

# 基于地震序列时空分布特征分析 维西—乔后断裂带地震危险性\*

王光明, 彭关灵, 赵小艳, 付虹

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 2013年以来, 维西—乔后断裂带进入中强地震活跃期, 2021年5月21日漾濞  $M_s6.4$  地震发生前, 已有3组  $M_s \geq 5.0$  地震连续发生, 表明该断裂带地震活动显著增强。采用双差定位方法对2013年以来发生在维西—乔后断裂带周边的4组地震序列进行重定位, 并使用ZMAP软件包计算序列的 $b$ 值和 $p$ 值。结果显示, 维西—乔后断裂带周边地震序列呈现出两组明显不同的时空分布特征, 余震序列优势分布方向为NW向的3组地震序列衰减较快, 序列 $b$ 值相对较低, 序列震中分布长宽比较大; 2016年云龙  $M_s5.0$  地震序列优势分布方向为NE向, 序列震中分布长宽比较小, 衰减较慢, 序列 $b$ 值相对较高。基于序列类比结果和 $b$ 值时间变化曲线分析认为, 2021年漾濞  $M_s6.4$  地震序列后续发生较大破坏性余震的可能性较小。综合2013年以来维西—乔后断裂带中强地震时空分布特征和区域地质构造资料分析认为, 未来该地区  $M_s \geq 5.0$  地震存在向东南或向北迁移的可能性。

**关键词:** 维西—乔后断裂; 漾濞  $M_s6.4$  地震; 地震重定位; 余震衰减; 地震危险性

**中图分类号:** P315.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)03-0367-13

## 0 引言

2021年5月21日21时48分在云南省大理州漾濞县(25.67°N, 99.87°E)发生  $M_s6.4$  地震, 震源深度8 km。本次地震发生在维西—乔后断裂带西侧, 震中距离该断裂约12 km。2013年以来, 维西—乔后断裂带周边中强地震进入活跃期, 连续发生2013年3月3日洱源  $M_s5.5$  地震、4月17日  $M_s5.0$  地震(赵小艳, 付虹, 2014; 杨军等, 2015)、2016年5月18日云龙  $M_s5.0$  地震(Jiang *et al.*, 2019)和2017年3月27日漾濞  $M_s5.1$  地震(李姣等, 2020)。2021年漾濞  $M_s6.4$  地震是维西—乔后断裂带及周边地区有历史记载以来发生的最大地震, 该地震的发生表明维西—乔后断裂带地震活动在进一步增强。

通过研究地震序列, 能够提取地震孕育过程和震源区物理状态的某些性质, 有助于判断一次

地震或一组地震事件发生后发震区或相关区域未来地震活动发展趋势(周仕勇, 许忠淮, 1999)。对2013年以来维西—乔后断裂带及周边地区的地震序列进行研究, 给出该构造区地震序列时空分布特征和衰减特征, 可为2021年漾濞  $M_s6.4$  地震序列后续余震活动研判和维西—乔后断裂带未来中强地震危险性评估提供依据。本文使用双差定位方法对4组(5次)地震序列进行精确定位, 分别计算每个地震序列的 $b$ 值和 $p$ 值, 基于地震序列的时空分布和衰减特征, 探讨漾濞  $M_s6.4$  地震序列后续余震活动强度和维西—乔后断裂带未来中强地震危险性。

## 1 数据与方法

### 1.1 地质构造与台站分布

维西—乔后断裂位于青藏高原东缘的滇西北地区, 该地区是特提斯—喜马拉雅构造域东南部

\* 收稿日期: 2021-07-19.

**基金项目:** 云南省地震局自立科研项目——漾濞地震专项(2021YBZX03)、地震科技星火计划项目(XH20054Y)、国家自然科学基金——云南联合基金重点项目(U2002211)及云南省地震局“地震机理与孕震环境研究”创新团队联合资助。

**第一作者简介:** 王光明(1990-), 工程师, 主要从事地震活动性、地震精定位研究. Email: gmwang@whu.edu.cn.

弧形构造转折处,也是扬子准地台与滇西地槽褶皱带的交接区,构造十分复杂(常祖峰等,2014;黄小龙等,2015)。区内发育有 NW—NWN 走向和 NE 走向的两组断裂系统(图 1),其中 NW 向断裂包括红河断裂、楚雄—建水断裂、维西—乔后断裂(又称通甸—巍山断裂)等;NE 向的断裂包括龙蟠—乔后断裂、程海断裂、洱源—鹤庆断裂等(任俊杰等,2007;黄小龙等,2015;安晓文等,2018)。维西—乔后断裂北起雪山山麓白济汛一代,经维西、通甸、乔后,止于点苍山西南,长约 280 km(常祖峰等,2016a)。断裂总体走向 NW,倾向 NE 或 SW,倾角  $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ,早期活动性质以挤压为主,晚第四纪以来则以右旋走滑为主兼张性正断,控制了维西、马登、乔后等第四纪盆地的发育,为晚更新世—全新世活动断裂(常祖峰等,2014)。历史上维西—乔后断裂地震活动水平并不高,1900 年以来以 5、6 级地震活动为主,最大地震为 1948 年剑川  $M_s 6.3$  地震。

维西—乔后断裂带所在的滇西北地区监测能力相对较强,除云南数字地震台网的固定台站之外,还有下关小孔径测震台网,而且在每次中强

地震之后,云南省地震局还会迅速派出工作人员在震中周边架设流动台站,提高震源区监测能力。漾濞  $M_s 6.4$  地震发生后,云南省地震局和中国地震局第一监测中心在震区增设了 5 个流动测震台,并于 5 月 23 日相继投入运行,较好的观测能力为本文提供了丰富的地震目录和震相到时数据。

## 1.2 研究方法

曲均浩和蒋海昆(2012)的研究表明,余震序列满足两个重要的幂律统计关系,即描述地震震级—频度关系的 G—R 关系(Gutenberg, Richter, 1944)和描述主震后余震随时间衰减关系的修正大森公式(Utsu, 1961; Utsu *et al.*, 1995)。精确定位的地震序列可为研判后续余震发展过程及未来强震迁移趋势提供重要依据(房立华等,2018;王光明等,2018; Wang *et al.*, 2018; 易桂喜等,2019; Jiang *et al.*, 2019)。本文分别使用 ZMAP 软件包计算地震序列的  $b$  值和  $P$  值,同时使用双差定位方法对 5 次地震序列进行重定位。

### 1.2.1 震级—频度特征

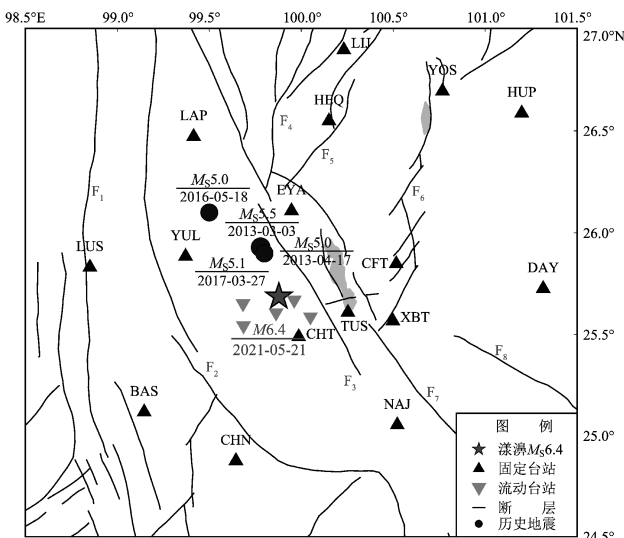
监测地球应力状态对于理解地震的发震机制和灾害分布具有重要意义(Nanjo, 2020)。实验室研究和实际观测均表明关系 G—R 中的  $b$  值对应力变化敏感,而且它们之间呈反相关的关系,即应力水平越高、 $b$  值越低(Scholz, 1968; Schorlemmer *et al.*, 2005; 易桂喜等,2013; 史海霞等,2018; Gulia, Wiemer, 2019)。本文使用最大似然法计算 4 组中强地震序列的  $b$  值,寻找该区域地震序列  $b$  值特征的异同点。

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。具体计算公式和误差估算公式如下(冯建刚等,2016):

$$b = \frac{\lg e}{\overline{M} - (M_c - \frac{\Delta M}{2})} \quad (1)$$

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

式中:  $\overline{M}$  为平均震级;  $\Delta M$  为震级分档,本文设为 0.1;  $n$  为计算  $b$  值所用的样本量。



F<sub>1</sub>: 怒江断裂; F<sub>2</sub>: 澜沧江断裂; F<sub>3</sub>: 维西—乔后断裂;  
F<sub>4</sub>: 龙蟠—乔后断裂; F<sub>5</sub>: 洱源—鹤庆断裂; F<sub>6</sub>: 程海  
断裂; F<sub>7</sub>: 红河断裂; F<sub>8</sub>: 楚雄—建水断裂

图 1 漾濞地震周边断裂、历史地震和测震台站分布

Fig. 1 Faults, historical earthquakes and seismic stations around the Yangbi earthquake

### 1.2.2 序列衰减特征

余震序列衰减特征研究是震后趋势判断、强余震预测和发震构造分析等研究的组成部分，对理解主震发震过程和地震危险性分析具有重要作用。修正的大森公式是对余震序列频次随时间衰减的最好描述（曲均浩，蒋海昆，2012；谭毅培等，2015），其表达式为：

$$n(t) = \frac{K}{(t+c)^p} \quad (3)$$

式中： $n(t)$  为单位时间内余震的频度； $K$ 、 $p$ 、 $c$  为常数； $p$  表示余震序列衰减的快慢，Utsu 等（1995）对全球中强地震余震序列衰减特征的研究结果显示， $p$  值接近于 1，而且与所选择的震级下限无关。

### 1.2.3 双差定位方法

双差定位方法的核心是将地震事件丛集根据一定的规则进行两两配对，使用两个事件相对于同一地震台站的观测走时差与理论走时差之差（双差）反演震源之间的相对位置，进而得到整个地震丛的精确位置（Waldhauser, Ellsworth, 2000）。双差定位方法可以消除震源和台站之间因为速度模型不精确产生的误差。在地震丛集中，地震之间因为配对可以相互约束，相比于孤立定位增加了约束条件，可有效提高地震丛集的相对定位精度。因此，该方法目前已成为国内外地震序列重定位最常用的方法之一（Waldhauser, Schaff, 2008；Fang *et al.*, 2015a, b；房立华等，2018；王光明等，2018；Wang *et al.*, 2018；Jiang *et al.*, 2019；张致伟等，2019）。

## 2 结果分析

### 2.1 地震序列时间发展特征

大震后 24 h 内发生的地震的最小完备震级（ $M_c$ ）的确定十分重要，对序列  $b$  值和  $p$  值计算结果的可信程度有较大影响。因此，笔者分别计算每个地震序列主震发生后 24 h 的  $M_c$ ，然后选取序列中  $M \geq M_c$  的地震进行分析。2013 年洱源  $M_s5.5$  和  $M_s5.0$  地震序列  $M_c = 1.1$ ；2016 年云

龙  $M_s5.0$  地震序列  $M_c = 1.0$ ；2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震序列  $M_c = 1.1$ ；2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震序列  $M_c = 1.2$ 。

基于地震序列的震级—时间（ $M-T$ ）图（图 2）可以全面了解地震序列的发展过程。由图 2 可见，维西—乔后断裂带及周边地区中强地震序列前震比例较高，3 次地震序列的主震发生前 2 d 在震源区都出现了中小地震活动：2016 年云龙  $M_s5.0$  地震前震源区发生 4 次  $M_L \geq 1.0$  前震，其中最大为  $M_L2.3$  地震；2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震前震源区发生 6 次  $M_L \geq 1.0$  前震，其中最大为主震 15 min 前  $M_s4.7$  地震；2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震震源区发生一系列 3、4 级地震，主震前 27 min 发生最大前震  $M_s5.6$  地震。此外，该地区地震序列余震震级衰减较快，除 2016 年云龙  $M_s5.0$  地震外，其它 4 次地震序列强余震（对于  $M_s5.0 \sim 5.9$  地震，强余震指 3 级以上地震；对于  $M_s6.0 \sim 6.9$  地震，强余震指 4 级以上地震）主要发生在 7 d 内。

笔者分别选取每次地震主震发生后 1 个月  $M \geq M_c$  的地震，采用 ZMAP 程序中的最大似然法计算每个地震序列的  $b$  值。结果显示，该区域地震序列的  $b$  值差异较大（图 3），2016 年云龙  $M_s5.0$  地震序列  $b$  值最高（0.90），2013 年洱源  $M_s5.5$  地震序列和 2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震序列的  $b$  值相对较高（分别为 0.78、0.71），而 2013 年洱源  $M_s5.0$  地震序列和 2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震序列  $b$  值较低（分别为 0.66、0.64）。

笔者分别选取主震发生后 1 个月  $M \geq M_c$  的地震，使用 ZMAP 程序包计算每个序列的  $p$  值。结果显示，该区域地震序列衰减特征呈现明显不同的 3 种类型（图 4）：2013 年洱源  $M_s5.5$  地震序列、2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震序列  $p$  值 1.0 附近（分别为 0.96、1.06），与 Utsu 等（1995）统计得到的全球中强地震  $p$  值一致，表明序列衰减相对正常；2013 年洱源  $M_s5.0$  地震序列和 2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震序列  $p$  值超过 1.0（分别为 1.19、1.39），表明序列衰减较快；2016 年云龙  $M_s5.0$  地震序列  $p$  值为 0.55，远低于 1.0，表明序列衰减缓慢。

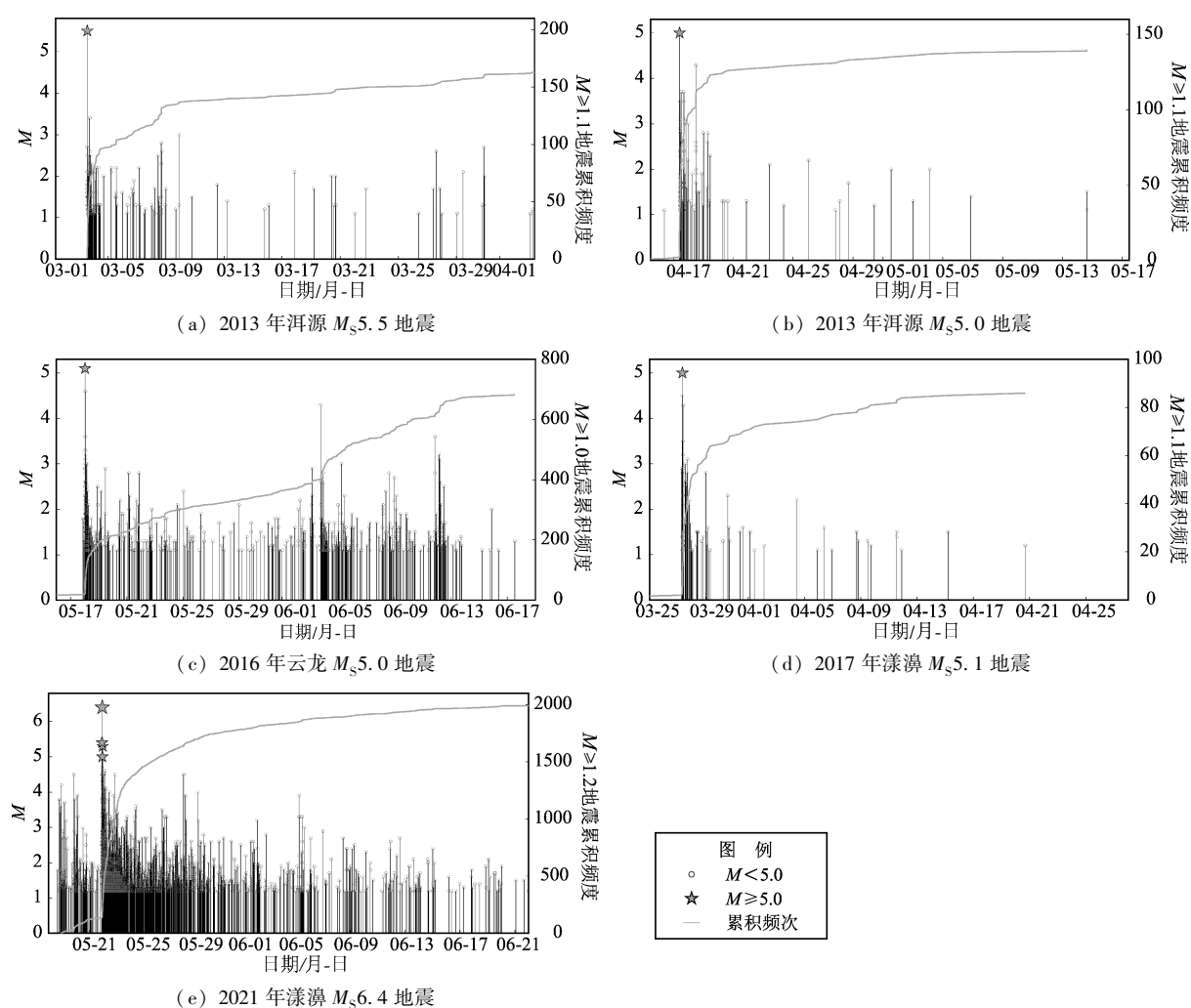
图2 维西—乔后断裂带地震序列  $M-T$  图

Fig. 2 Magnitude-time distribution of earthquake sequences in the Weixi-Qiaohou fault zone

## 2.2 地震序列空间展布特征

为保证数据的可靠性及定位结果的稳定性,本文选取震相数大于6个的地震事件进行重定位,采用LSQR方法进行反演。重定位后的地震序列空间分布如图5~9所示。

2013年洱源 $M_s5.5$ 地震序列呈NWN向条带状展布,与东侧的维西—乔后断裂平行,序列长约15 km、宽约7 km,主震位于整个地震序列的中间。深度剖面显示, $M_s5.5$ 主震位于地震序列的最底部,整个地震序列震源深度主要分布在7~15 km,但是两个深度剖面上均未显示出明显的倾角特征。4月17日洱源 $M_s5.0$ 地震序列震中分布特征与3月3日 $M_s5.5$ 地震序列相同,同样呈NWN向展布,但余震更为集中,序列长约9 km、宽约

3 km,主震位于地震序列的中部,余震序列主要分成2个部分,一部分位于主震周边,另一部分位于主震南侧。深度剖面显示, $M_s5.0$ 主震位于序列中间位置,整个地震序列震源深度主要分布在6~14 km,而且在 $BB^*$ 剖面呈现出约 $45^\circ$ 的倾角。赵小艳和付虹(2014)给出的2013年这2次主震的震源机制解(图5a、6a)显示其均为正断型地震,与本文地震序列空间分布特征一致。据此推测,2013年洱源地震序列的发震断层为NW走向的正断层。

2016年云龙 $M_s5.0$ 地震序列主要呈NEN向分布,地震序列长约8 km、宽约6 km。深度剖面显示, $M_s5.0$ 主震位于序列最底部,余震序列主要分布在4~15 km深度范围内,序列在 $BB^*$ 剖面上呈现出北西向陡倾的分布特征,倾角接近 $90^\circ$ ,与

Jiang 等 (2019) 给出的主震震源机制解 (图 7a) 一致, 认为云龙  $M_s5.0$  地震的发震断层应该是 NEN 走向、近垂直的走滑断裂。

2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震序列呈 NW 向分布,

与东侧的维西—乔后断裂走向一致, 地震序列长约 10 km、宽约 2 km,  $M_s5.1$  主震位于地震序列的北西端。深度剖面显示,  $M_s5.1$  地震位于地震序列震源深度的底部, 整个地震序列震源深度主要分

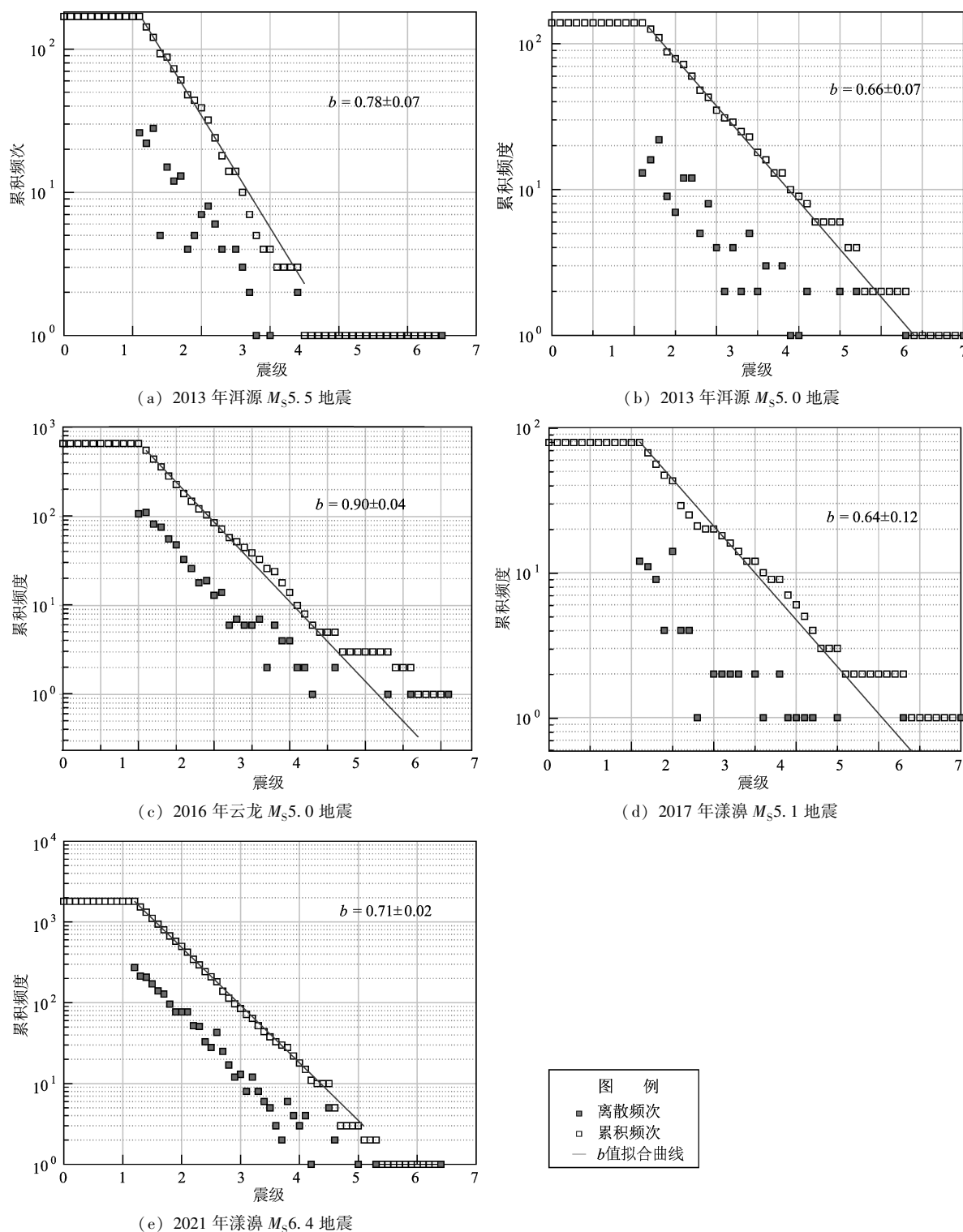


图3 维西—乔后断裂带地震序列震级-频度分布

Fig. 3 Magnitude - Frequency distribution of earthquake sequences in the Weixi - Qiaohou fault zone

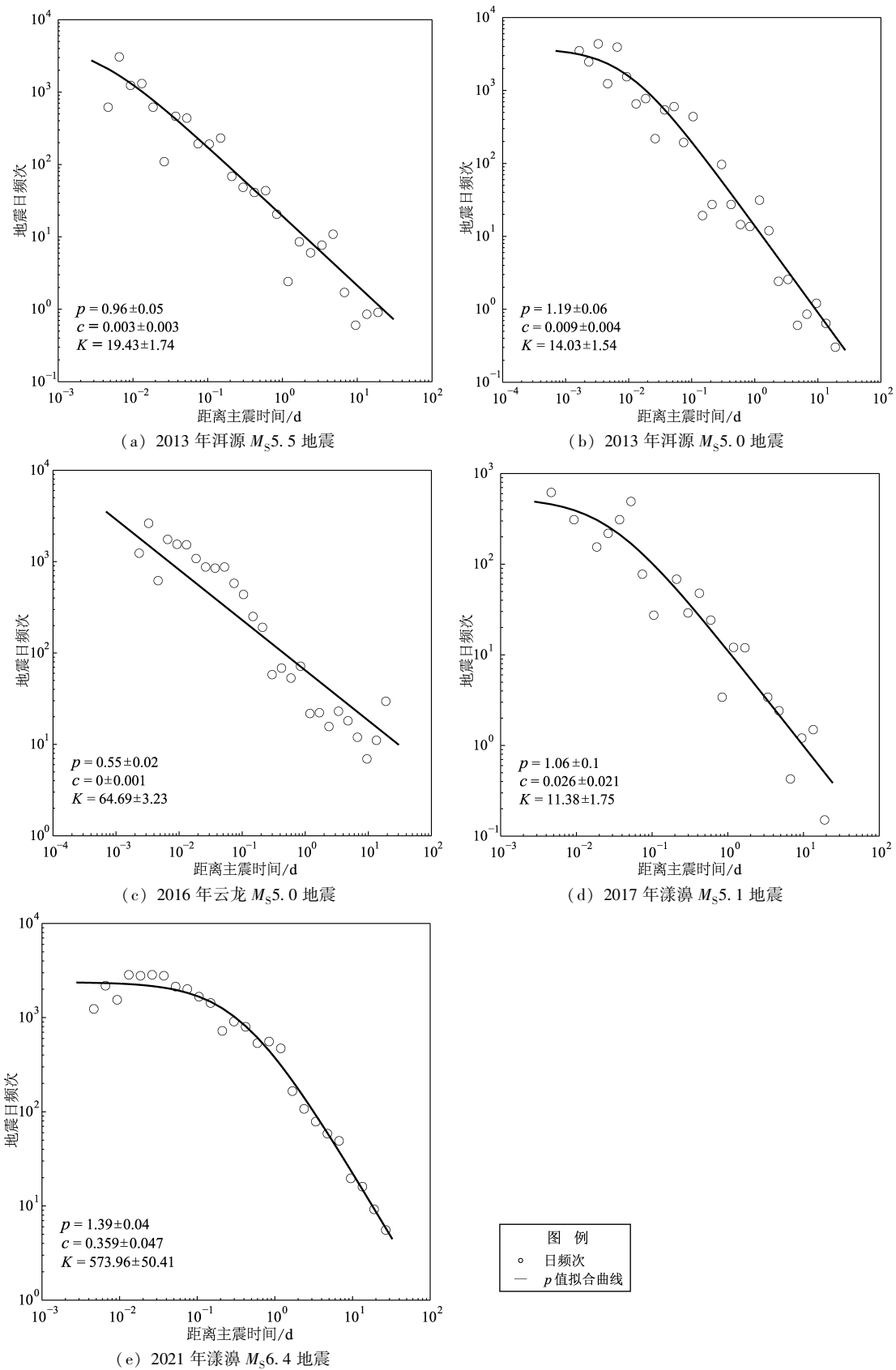


图 4 维西—乔后断裂带地震序列余震频度随时间衰减结果

Fig. 4 Temporal decay of aftershocks with modified Omori's law of earthquake sequences in the Weixi - Qiaohou fault zone

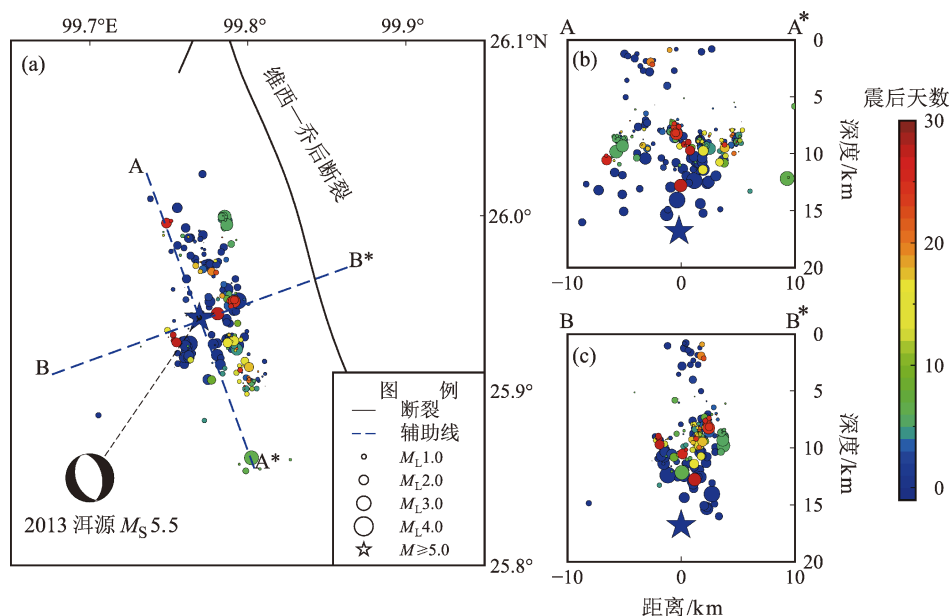


图5 2013年洱源  $M_S 5.5$  地震序列震中分布 (a)、沿 AA\* 深度剖面 (b) 和 BB\* 深度剖面 (c)

Fig. 5 Spatial distribution (a), AA\* depth profile (b), and BB\* depth profile (c) of the 2013 Eryuan  $M_S 5.5$  earthquake sequence

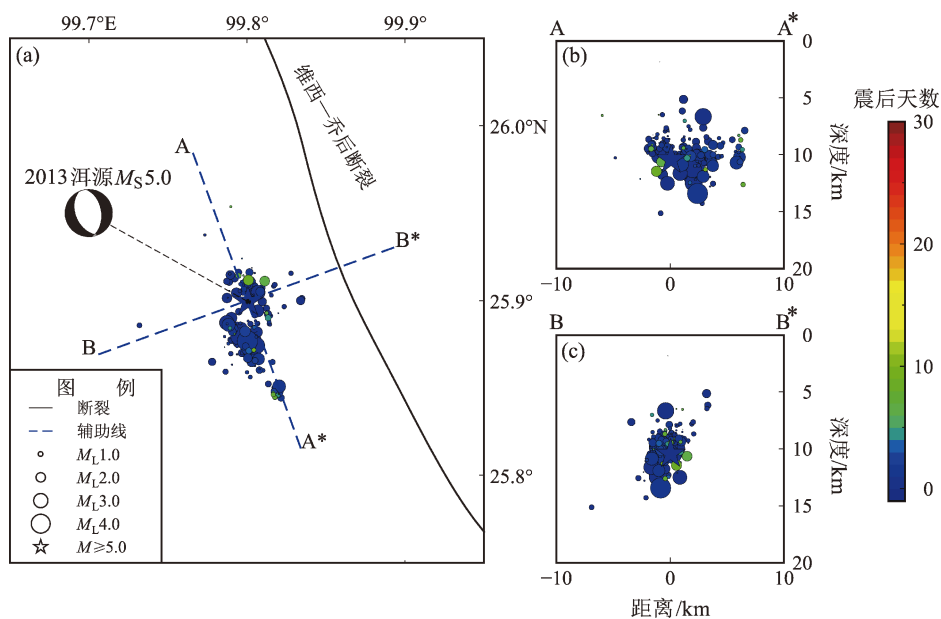


图6 2013年洱源  $M_S 5.0$  地震序列震中分布 (a)、沿 AA\* 深度剖面 (b) 和 BB\* 深度剖面 (c)

Fig. 6 Spatial distribution (a), AA\* depth profile (b), and BB\* depth profile (c) of the 2013 Eryuan  $M_S 5.0$  earthquake sequence

布在 4 ~ 15 km。潘睿等 (2019) 反演得到的震源机制解 (图 8a) 显示, 漾濞  $M_S 5.1$  主震为走滑型地震, NW 向节面倾角较为陡立, 与本文余震 BB\* 剖面上近垂直分布的特征一致。综合分析重定位后地震序列的空间分布和震源机制解结果, 认为 2017 年

漾濞地震的发震断层应为陡倾的 NW 向断层。

2021 年漾濞  $M_S 6.4$  地震的地震序列主要沿 NW—SE 向展布 (图 9), 序列东南段呈扫帚状或马尾状分布, 整体走向  $135^\circ$ , 与东侧的维西—乔后断裂呈  $15^\circ$  夹角。地震序列全长约 25 km、宽 8 km,

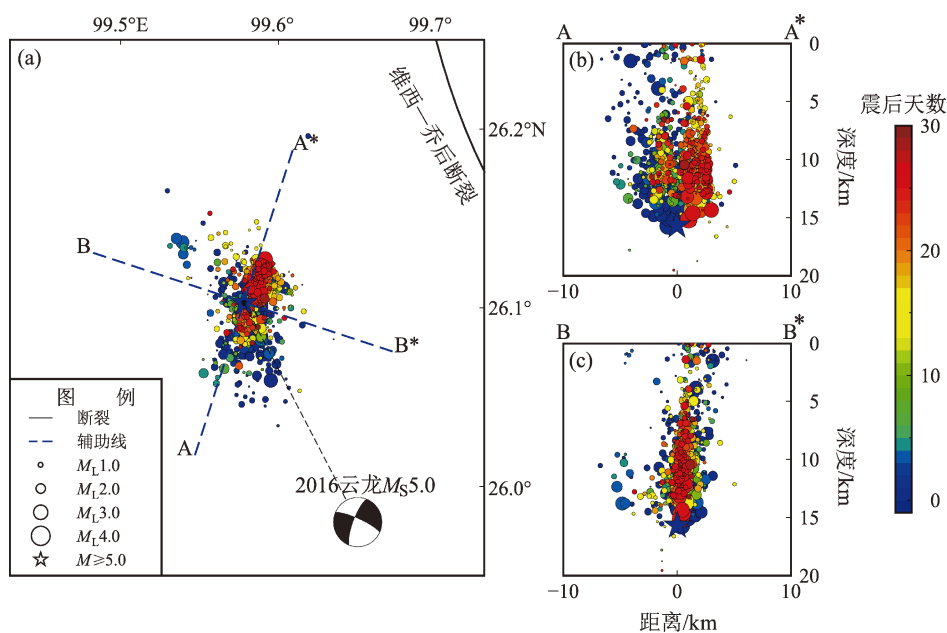


图 7 2016 年云龙  $M_{\text{s}}5.0$  地震序列震中分布 (a)、沿 AA\* 深度剖面 (b) 和 BB\* 深度剖面 (c)

Fig. 7 Spatial distribution (a), AA\* depth profile (b), and BB\* depth profile (c) of the 2016 Yunlong  $M_{\text{s}}5.0$  earthquake sequence

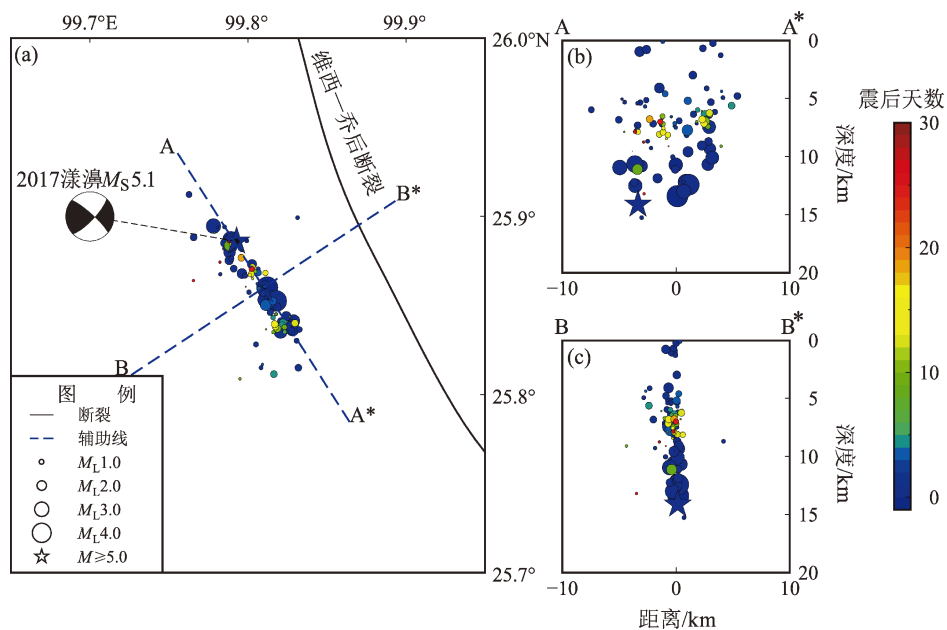


图 8 2017 年漾濞  $M_{\text{s}}5.1$  地震序列震中分布 (a)、沿 AA\* 深度剖面 (b) 和 BB\* 深度剖面 (c)

Fig. 8 Spatial distribution (a), AA\* depth profile (b), and BB\* depth profile (c) of the 2017 Yangbi  $M_{\text{s}}5.1$  earthquake sequence

$M_{\text{s}}6.4$  主震位于地震序列 NW 端。深度剖面显示, 整个地震序列震源深度主要集中在 2 ~ 14 km,  $M_{\text{s}}6.4$  主震位于序列中部。重定位结果显示序列在 BB\* 剖面上近垂直分布, 与美国 USGS 给出的漾濞  $M_{\text{s}}6.4$  主震震源机制解一致, 表明 2021 年漾濞

$M_{\text{s}}6.4$  地震序列的发震断层应为 NW 向、倾角较陡的右旋走滑断裂。

综合上述分析, 维西—乔后断裂带及周边地区中等地震时空分布特征可归纳为:

(1) 地震序列震中主要呈 NW 向条带状展



布，且长宽比较高，仅云龙  $M_{\text{s}}5.0$  地震序列优势展布方向为 NEN 向。

(2) 余震序列衰减特征具有多样性，2016 年云龙  $M_{\text{s}}5.0$  地震衰减较慢 ( $p = 0.55$ )，2013 年洱源  $M_{\text{s}}5.5$  地震和 2017 年漾濞  $M_{\text{s}}5.1$  地震衰减相对正常 ( $p$  值在 1.0 附近)，2013 年洱源

$M_{\text{s}}5.0$  地震和 2021 年漾濞  $M_{\text{s}}6.4$  地震衰减较快 ( $p$  值远高于 1.0)。

(3) 地震序列  $b$  值同样具有多样性，2016 年云龙  $M_{\text{s}}5.0$  地震序列  $b$  值最高，2017 年漾濞  $M_{\text{s}}5.1$  地震序列  $b$  值最低，其余 3 次地震序列  $b$  值位于上述序列之间。

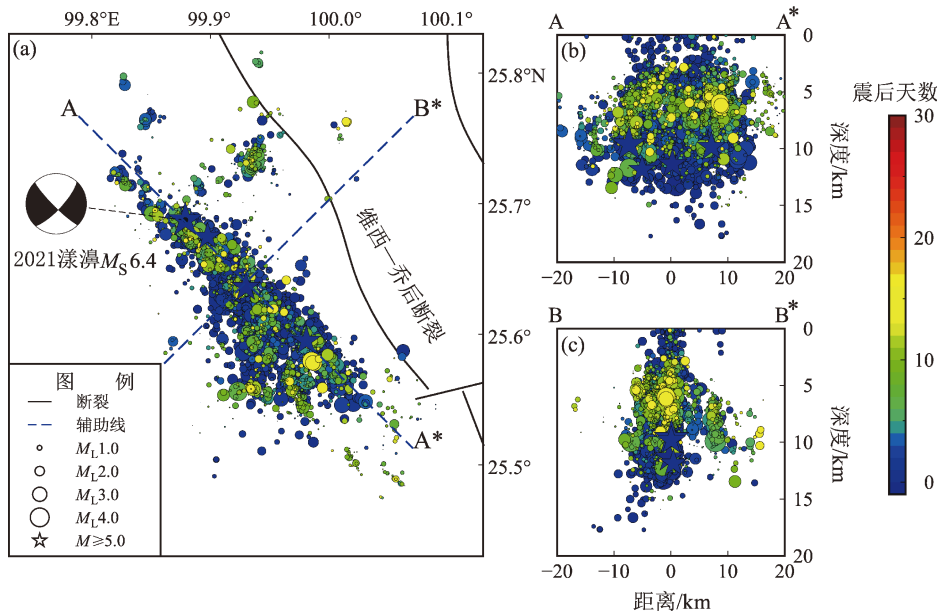


图9 2021 年漾濞  $M_{\text{s}}6.4$  地震序列震中分布 (a)、沿 AA\* 深度剖面 (b) 和 BB\* 深度剖面 (c)

Fig. 9 Spatial distribution (a), AA\* depth profile (b), and BB\* depth profile (c) of the 2021 Yangbi  $M_{\text{s}}6.4$  earthquake sequence

表1 维西—乔后断裂地震序列时空分布特征							
Tab. 1 Characteristics of temporal – spatial distribution of earthquake sequences located in the Weixi – Qiaohou fault zone							
地震序列	前震活动	序列参数		余震展布特征			
		$b$ 值	$p$ 值	长/km	宽/km	展布方向	倾角特征
2013 – 03 – 03 洱源 $M_{\text{s}}5.5$	无	0.78	0.96	15	7	NW 向	无明显倾向特征
2013 – 04 – 17 洱源 $M_{\text{s}}5.0$	无	0.66	1.19	9	3	NW 向	倾向 SW，倾角约为 $45^{\circ}$
2016 – 05 – 18 云龙 $M_{\text{s}}5.0$	1、2 级前震	0.90	0.55	8	6	NE 向	倾向 NW，倾角约为 $85^{\circ}$
2017 – 03 – 27 漾濞 $M_{\text{s}}5.1$	$M_{\text{s}}4.7$ 前震	0.64	1.06	10	2	NW 向	倾角约为 $90^{\circ}$
2021 – 05 – 21 漾濞 $M_{\text{s}}6.4$	最大前震为 $M_{\text{s}}5.6$	0.71	1.39	25	8	NW 向	倾向 SW，倾角约为 $85^{\circ}$

3 讨论

3.1 2021 年漾濞  $M_{\text{s}}6.4$  地震后续余震水平

本文采用双差定位方法对 2013 年以来维西—乔后断裂带及周边地区 4 组 (5 次) 地震序列进行重新定位，同时使用 ZMAP 软件包分别计算了各地

震序列的  $b$  值和  $p$  值。结果显示维西—乔后断裂带及周边地区地震序列呈现出两组明显不同的时空分布特征：余震序列优势分布方向为 NW 向的 4 次地震序列衰减较快，序列  $b$  值相对较低，序列震中分布长宽比较大；2016 年云龙  $M_{\text{s}}5.0$  地震序列优势分布方向为 NE 向，衰减缓慢，序列  $b$  值相对较高，序列震中分布长宽比较小。基于  $b$  值的物理意

义分析, NW 走向断层的应力水平可能高于 NE 走向的断层。

2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震序列震中呈 NW 向条带状分布, 与 2013 年洱源  $M_s5.5$ 、 $M_s5.0$  地震和 2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震相同, 均为 NW 走向断层活动的结果。且  $M_s6.4$  地震序列  $p$  值为 1.39, 高于全球平均水平 (1.0), 与 2013 年洱源  $M_s5.0$  地震类似, 表明此次地震序列衰减较快。地震序列空间分布和震源机制解结果显示, 与 2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震类似, 2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震为右旋走滑型地震, 且存在前震序列, 最大前震与主震相隔时间很短 (约 27 min)。综上认为, 2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震序列与 2013 年 4 月 17 日洱源  $M_s5.0$ 、2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震的时空分布特征更为相似, 而这两组地震序列中, 其后均未发生较大余震。因此, 从地震序列时空分布和衰减的相

似性特征类比来看, 漾濞  $M_s6.4$  地震后续发生较大破坏性余震的可能性较小。

考虑到 2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震与其他 3 组地震序列震级差较大, 本文同时使用  $b$  值随时间变化曲线探讨漾濞  $M_s6.4$  地震后续余震活动强度。选取 2016 年 1 月 1 日至 2021 年 6 月 21 日震源区的地震事件, 采用固定窗长 (200 个地震事件) 和步长 (1 个地震事件) 计算  $b$  值, 将得到的  $b$  值作为该时间窗最后时刻的  $b$  值, 计算结果如图 10 所示。从图中可以看出, 漾濞  $M_s6.4$  地震震源区背景  $b$  值约为 0.9, 该区域  $b$  值从 5 月 18 日开始下降, 至主震前降至最低值, 漾濞  $M_s6.4$  地震发生后,  $b$  值迅速回升, 到 6 月 21 日, 回升至震前平均水平, 表明该区域的应力得到有效释放。因此, 从  $b$  值时间变化曲线分析, 漾濞  $M_s6.4$  地震后续发生较大破坏性余震的可能性较小。

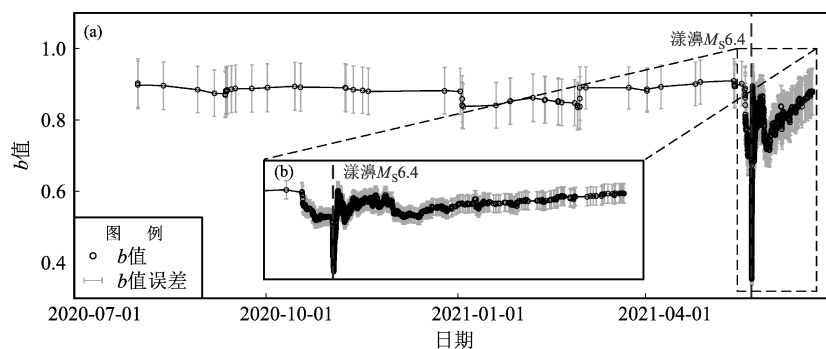


图 10 2020-07-01 至 2021-06-30 (a) 和 2021-05-15 至 2021-06-22 (b)  
漾濞  $M_s6.4$  地震震源区  $b$  值随时间变化曲线

Fig. 10  $b$ -value time curve of the Yangbi  $M_s6.4$  focal area from July 1, 2020 to June 30, 2021 (a) and from May 15, 2021 to June 22, 2021 (b)

### 3.2 维西—乔后断裂带周边区域未来中强地震危险性

维西—乔后断裂带位于青藏高原东南缘, 是兰坪—思茅块体和扬子块体的边界 (任俊杰等, 2007; 常祖峰等, 2014, 2016a, b)。青藏高原物质持续向东南挤出的过程中, 在维西—乔后断裂附近受到兰坪—思茅地块的阻挡, 导致该地区产生 NWN 向至近 SN 向构造应力场 (崔效锋等, 2006)。已有研究 (Wang *et al.*, 1998; 毛玉平等, 2003; 任俊杰等, 2007; 常祖峰等, 2014, 2016b; 罗睿洁等, 2015) 关于该区活动断裂的调查研究成果表明, 在喜山运动晚期 (约上新世), 滇西北

地区的构造应力场由近 EW 向转为以 NWN 至近 SN 向水平挤压为主 (阚荣举等, 1977; 崔效锋等, 2006), 导致该区的断裂性质发生反转 (图 1)。研究区内的大部分 NE 向走滑断裂停止活动, 而 NW 向断裂成为该区主要的第四纪活动断裂, 包括正断层和右旋走滑断层两类 (Wu *et al.*, 2009; 吴中海等, 2012; 黄小龙等, 2015)。

中强地震的发生往往与该地区的构造特征密切相关, 根据震源机制解和精确的地震序列空间分布, 可以对地震的发震构造进行分析探讨 (常祖峰等, 2014)。2013 年以来 5 次地震序列的空间分布特征和主震震源机制解结果显示, 维西—乔

后断裂带及周边地区中强地震的发震构造以 NW 向断层为主:2013 年洱源  $M_s5.5$  和  $M_s5.0$  地震是维西—乔后断裂(或炼铁盆地东缘断裂)正断活动的结果(赵小艳,付虹,2014;常祖峰等,2014;黄小龙等,2015);2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震是维西—乔后断裂右旋走滑运动的结果(李姣等,2020);2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震为维西—乔后断裂附近 NW 向断层右旋走滑活动的结果(王光明等,2021)。上述 3 组 NW 向断层控制的地震存在向南迁移的趋势,而且在时间上存在准周期性,周期约为 4 a (2013 年—2017 年—2021 年)。值得注意的是,在 2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震震中和 2017 年漾濞  $M_s5.1$  地震震中之间,存在 15 km 左右的空段,在近 NS 向区域应力加载下,在未来 NW 向断层进一步贯通的过程中,该空段是未来可能发生中强地震的地区。

除 NW 向断层活动外,该区域还存在 NE 向断层控制的中强地震。重定位结果显示,2016 年云龙  $M_s5.0$  地震余震优势分布方向为 NNE 向,Jiang 等(2019)分析认为该地震的发震构造可能是 NNE 向的隐伏断层。2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震同样触发了 NE 向断层的活动,表现为在主震序列 NE 侧出现一组最大达  $M_L4.0$  的地震活动。因此,该地区还需注意未来 NE 向断层活动产生  $M_s \geq 5.0$  地震的危险。

综上所述,维西—乔后断裂带及周边地区 NW 向断层在区域应力场的作用下,未来可能会进一步贯通或向东南发展,进而发生  $M_s \geq 5.0$  地震;区域内部 NE 向断裂同样具备发生  $M_s \geq 5.0$  地震的能力。因此,笔者认为该地区未来存在  $M_s \geq 5.0$  地震活动进一步向东南和向北迁移或扩展的可能性。

## 4 结论

本文采用双差定位方法对 2013 年以来维西—乔后断裂带周边 5 次地震序列进行重新定位,并使用 ZMAP 软件包分别计算了各地震序列的  $b$  值和  $p$  值。基于地震序列时空分布特征和衰减特征对比分析,得到以下结论:

(1) 维西—乔后断裂带及周边地区地震序列呈现出两组明显不同的时空分布特征:余震序列

优势分布方向为 NW 向的 4 次地震序列衰减较快,序列  $b$  值相对较低,序列震中分布长宽比较大;2016 年云龙  $M_s5.0$  地震序列优势分布方向为 NE 向,序列震中分布长宽比较小,衰减较慢,序列  $b$  值相对较高。

(2) 基于地震序列时空分布和衰减的相似性特征类比以及  $b$  值随时间变化曲线分析,漾濞  $M_s6.4$  地震后续发生较大破坏性余震的可能性较小。

(3) 综合 2013 年以来维西—乔后断裂带中强地震时空分布特征和区域地质构造资料分析,认为该地区未来存在  $M_s \geq 5.0$  地震向东南或向北迁移的可能性。

本文部分图件采用 GMT6 软件(Wessel *et al*, 2019)和 ZMAP 软件包(Wiemer, Wyss, 1994)绘制,地震重定位使用了拉蒙特—多尔蒂地球观测站 Felix Waldhuaser 教授提供的双差定位程序和云南数字地震台网提供的震相到时数据,审稿专家对稿件的修改提出了宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献:

- 安晓文,常祖峰,陈宇军,等. 2018. 云南第四纪活动断裂暨《云南第四纪活动断裂分布图》[M]. 北京:地震出版社,11—19.
- 常祖峰,常昊,李鉴林,等. 2016b. 维西—乔后断裂南段正断活动特征[J]. 地震研究,39(4):579—586.
- 常祖峰,常昊,臧阳,等. 2016a. 维西—乔后断裂新活动特征及其与红河断裂的关系[J]. 地质力学学报,22(3):517—530.
- 常祖峰,张艳凤,周青云,等. 2014. 2013 年洱源  $M_s5.5$  地震烈度分布及震区活动构造背景研究[J]. 中国地震,30(4):560—570.
- 崔效锋,谢富仁,张红艳. 2006. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义[J]. 地震学报,28(5):451—461.
- 房立华,吴建平,苏金蓉,等. 2018. 四川九寨沟  $M_s7.0$  地震主震及其余震序列精定位[J]. 科学通报,63(7):649—662.
- 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.
- 黄小龙,吴中海,蒋瑶,等. 2015. 2013 年 3 月 3 日云南大理洱源  $M_s5.5$  地震烈度分布及发震构造[J]. 地质通报,34(1):135—145.
- 阚荣举,张四昌,晏凤桐,等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报,20(2):96—109.
- 李姣,姜金钟,杨晶琼. 2020. 2017 年漾濞  $M_s4.8$  和  $M_s5.1$  地震序列的微震检测及重定位[J]. 地震学报,42(5):527—542.
- 罗睿洁,吴中海,黄小龙,等. 2015. 滇西北宾川地区主要活动断裂及

- 其活动构造体系[J]. 地质通报, 34(1): 155–170.
- 毛玉平, 韩新民, 谷一山, 等. 2003. 云南地区强震( $M \geq 6$ )研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 潘睿, 姜金钟, 付虹, 等. 2019. 2017 年云南漾濞  $M_s 5.1$  及  $M_s 4.8$  地震震源机制解和震源深度测定[J]. 地震研究, 42(3): 338–348.
- 曲均浩, 蒋海昆. 2012. 余震活动机理研究综述[J]. 中国地震, 28(2): 109–120.
- 任俊杰, 张世民, 侯治华, 等. 2007. 滇西北通甸–巍山断裂中段的晚第四纪滑动速率[J]. 地震地质, 29(4): 756–764.
- 史海霞, 孟令媛, 张雪梅, 等. 2018. 汶川地震前的  $b$  值变化[J]. 地球物理学报, 61(5): 1874–188.
- 谭毅培, 曹井泉, 陈继锋, 等. 2015. 2013 年甘肃岷县漳县  $M_s 6.6$  地震余震序列时域衰减特征分析[J]. 地球物理学报, 58(9): 3222–3231.
- 王光明, 刘自凤, 赵小艳, 等. 2018. 2018 年云南通海  $M_s 5.0$  地震序列重定位及发震构造讨论[J]. 地震研究, 41(4): 503–510.
- 王光明, 吴中海, 彭关灵, 等. 2021. 2021 年 5 月 21 日漾濞  $M_s 6.4$  地震的发震断层及其破裂特征: 地震序列的重定位分析结果[J]. 地质力学学报, 27(4): 662–678.
- 吴中海, 赵希涛, 范桃园, 等. 2012. 泛亚铁路滇西大理至瑞丽沿线主要活动断裂与地震地质特征[J]. 地质通报, 31(2): 191–217.
- 杨军, 苏有锦, 李孝宾, 等. 2015. 2013 年洱源  $M_s 5.5$  地震序列  $M_L \geq 3.4$  地震的震源机制解研究[J]. 地震研究, 38(2): 196–202.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2019. 2019 年 6 月 17 日四川长宁  $M_s 6.0$  地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 62(9): 3432–3447.
- 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, 56(4): 1112–1120.
- 张致伟, 龙峰, 王世元, 等. 2019. 四川宜宾地区地震定位及速度结构[J]. 地震地质, 41(4): 913–925.
- 赵小艳, 付虹. 2014. 2013 年洱源  $M_s 5.5$  和  $M_s 5.0$  地震发震构造识别[J]. 地震学报, 36(4): 640–650.
- 周仕勇, 许忠淮. 1999. 地震序列研究综述[J]. 中国地震, 15(3): 268–277.
- Fang L H, Wu J P, Liu J, *et al.* 2015b. Preliminary report on the 22 November 2014  $M_w 6.1/M_s 6.3$  Kangding earthquake, Western Sichuan, China[J]. Seismol Res Lett, 86(6): 1603–1613.
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, *et al.* 2015a. Aftershock observation and analysis of the 2013  $M_s 7.0$  Lushan Earthquake[J]. Seismol Res Lett, 86(4): 1135–1142.
- Gulia L, Wiemer S. 2019. Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks[J]. Nature, 574(7777): 193–120.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquake in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4): 185–188.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016  $M_s 5.0$  Yulong earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications[J]. Pure Appl Geophys., 176(3): 1225–1241.
- Nanjo K Z. 2020. Were changes in stress state responsible for 2019 Ridgecrest, California, earthquakes? [J]. Nature Communications, 11(1): 3082.
- Scholz C H. 1968. The frequency – magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(1): 399–415.
- Schorlemmer D, Wiemer S, Wyss M. 2005. Variations in earthquake – size distribution across different stress regimes[J]. Nature, 437(22): 539–542.
- Utsu T, Ogata Y, Matsuura R S. 1995. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity[J]. Phys Earth, 43(1): 1–33.
- Utsu T. 1961. A statistical study on the occurrence of aftershocks[J]. Geophys Mag, 30: 521–605.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double – difference earthquake algorithm: method and application to northern Hayward fault, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6): 1353–1368.
- Waldhauser F, Schaff D P. 2008. Large – scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross – correlation and double – difference methods[J]. J Geophys Res, 113(B8): B08311.
- Wang E, Burchfiel B C, Royden L H, *et al.* 1998. The Cenozoic Xianshuihe – Xiaojiang, Red River, and Dali Fault Systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China[J]. Geological Society of America, 327: 1–108.
- Wang Q D, Chu R S, Yang H, *et al.* 2018. Complex rupture of the 2014  $M_s 6.6$  Jinggu earthquake sequence in Yunnan Province inferred from double – difference relocation[J]. Pure Appl Geophys, 175(4): 4253–4274.
- Wessel P, Luis J F, Uieda L, *et al.* 2019. The generic mapping tools version 6 [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystem, 20(11): 5556–5564.
- Wiemer S, Wyss M. 1994. Seismic quiescence before the Landers ( $M = 7.5$ ) and Big Bear ( $M = 6.5$ ) 1992 earthquakes[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 84(3): 900–916.
- Wu Z H, Zhang Y S, Hu D G, *et al.* 2009. Late Quaternary normal faulting and its kinematic mechanism of eastern piedmont fault of the Haba – Yulong Snow Mountains in northwestern Yunnan, China[J]. Sci China Ser D – Earth Sci, 52(10): 1470–1484.

## Seismic Risk of the Weixi – Qiaohou Fault Zone Based on Temporal – spatial Distribution Characteristics of Earthquake Sequences

WANG Guangming, PENG Guanling, ZHAO Xiaoyan, FU Hong  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

Before the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake on May 21, 2021, three groups of  $M_s \geq 5.0$  earthquakes have occurred continuously, indicating that the seismic activity of the Weixi – Qiaohou fault zone has increased significantly since 2013. In this paper, we employ double – difference relocation algorithm to relocate earthquake sequences around the Weixi – Qiaohou fault zone since 2013, and use ZMAP to calculate the  $b$  – value and  $p$  – value of these sequences. The earthquake sequences around the Weixi – Qiaohou fault zone present obviously two different types of temporal – spatial distribution characteristics. Three earthquake sequences concentrate in a NW – trend band, which is parallel with the Weixi – Qiaohou fault, and the length – width ratios of the epicenter distribution of these earthquake sequences are larger. Furthermore, these three earthquake sequences decay faster and their  $b$  – values are relatively lower, while the Yunlong  $M_s 5.0$  earthquake sequence in 2016 concentrates to a NE – trend band, and the length – width ratio of the epicenter distribution is relatively smaller. Also, the Yunlong  $M_s 5.0$  earthquake sequence decays slower than the other three earthquake sequences, and its  $b$  – value is relatively higher. A contrastive analysis of earthquake sequences around the Weixi – Qiaohou fault zone shows that the possibility of large destructive aftershocks following the 2021 Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake sequence is small. Based on a comprehensive analysis of the spatial – temporal distribution characteristics of the moderately – strong earthquakes in the Weixi Qiaohou fault zone since 2013 and regional geological structure study, it is considered that  $M_s \geq 5.0$  earthquakes in this area may migrate to the Southeast (or the North) in the future.

**Keywords:** the Weixi – Qiaohou fault zone; the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake; earthquake relocation; attenuation of the aftershock sequence; earthquake hazard