为 0.05，然后选择每个

网格节点的中心点为圆心、半径为 r 的圆形统计单元内震级大于 M_c 的地震事件（冯建刚等，2016）。考察 b 值在时间域的变化时，采用固定窗长和步长计算 b 值，并将得到的 b 值作为该时间窗最后时刻的 b 值，可使各时刻对应的 b 值完全由该时刻之前已发生的地震事件决定，在实际应用中更具可操作性（史海霞等，2018）。

2 b 值分析

2.1 b 值时间变化曲线

为了分析小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震之前 b 值的变化特征，本文计算了该区 b 值随时间的变化曲线，结果如图 3 所示，计算时使用不同的窗长和步长，最终选出对 b 值结果反映最好的参数（窗长为 200 个地震事件，步长为 20 个地震事件；震级范围为 1.8 ~ 4.9），同时为了对比不同地震目录计算得到的 b 值差异，对 2 种地震目录使用相同的计算参数。由图 3 可以看出，2 种地震目录得到的 b 值整体变化趋势相同，均值也基本相同（完整目录和去余震目录 b 值均值分别为 0.89，0.88），仅在 $M \geq 5.0$ 地震发生后的几个月存在较为明显的差异。这种现象表明：对于 b 值时间序列，是否去除余震仅影响中强震发生后的一段时间，对于 b 值长期变化趋势影响较小。

由图 3 地震与 b 值的关系可以发现，大部分 $M \geq 5.0$ 地震前， b 值较低，仅在 2008 年 3 月 21 日盈江 $M5.3$ 地震和 2015 年 10 月 30 日昌宁 $M5.1$ 地震前， b 值处于均值线附近。小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震前整个地区 b 值随时间变化趋势呈现多样化的特征：2004 年 10 月 19 日保山 $M5.3$ 地震和 2008 年 3 月 21 日盈江 $M5.3$ 地震

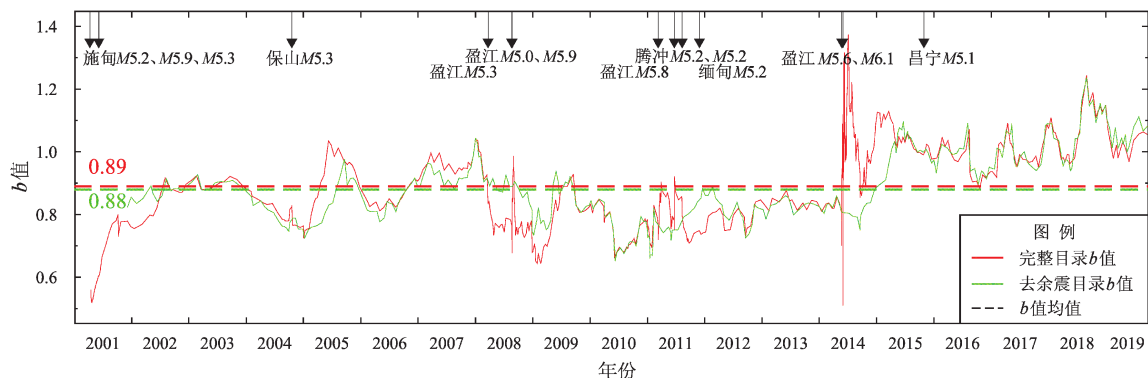


图3 小滇西地区 b 值时间变化曲线

Fig. 3 b value time curve of the western region of Yunnan

发生在 b 值下降时段; 2008 年 8 月盈江 $M5.0$, 5.9 地震、2011 年腾冲 2 次 $M5.2$ 地震、2014 年 5 月盈江 $M5.6$, 6.1 地震和 2015 年 10 月昌宁 $M5.1$ 地震发生在 b 值波动时段; 2011 年 3 月 10 日盈江 $M5.8$ 地震和 2011 年 11 月 28 日缅甸 $M5.2$ 地震发生在 b 值上升时段 (由于本文使用的数据在 2001 年施甸 3 次地震前的地震较少, 因此该组地震不在讨论范围内, 下同)。

研究表明 (晏凤桐, 李晏平, 1985), b 值异常区的面积和未来强震震级存在正相关的关系。据此猜想, 小滇西地区 $M5.0 \sim 5.9$ 地震前的 b 值异常区域可能较小, 孕震区产生的 b 值异常可能被小滇西地区整体的 b 值变化所淹没。为验证上述猜想, 本文选定 2001 年以来的 2 个 $M \geq 5.0$ 地震集中区: 腾冲—保山地区和盈江地区 (如图 2 红色框线所示), 进行深入研究分析。由于这 2 个区域地震数量相对较少, 选用窗长为 100 个地震事件、步长为 10 个地震事件和 $M1.8 \sim 4.9$ 的震级范围作为参数, 计算 b 值变化曲线, 结果如图 4 所示。腾冲—保山地区的第一个 b 值出现于 2001—2002 年 (完整地震目录为 2001 年, 去余震地震目录为

2002 年), 而盈江地区第一个 b 值出现于 2008 年, 这表明在 2008 年之前, 腾冲—保山地区小震活动相较于盈江地区更加活跃, 因此在该时段腾冲—保山地区的地震事件对整个小滇西地区 b 值的贡献更高; 在 2008 年 8 月盈江 $M5.0$, 5.9 地震之后, 盈江地区小震活动增加, 对小滇西地区完整目录 b 值的贡献有所升高。

2002 年以来, 腾冲—保山地区共发生 3 组 $M \geq 5.0$ 地震, 其中 2 组发生在 b 值较低的时段。2004 年保山 $M5.3$ 地震发生在 b 值趋势下降时段, 地震发生后该地区 b 值回升到高值水平; 2011 年腾冲 2 次 $M5.2$ 地震发生在 b 值回升转平之后, 但 b 值仍然较低, 地震发生后该地区 b 值亦有所回升, 但是回升幅度相较于 2004 年小; 2015 年昌宁 $M5.1$ 地震虽然发生在 b 值下降时段, 但是 b 值处于高值水平 (图 4a)。

2008 年以来, 盈江地区连续发生 5 组 $M \geq 5.0$ 地震, 这些地震均发生在 b 值较低的时段。其中, 2008 年 3 月 21 日盈江 $M5.3$ 地震和 2011 年 11 月 28 日缅甸 $M5.2$ 地震发生后, b 值无明显变化; 而 2008 年 8 月盈江 $M5.0$, 5.9 地震、2011 年 3 月 21 日

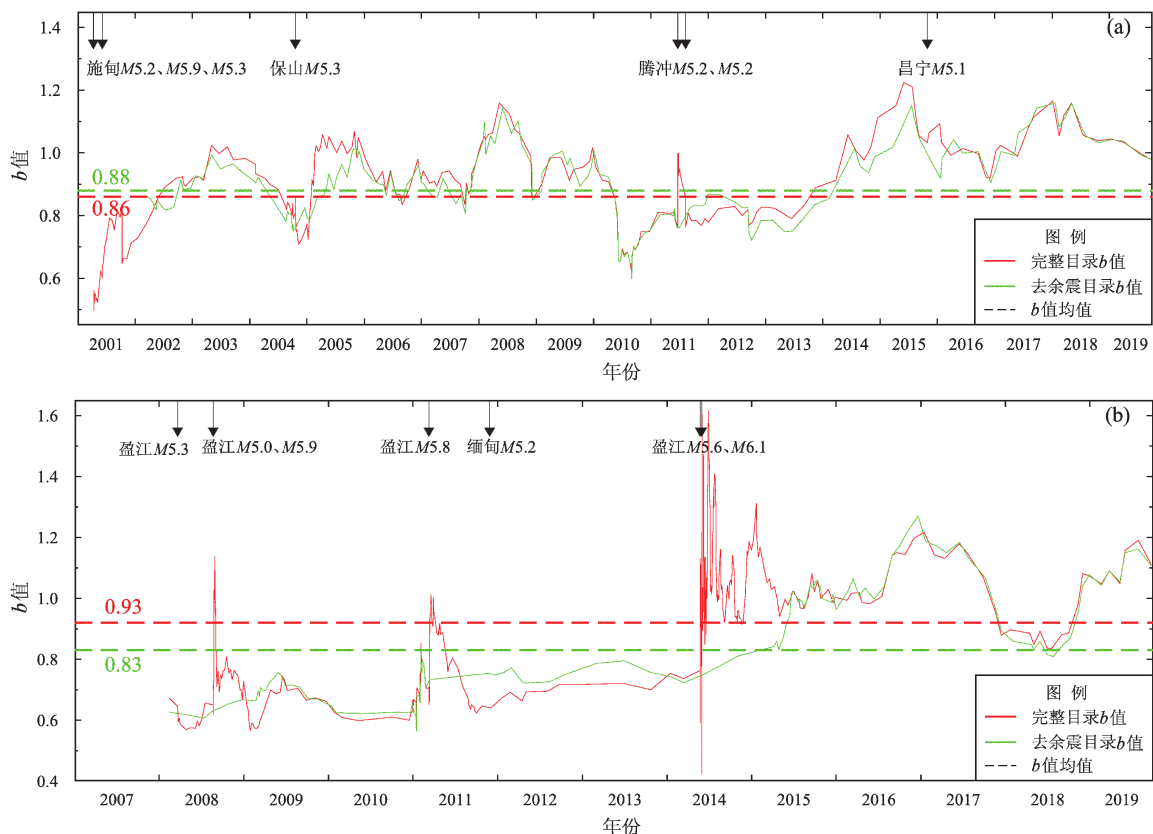


图 4 腾冲—保山地区 (a)、盈江地区 (b) 的 b 值变化曲线

Fig. 4 Time curve of b value in Tengchong - Baoshan region (a) and Yingjiang region (b)

盈江 $M5.8$ 地震和 2014 年 5 月盈江 $M5.6$, 6.1 地震发生后, 完整目录 b 值均出现明显升高 (图 4b), 这与人得到的余震 b 值比背景 b 值高的结论相符 (吴开统等, 1986; Gulia *et al.*, 2005)。由 2 种地震目录计算得到的腾冲—保山地区 b 值差异较小, 盈江地区 b 值差异较大 (完整目录 b 值均值比去余震目录高 0.09), 分析认为余震序列的丰富程度是造成上述差异的主要原因。

结果表明, 2 个小区域的 b 值在 $M \geq 5.0$ 地震前呈现出多样化的变化趋势, 与整个小滇西地区的 b 值曲线相同。但是相对于整个小滇西地区, 2 个小区域的 b 值在地震前后变化幅度更大、低值异常更加明显, 表明更小的研究区域对区内应力变化更加敏感。

3 个不同尺度研究区域的 b 值曲线中均存在一个较长的低 b 值的时段: 小滇西地区为 2008 年 3 月—2014 年 5 月, 腾冲—保山地区为 2010 年 4 月—2014 年 5 月, 盈江地区为 2008 年 2 月—2014 年 5 月。3 个时段结束时间基本相同, 而开始时间存在差异。尽管在上述低 b 值发生了 $M \geq 5.0$ 地震, 但是 b 值仅在发震之后较短的时间出现上升, 而后又快速下降到低值水平。分析认为该低 b 值过程可能显示了 2014 年 5 月 30 日盈江 $M6.1$ 地震的孕震过程: 2008 年 2 月在盈江地区首先出现低 b 值现象; 2008 年之后盈江地区的地震活动对整个小滇西地区 b 值影响增加, 因此小滇西地区出现低 b 值; 随着应力的积累, 低 b 值区域扩展到相邻的腾冲—保山地区; 盈江 $M6.1$ 地震发生后, 积累的应力得到释放, 该区域的 b 值恢复到正常水平。

2.2 b 值空间分布

为了研究 b 值空间分布与 $M \geq 5.0$ 地震之间的关系, 本文对 2008 年以来小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震前的 b 值采用统一的参数进行了空间扫描 (由于本文选取的地震目录起始时间为 2001 年, 对于 2001 年和 2004 年的 2 组地震, 数据量太少, 不进行 b 值空间扫描)。参数设置如下: 最小完整性震级 $M_c = 1.8$, 经纬度步长为 0.05° , 目录选取半径为 30 km, 每个统计单元内最少地震数为 30 个。

2008 年 3 月 21 日盈江 $M5.3$ 地震前的 b 值空间扫描结果 (图 5a, b) 显示, 低 b 值区主要位于中缅交界地区, 2008 年 3 月 21 日盈江 $M5.3$ 地震和 8 月 20, 21 日盈江 $M5.0$, $M5.9$ 地震都发生在低 b 值区。与 2008 年 3 月 21 日盈江地震前相比,

2011 年 3 月 10 日盈江 $M5.8$ 地震前 b 值空间扫描结果 (图 5c, d) 的范围更大, 而且低 b 值区自盈江向腾冲方向扩展, 分析认为小震活动增加和台网监测能力增强可能是造成 b 值空间扫描范围增大的原因, 而盈江扩展到腾冲的低 b 值区则是腾冲 2 次 $M5.2$ 地震的前兆异常。2011 年 3 月 10 日盈江 $M5.8$ 地震和 11 月 28 日缅甸 $M5.2$ 地震都发生在低 b 值区, 而 6 月 20 日和 8 月 9 日 2 次腾冲 $M5.2$ 地震发生在高低 b 值过渡区。

2011 年 3 组 $M \geq 5.0$ 地震发生后, 小滇西地区的低 b 值区域并未减少, 在滇缅交界地区仍然存在大范围的低 b 值异常 (图 6a, b), 2014 年 5 月盈江 $M5.6$ 和 $M6.1$ 地震就发生在低 b 值区。而 2001 年 1 月 1 日至 2015 年 10 月 29 日 b 值空间扫描结果 (图 6c, d) 显示低 b 值区域变少, 整个小滇西地区 b 值明显升高, 该现象在该区 b 值时间变化曲线上亦有体现, 在 2014 年盈江地震后, 整个地区的 b 值迅速上升, 2015 年之后 b 值在 1.0 左右波动。2015 年 10 月 31 日昌宁 $M5.1$ 地震发生在高低 b 值过渡区。

对比分析 2 种不同地震目录在上述 4 个时间段的 b 值空间扫描结果可以发现, 去余震目录的 b 值整体更低, 这样能够更加清楚地反映低 b 值区域; 而完整地震目录因为余震的存在, 导致强震周边地区的 b 值明显升高。但是在 2008 年 3 月 20 日 b 值空间扫描结果中, 完整地震目录在施甸地区存在一个明显的低值区域, 而去余震目录却没有, 可能是由于 2001 年施甸地震序列记录不完整造成的。综上所述, 进行 b 值空间扫描寻找孕震异常时, 使用去余震目录效果更好。

2.3 Δb 值

易桂喜等 (2013)、冯建刚等 (2016) 研究认为地震 b 值的空间扫描和 Δb 值相结合可能是进一步确认强震危险的有效方法之一。本文使用 Δb 值空间扫描进一步寻找小滇西地区 5 级地震 b 值空间变化特征。为保证 Δb 值不受 $M \geq 5.0$ 地震余震的干扰, 计算时使用 2001 年 1 月 1 日至目标地震发生前一天的 b 值与 2001 年 1 月 1 日至前一次 $M \geq 5.0$ 地震后的 N 个月 ($M5.0 \sim 5.9$ 地震, N 为 3; $M6.0 \sim 6.9$ 地震, N 为 6) 的 b 值之差作为 Δb 值, 进行空间扫描。由于本文所使用的地震目录时间较短, 因此仅可计算 2011 年之后 5 组地震前的 Δb 值空间分布。

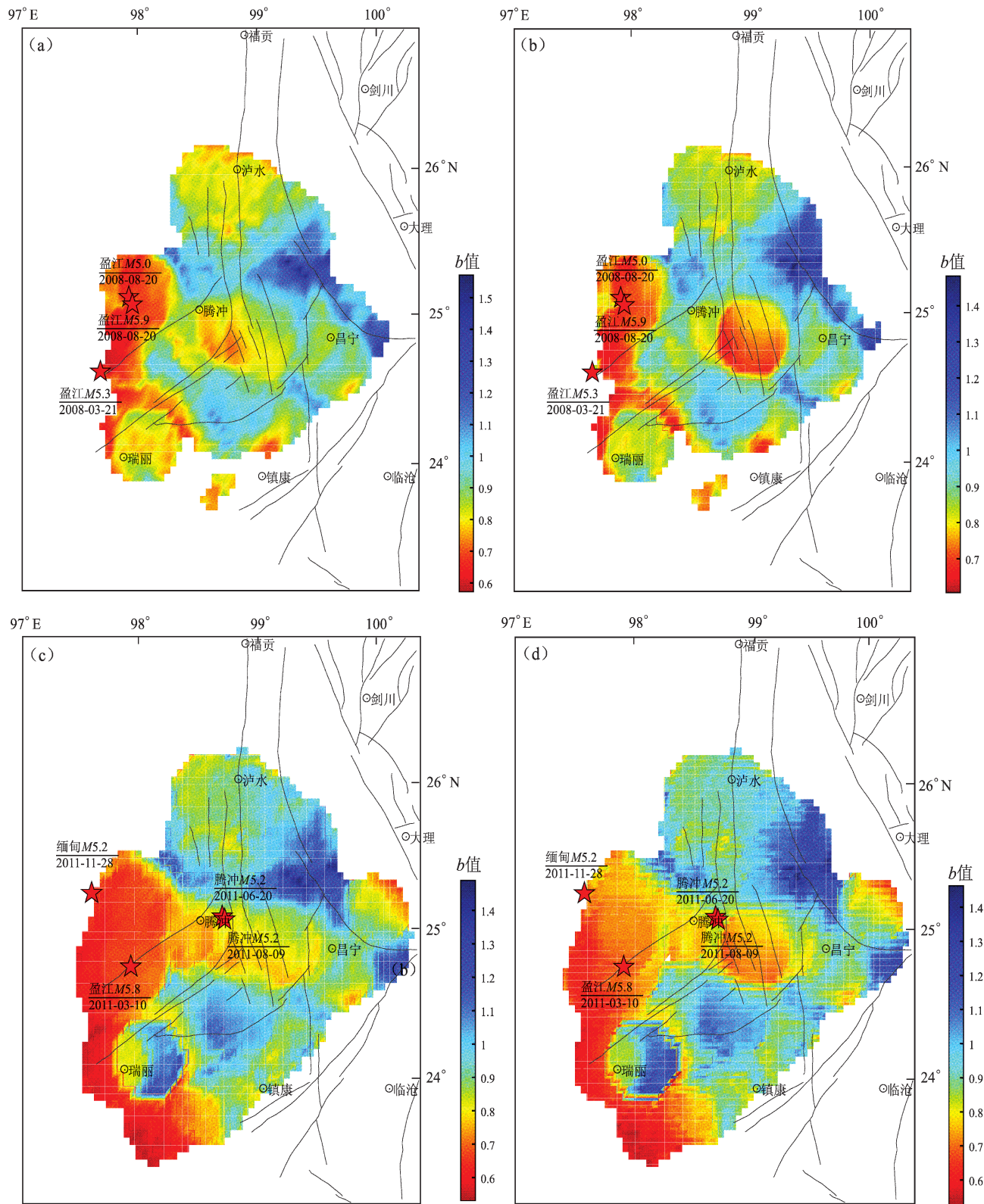


图5 2001 年 1 月 1 日至 2008 年 3 月 20 日去余震地震目录 (a)、完整地震目录 (b) 和 2001 年 1 月 1 日至 2011 年 3 月 9 日去余震地震目录 (c)、完整地震目录 (d) 的 b 值空间扫描结果

Fig. 5 Spatial scanning results of b value (a), (b) represent results of de – aftershock catalog and complete earthquake catalog from Jan. 1, 2001 to Mar. 20, 2008; (c), (d) represent results of de – aftershock catalog and complete earthquake catalog from Jan. 1, 2001 to Mar. 9, 2011

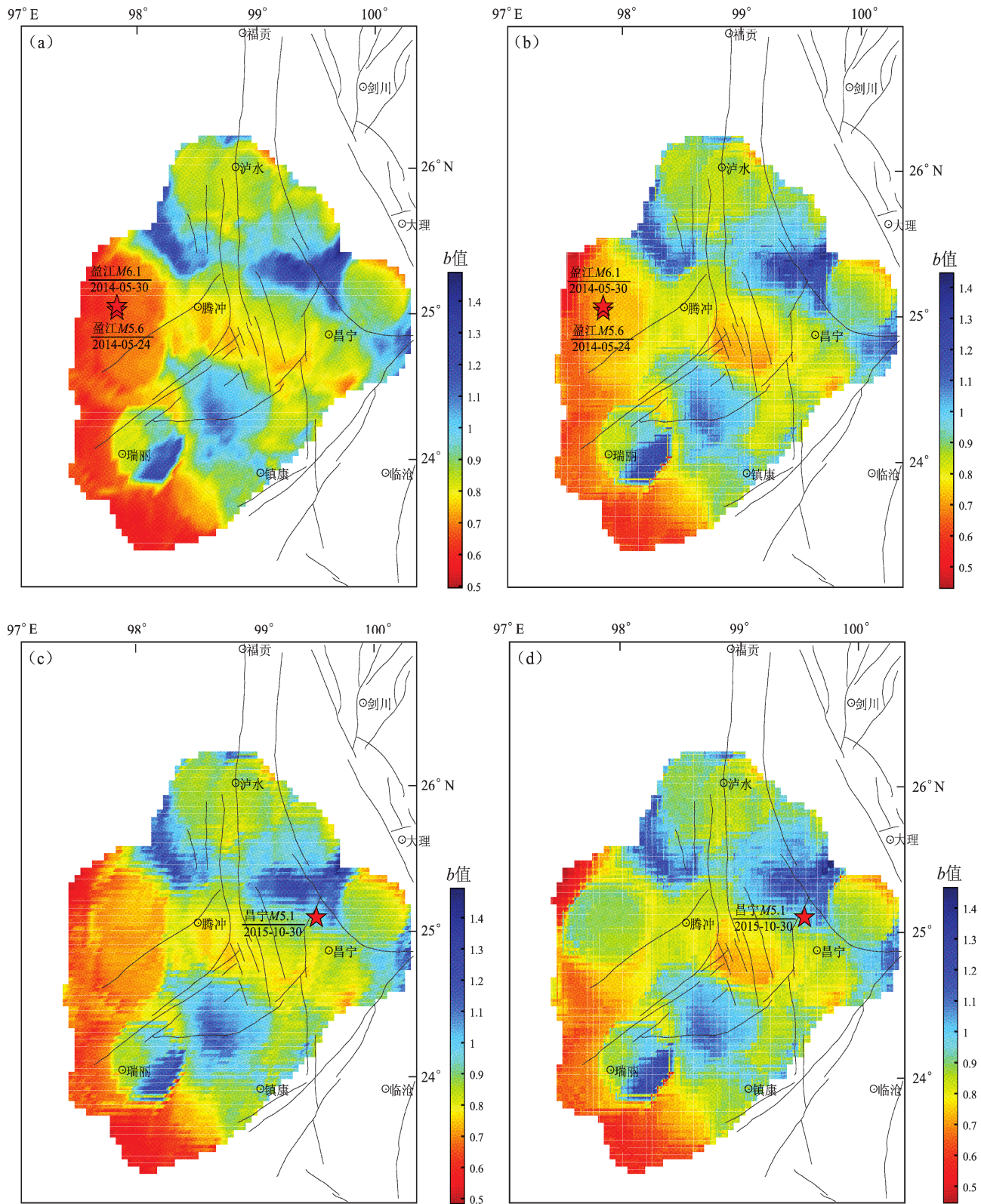


图6 2001年1月1日至2014年5月23日去余震地震目录(a)、完整地震目录(b)和2001年1月1日至2015年10月29日去余震地震目录(c)、完整地震目录(d)的 b 值空间扫描结果

Fig. 6 Spatial scanning results of b value (a), (b) represent results of de - aftershock catalog and complete earthquake catalog from Jan. 1, 2001 to May. 23, 2014; (c), (d) represent results of de - aftershock catalog and complete earthquake catalog from Jan. 1, 2001 to Oct. 29, 2015

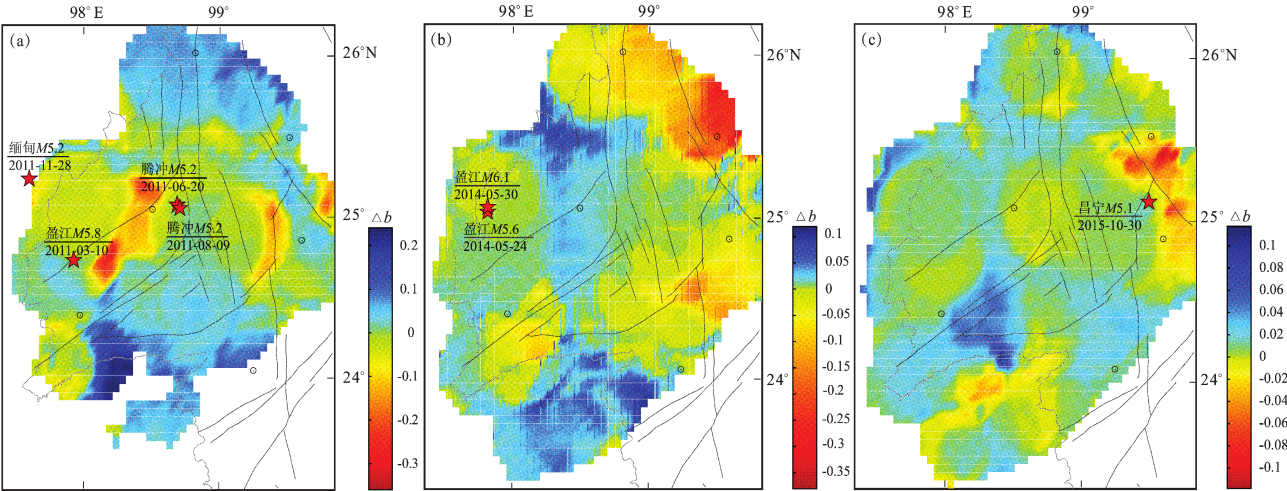


图 7 2008 年 11 月 22 日至 2011 年 3 月 9 日 (a)、2012 年 3 月 1 日至 2014 年 5 月 23 日 (b)、
2014 年 12 月 1 日至 2015 年 10 月 29 日 (c) 小滇西地区 Δb 值空间扫描结果

Fig. 7 Spatial scanning results of Δb value from Nov. 22, 2018 to Mar. 9, 2011 (a),
from Mar. 1, 2012 to May. 23, 2014 (b), from Dec. 1, 2014 to Oct. 29,
2015 (c) in the western region of Yunnan province

图 7 显示, 2011 年盈江 $M5.8$ 地震、腾冲 $M5.2$ 地震和缅甸 $M5.2$ 地震前, 震源区附近 b 值有所下降, 但降幅较小 (大约在 0.1 以内); 2014 年盈江 $M5.6$, $M6.1$ 地震前, 震源区附近 b 值变化不明显 (震源区周边略有下降, 降幅在 0.05 以内); 2015 年昌宁 $M5.1$ 地震前, 震源区处于 b 值上升和下降的交界处 (Δb 值在 $-0.02 \sim 0.02$)。综上所述, 在 2011 年之后发生的 5 组地震震源区及周边地区并未发现明显的 Δb 值异常, 部分地震前震源区周边虽出现 b 值下降现象, 但是下降幅度

较小, 因此 Δb 值异常无法作为小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震的预报指标。

2.4 $M \geq 5.0$ 地震与 b 值时空分布的关系

根据上述计算结果, 本文总结了 2001 年以来小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震前 b 值时空分布特征 (表 1)。统计结果表明, 在 $M \geq 5.0$ 地震发生前, 小滇西地区的 b 值时间曲线趋势呈多样化的特征, 既存在上升、下降, 也存在波动, 但是在 75% 的地震发生之前, 小滇西地区均处于低 b 值状态; b 值空间扫描结果显示: 71% 的地震发生在低 b 值区内,

表 1 2001 年以来小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震前 b 值时空分布特征

Tab. 1 Spatio-temporal characteristics of b value before $M \geq 5.0$ earthquakes in the western region of Yunnan since 2001			
序号	地震事件	b 值时间曲线	b 值空间分布
1	2004-10-19 保山 $M5.3$	处于均值水平, b 值下降	
2	2008-03-21 盈江 $M5.3$	处于低 b 值状态, b 值下降	位于低 b 值区内
3	2008-08-20 盈江 $M5.0$	处于低 b 值状态, b 值波动	位于低 b 值区内
	2008-08-21 盈江 $M5.9$		
4	2011-03-10 盈江 $M5.8$	处于低 b 值状态, b 值上升	位于低 b 值区内
5	2011-06-20 腾冲 $M5.2$	处于低 b 值状态, b 值波动	位于高低 b 值过渡区
	2011-08-09 腾冲 $M5.2$		
6	2011-11-28 缅甸 $M5.2$	处于低 b 值状态, b 值上升	位于低 b 值区内
7	2014-05-24 盈江 $M5.6$	处于低 b 值状态, b 值波动	位于低 b 值区内
	2014-05-30 盈江 $M6.1$		
8	2015-10-30 昌宁 $M5.1$	处于高 b 值状态, b 值波动	位于高低 b 值过渡区

29% 的地震发生在高低 b 值过渡区。因此，小滇西地区时间曲线上的低 b 值是该区 $M \geq 5.0$ 地震的一个可能的异常指标，可以根据空间扫描的低 b 值地区确定未来可能的震源位置，但是 b 值无法单独作为一个临震指标。这与李永莉等（2003a, b）的研究结果一致，即地震活动性参数的异常与强震并非唯一对应的关系，因此单项地震学指标用于强震预报具有局限性。

3 讨论

3.1 震后 b 值下降原因分析

Gulia 和 Wiemer（2019）对加利福尼亚、日本、意大利和阿拉斯加的 31 个具有足够的质量和丰富程度的地震序列进行分析，结果表明在主震后余震序列 b 值普遍升高了 20%；另外，他们还得到 2 个在主震后余震 b 值明显降低的序列，后续均发生了更大的地震。据此，他们提出了前震交通灯系统（FTLS）来识别后续是否会发生更大地震。

在盈江地区的完整目录的 b 值时间变化曲线中，大部分余震序列的 b 值在主震发生后明显升

高，但在 2008 年盈江 $M5.0$ 地震和 2014 年盈江 $M5.6$ 地震后 b 值的下降，后续均发生了更大的地震（2008 年 8 月 21 日盈江 $M5.9$ 和 2014 年 5 月 30 日盈江 $M6.1$ 地震）。为探究盈江地区 $M \geq 5.0$ 地震后 b 值降低是否是后续更大地震的前兆，本文给出了 2008 年 8 月 20 日盈江 $M5.0$ 地震和 2014 年 5 月 24 日盈江 $M5.6$ 地震前后的 b 值数据（表 2）。由表 2 可见，2008 年 8 月 20 日 $M5.0$ 地震发生后，盈江地区 b 值稍有降低，随后 b 值升高到背景水平之上，在 8 月 21 日 $M5.9$ 地震发生后 b 值又出现短暂降低（由于篇幅原因，未在表 2 中列出）。同样的变化特征也出现在 2014 年的这组地震中，5 月 24 日 $M5.6$ 地震后，盈江地区 b 值迅速降低，然后回升到背景水平之上，在 5 月 30 日 $M6.1$ 地震发生后， b 值亦出现先降低后升高的现象。

上述现象与 Gulia 和 Wiemer（2019）研究中的 2 次前震后 b 值变化趋势和平均 b 值特征（ b 值未升高到背景 b 值之上，且平均 b 值明显小于背景 b 值）均不同，分析认为盈江地区 2008 年 8 月 20 日 $M5.0$ 地震和 2014 年 5 月 24 日 $M5.6$ 地震后的低 b 值并非是更大地震的前兆，而是由于地震目录完

表 2 2008 年 8 月 20 日盈江 $M5.0$ 地震和 2014 年 5 月 24 日盈江 $M5.6$ 地震前后盈江地区 b 值
Tab. 2 b value before and after the Aug. 20, 2008 $M5.0$ earthquake and May. 24, 2014 $M5.6$ earthquake in Yingjiang area

2008-08-20 05:35:11 盈江 $M5.0$ 地震				2014-05-24 04:49:21 盈江 $M5.6$ 地震			
日期	时间	b 值	b 值误差	日期	时间	b 值	b 值误差
2008-07-03	23:38:32	0.603	0.040	2014-01-15	00:54:08	0.754	0.064
2008-07-16	06:55:34	0.656	0.044	2014-03-13	01:04:38	0.737	0.064
2008-08-20	05:38:56	0.650	0.042	2014-05-24	04:48:18	0.764	0.067
2008-08-20	05:49:45	0.625	0.040	2014-05-24	04:58:37	0.696	0.057
2008-08-20	06:18:13	0.637	0.042	2014-05-24	05:05:08	0.634	0.050
2008-08-20	07:10:33	0.653	0.044	2014-05-24	05:13:47	0.602	0.047
2008-08-20	08:46:30	0.652	0.046	2014-05-24	05:26:22	0.590	0.045
2008-08-20	10:11:05	0.652	0.045	2014-05-24	05:39:51	0.609	0.049
2008-08-20	12:10:43	0.625	0.042	2014-05-24	05:51:06	0.607	0.049
2008-08-20	15:51:39	0.646	0.043	2014-05-24	06:03:52	0.600	0.048
2008-08-21	01:49:54	0.658	0.046	2014-05-24	06:15:07	0.634	0.053
2008-08-21	20:33:52	0.671	0.048	2014-05-24	06:36:14	0.659	0.057
2008-08-21	21:13:17	0.618	0.043	2014-05-24	07:01:07	0.636	0.053
2008-08-21	21:31:25	0.637	0.043	2014-05-24	07:31:36	0.726	0.064
2008-08-21	21:49:46	0.632	0.039	2014-05-24	07:55:32	0.821	0.077
2008-08-21	22:17:39	0.654	0.043	2014-05-24	08:25:42	0.880	0.084
2008-08-21	22:48:17	0.674	0.045	2014-05-24	09:09:47	0.882	0.082

整性的影响造成的假象。地震目录的质量、一致性和完整性通常受到记录地震台网变化和观测限制的强烈影响 (Gulia, Wiemer, 2019), 尤其是在中强震发生后, 尾波会淹没后续地震的初动信号, 导致余震序列的不完整 (Jiang *et al*, 2019)。在前震交通灯系统的研究中, Gulia 和 Wiemer (2019) 将地震后第一个小时甚至几天的数据排除在分析之外, 就是为了消除这种影响。

3.2 余震序列和空间范围对 b 值的影响

本文对完整地震目录和去余震地震目录都进行了 b 值的时空扫描, 对比分析可以发现: 在 b 值时间变化曲线中, 2 种地震目录的 b 值曲线整体变化趋势相同, 平均值亦相差无几, 差异仅仅存在于 $M \geq 5.0$ 地震后的一段时间; 在空间扫描结果中, 去余震目录的 b 值比完整目录低, 更加容易识别低值异常区, 对未来可能存在的强震的指示意义更强。综上所述, 在进行 b 值随时间变化的研究时, 可以采用完整地震目录; 但是进行 b 值空间扫描寻找未来可能的强震位置时, 应使用去余震目录。

在 b 值随时间变化的研究中还发现, 小范围的 b 值变化曲线比大范围更加精确, 对于本区域的强震孕育过程更加敏感, 在研究区域中有不同地质构造时更是如此。上述现象与 Schorlemmer 等 (2005) 发现的不同类型的断层上的 b 值存在系统的变化一致, 均可以用 Mogi (1962) 提出的介质的不均匀性导致 b 值变化的理论来解释。但是更小的空间范围内地震数量较少, 在计算 b 值时可能存在地震样本量不够的问题 (如盈江地区 2001—2007 年地震数量较少, 无法满足计算要求)。因此, 研究 b 值随时间变化特征时, 在保证地震数量的前提下, 尽可能地选取更小的空间范围和一致的地质构造, 可以得到更加精确敏感的信号。

4 结论

本文使用最大似然法对小滇西地区的完整地震目录和去余震目录进行 b 值时空扫描, 研究该地区 $M \geq 5.0$ 地震前 b 值的时空变化特征, 得到以下结论:

(1) 小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震前, b 值随时间变化趋势呈现出多样化的特征, 但是 75% 的地震

发生之前, 小滇西地区处于低 b 值状态。

(2) 小滇西地区 $M \geq 5.0$ 地震均发生在低 b 值区域或者高低 b 值过渡地区; 且地震发生前, 震源区附近 b 值有小幅下降。

(3) 在不同时空尺度的 b 值时间由线上均发现长时间的低 b 值现象, 且该现象均在 2014 年盈江 $M6.1$ 地震后回升到正常水平, 分析认为该现象是此次地震的前兆异常。

本文认为小滇西地区低 b 值是本地区 $M \geq 5.0$ 地震的一个可能的异常指标, 可以根据空间扫描的低 b 值地区确定未来可能的震源位置, 但是 b 值无法单独作为一个临震指标。

冯建刚副研究员为本文提供了 b 值时空扫描脚本, 审稿人对本文提出了宝贵的修改意见, 在此一并感谢。

参考文献:

- 蔡静观, 张喜玲, 李永莉, 等. 1997. 云南地区近期强震重复发生时地震学的动态演化特征[J]. 地震研究, 20(4): 357–364.
- 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 2012. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J]. 地震学报, 34(5): 646–658.
- 冯建刚, 张辉, 杨萍. 2016. 2013 年岷县漳县 6.6 级地震前地震 b 值异常特征研究[J]. 地震, 36(1): 32–37.
- 付虹, 陈立德, 罗平, 等. 1997. 1995 年 7 月 12 日云南孟连中缅边界 7.3 级地震中短临预报及前兆特征(2)——云南强震活动特征及孟连 7.3 级地震前的地震学异常[J]. 地震研究, 20(3): 249–258.
- 皇甫岗, 李忠华. 2010. 20 世纪云南地区地震记录完全性评价[J]. 地震研究, 33(1): 1–6.
- 黄德瑜, 冯浩. 1981. 强震前大范围地震活动性参数的时空扫描[J]. 地震学报, 3(3): 21–32.
- 李全林, 于录, 郝柏林, 等. 1979. 地震频度—震级关系的时空扫描[M]. 北京: 地震出版社.
- 李涛, 吴小平, 王莹. 2010. 基于分区空间扫描研究云南 b 值分布特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 23(6): 670–675.
- 李永莉, 蔡静观, 曹刻. 2002. 云南地区强震活动过程中的调制比、 b 值[J]. 地震研究, 25(1): 25–30.
- 李永莉, 蔡静观, 刘丽芳, 等. 2003a. 缅甸 5 级震群前中短—短临的地震活动参数动态演化[J]. 西北地震学报, 25(2): 158–165.
- 李永莉, 苏有锦, 李忠华, 等. 2003b. 云南地区强震前地震活动的短临异常特征[J]. 地震研究, 26(增刊 1): 17–24.
- 李永莉, 苏有锦, 田秀美, 等. 2005. 云南地区 3 次 6 级间歇性双震第二主震的前震特征分析[J]. 地震研究, 28(2): 114–118.
- 李忠华, 苏有锦, 蔡明军, 等. 2000. 云南地区地震序列的 P 值和 b 值变化特征[J]. 地震, 20(4): 74–78.
- 刘虹, 苏有锦. 2007. 云南地区 7 级大震震源地震活动特征研究

- [J]. 地震研究, 30(1): 18–23.
- 刘丽芳, 李志海, 蒋长胜. 2012. 云南地区地震目录最小完整性震级研究[J]. 地震研究, 35(4): 491–499.
- 刘自凤, 龙峰, 彭关灵, 等. 2019. 滇西北地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 42(3): 330–337.
- 毛燕, 刘自凤, 叶建庆, 等. 2016. 小江断裂带强震危险性分析[J]. 地震研究, 39(2): 213–217.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2008. 小江断裂带及周边地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 31(4): 354–361.
- 史海霞, 孟令媛, 张雪梅, 等. 2018. 汶川地震前的 b 值变化. 地球物理学报, 61(5): 1874–188.
- 苏有锦, 李永莉, 李忠华, 等. 2003. 川滇地区区域地震目录完整性最小震级分析[J]. 地震研究, 26(增刊1): 10–16.
- 王世芹, 杨继登, 雷素华, 等. 1999. 1995~1996年云南地区三次强震前地震活动的年度异常[J]. 华南地震, 19(2): 32–38.
- 吴开统, 焦远碧, 吕培苓. 1986. b 值研究进展综述[J]. 地震, (5): 50–53.
- 晏凤桐, 李晏平. 1985. 云南地区强震前的 b 值变化[J]. 地震研究, 8(6): 633–644.
- 杨继登, 王世芹, 范杨, 等. 1999. 1995~1996年云南地区三次强震前地震活动的短期异常[J]. 华南地震, 19(2): 32–38.
- 易桂喜, 付虹, 王思维, 等. 2014. 1988年澜沧—耿马地震前震源区应力状态分析[J]. 地震研究, 37(3): 332–338.
- 易桂喜, 闻学泽, 范军, 等. 2004. 由地震活动参数分析安宁河—则木河断裂的现今活动习性 & 地震危险性[J]. 地震学报, 26(3): 294–303.
- 易桂喜, 闻学泽, 苏有锦. 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 51(6): 1719–1725.
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2013. 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 34(5): 1112–1120.
- 张广伟. 2016. 云南地区地震的重新定位及 b 值研究[J]. 中国地震, 32(1): 54–62.
- 张演, 杨周胜, 字承柱. 2016. 云南数字地震台网监测能力[J]. 地震地磁观测与研究, 37(4): 62–65.
- Gulia L, Rinaldi A P, Tormann T, *et al.* 2005. The effect of a mainshock on the size distribution of the aftershocks[J]. Geophys Res Lett, 45(B1): 13277–13287.
- Gulia L, Wiemer S. 2019. Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks[J]. Nature, 574: 193–120.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquake in California [J]. Bull Seismol Soc Am, 34(4): 185–188.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016 $M_{\text{S}}5.0$ Yulong earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications [J]. Pure Appl Geophys, 176(3): 1225–1241.
- Mogi K. 1962. Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous material and its relation to earthquake phenomena [J]. Earthquake Res inst, 40: 125–173.
- Scholz C H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. Bull Seismol Soc Am, 58(1): 399–415.
- Schorlemmer D, Wiemer S, Wyss M. 2005. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes[J]. Nature, 437(7058): 539–542.
- Wiemer S, Wyss M. 1997. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities; An improved technique to calculate recurrence times? [J]. J Geophys Res, 102(B7): 15115–15128.
- Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. 2000. Mapping asperities by minima of local recurrence time; San Jacinto–Elsinore fault zones [J]. J Geophys Res, 105(B4): 7829–7844.
- Xu Y, Li D N, Gao Y, *et al.* 2015. Relocations of Yingjiang sequences (China–Myanmar border); details of seismogenic faults [J]. Bull Seismol Soc Am, 105(1): 314–329.

Study of Variation Characteristics of b Value Before $M \geq 5.0$ Earthquakes in the Western Region of Yunnan

WANG Guangming, FU Hong, KONG Deyu, LI Yongli
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

We use both complete earthquake catalog and de – aftershock catalog to conduct the spatio – temporal scanning of b value in the western region of Yunnan province by using the maximum likelihood method to search for the spatio – temporal variation characteristics of b value before $M \geq 5.0$ earthquakes in this region. The temporal scanning results show that there is no significant difference in the overall trend of the two seismic catalogs, while the spatial scanning results show that the low b value anomalies of the de – aftershock catalogs are more prominent. Before these $M \geq 5.0$ earthquakes in the western region of Yunnan, the time curve of b value present diversified characteristics, but the whole region was in a low b value state before 75% (6/8) $M \geq 5.0$ earthquakes, and all of the $M \geq 5.0$ earthquakes in this region occurred in areas with low b value or transition zone with high and low b value. And we also find that there is a long period state of low b value in different area. Although the starting time is different, the ending time is the same. We believe that the phenomenon might be the precursor of the 2014 Yingjiang $M6.1$ earthquake. According to the results, a conclusion can be drawn; low b value in the western region of Yunnan is a precursor of $M \geq 5.0$ earthquakes in this region, and we can determine the possible source location of $M \geq 5.0$ earthquakes in the future according to the low b value area in the spatial scan. However, the b value cannot be used to predict earthquakes occurred in several days alone, and needs to be used in combination with other seismicity parameters. Long period state of low b value in time curve maybe a precursor of big earthquakes.

Keywords: b value; western region of Yunnan; Yingjiang earthquake; earthquake precursor