

张广伟,2016,云南地区地震的重新定位及  $b$  值研究,中国地震,32(1),54~62。

# 云南地区地震的重新定位及 $b$ 值研究

张广伟

中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室,北京市海淀区安宁庄路 1 号 100085

**摘要** 通过联合使用固定台站和流动台站资料,对 2010 年 5 月~2011 年 7 月发生在云南地区的 7127 个地震进行重新定位。考虑到速度模型对定位结果的影响,用 VELEST 方法获得云南地区走时残差均方根最小的一维 P 波速度模型,基于反演模型用双差法对地震进行重新定位,得到 5836 个地震的定位结果。结果表明,云南地区发震层主要位于中上地壳,且滇西地区震源深度相对较深。用精定位后的地震目录计算云南地区  $b$  值,从  $b$  值空间分布特征可以看出, $b$  值随深度逐渐减少,且在 9~10km 深度时, $b$  值变化最为明显,可能表明云南地区中强震孕震层主要位于 9km 以下;同时,盈江 5.8 级地震序列  $b$  值的三维空间分布显示,主震发生在高低  $b$  值的过渡带。

**关键词:**  $b$  值 双差定位 中上地壳 一维速度模型

[文章编号] 1001-4683(2016)01-0054-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

云南地区位于印度板块与欧亚板块碰撞带的北东侧,地处青藏高原东南部,由于印度板块的俯冲作用,区内构造运动强烈,是我国大陆内部地震活动最强烈的地区之一。该区地质构造非常复杂,不仅存在有腾冲火山,还有许多大型断裂,如红河断裂、澜沧江断裂、怒江断裂、小江断裂等,这些大型断裂将云南地区分为扬子地块、思茅地块、保山地块和腾冲地块(图 1)。在这种复杂的地质构造背景下,云南地区一直是地学界研究的热点区域(胡家富等,2005;傅竹武等,2007;马宏生等,2008;Lei et al,2009,李永华等,2009;张晓曼等,2011;吴建平等,2013)。

地震定位研究是地震学研究的基础,地震在地表的分布不仅与断层的走向密切相关,而且在深度上可能与断层在深部的几何展布有关(张广伟等,2014),因此,能够对地震进行精确定位,对于确定断层走向、破裂扩展范围及发震构造是非常重要的。 $b$  值是衡量一个地区地震活动水平的重要标志,其主要描述地震震级和频度之间的关系(Gutenberg et al,1944),在国内外地震活动性分析中被广泛应用(Mori et al,1997;Wiemer et al,1998;Wiemer et al,2000;朱艾斓等,2005;Singh et al,2012)。采用精定位后的地震目录能够获得更为准确的  $b$  值分布, $b$  值既能反映小地震与大地震的比例关系,又可以反映介质的应力状态。在浅部由

[收稿日期] 2015-03-12; [修订日期] 2015-11-11

[项目类别] 科研院所基本科研业务专项(ZDJ2013-12)和国家自然科学基金项目(41304037)资助

[作者简介] 张广伟,男,1985 年生,助理研究员,主要从事小震精定位及震源机制反演研究。E-mail:jluaaa@163.com

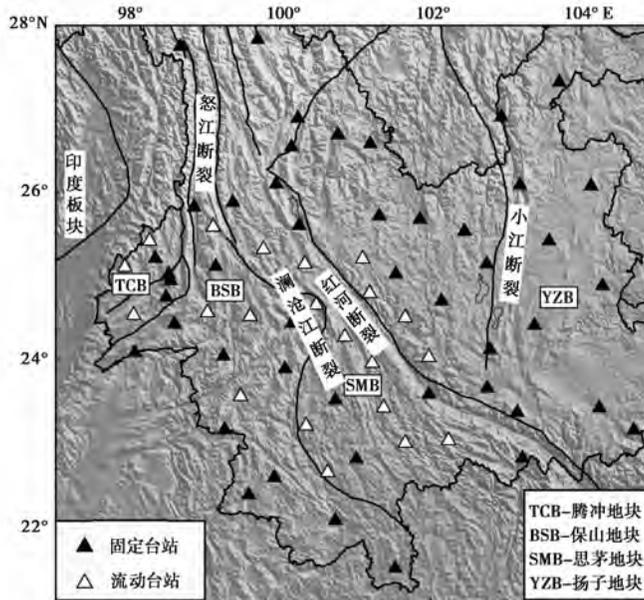


图 1 研究区域及地震台站分布

于地壳介质非常复杂,具有强烈的非均匀性,且岩石的围岩压力值较低,易产生小震,具有高  $b$  值;随着震源深度增加,围岩压力值增加,地壳物质趋于相对均匀,任意初始破裂一旦形成,容易进一步扩展成大破裂,发生大的地震,具有低  $b$  值(Mori et al, 1997)。在本研究中,我们首先采用双差法对地震进行精定位,然后用重新定位后的地震目录计算云南地区  $b$  值,并分析  $b$  值的空间分布及其与震源位置的关系。

## 1 资料与方法

本研究联合使用 2010 年 5 月~2011 年 7 月由云南省固定台站和中国地震局地壳应力研究所布设的 21 个流动台站(Lei et al, 2012)所记录 7127 个地震的到时资料,其中固定台站采用观测报告资料,流动台站依据地震目录截取事件,人工拾取 P 波和 S 波到时,将两部分数据融合,选择震中距 500km 内、至少 4 个台站记录、走时残差为  $\pm 3$ s 以内的走时数据,筛选后固定台站 P 波 47566 条, S 波 45831 条,流动台站 P 波 18036 条、S 波 11495 条。将固定台站与流动台站相结合,较好地改进了台站的方位覆盖,特别是在滇西地区,填补了固定台站的空白区域,而且使大盈江、腾冲等地区的地表台站分布更加均匀(图 1)。

双差法(Waldhauser et al, 2000)是目前较为通用的一种提高地震定位精度的方法,该方法用相对走时残差(或称为双差)来修定地震位置。在重新定位过程中,初始一维速度模型对定位结果影响很大,一个不适当的速度模型会使定位结果出现明显偏差(Michelini et al, 2004),因此在进行双差定位前,要选择一个适用于研究区的一维速度模型。Kissling 等(1988、1995)提出确定最小一维速度模型的 VELEST 法,通过联合校正地震位置及台站位置获得最小一维速度模型,该方法计算的速度模型可使定位结果走时残差均方根最小,因此称为“最小一维速度模型”,其被广泛应用于地震定位及层析成像研究中(Heshan et al, 2001;于

湘伟等,2003)。本研究首先采用 VELEST 法反演获得云南地区最小一维 P 波速度模型,初始模型选择马宏生等(2008)在川滇地区的一维模型(图 2(a))。为增加结果的可靠性,挑选地震位置相对精确的事件,通常震级越高记录的台站越多,本研究选择震级在 2.5 级以上,至少有 8 个台站记录的事件,经过筛选,有 802 个事件参与反演。为了验证结果的可靠性,采用 2 种不同方法进行比较:一是增加资料,我们选择 2.2 级以上的地震共 1426 个参与反演(图 2(a));二是地震资料数不变,改变初始输入模型,在初始模型加入 5% 随机扰动进行 4 次反演(图 2(b))。通过比较,不同资料及不同输入模型所获得的结果与本研究获得的最小一维速度模型较为一致(图 2),说明本研究反演得到的云南地区最小一维 P 波速度模型是可靠的。

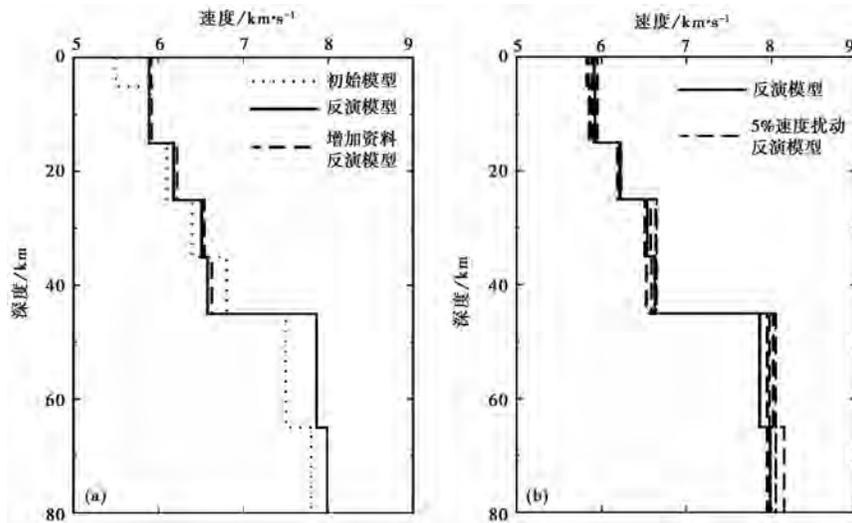


图 2 初始模型、反演模型、增加资料反演得到模型(a)  
和初始模型加入 5% 速度扰动反演得到模型(b)

对  $b$  值的计算,本研究采用 ZMAP 程序包(Wiemer et al,2001),用最大似然解法(Aki,1965)得到

$$b = \frac{\lg e}{\bar{M} - M_c}$$

式中,  $M_c$  为完整起始震级;  $\bar{M}$  为平均震级。误差估计由 Shi 等(1982)改进的公式求得,即

$$\delta b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n(n-1)}}$$

式中,  $n$  为样本个数。在计算  $b$  值时,  $M_c$  值是一个非常重要的参数(Wiemer et al,2000),可将  $M_c$  看作是一个临界震级,表征台网所能监测的最小完整震级,在计算  $b$  值时,只选择大于和等于  $M_c$  值的事件。

## 2 结果及讨论

### 2.1 地震重定位结果

采用双差法对地震进行重新定位,得到 5836 个地震的定位结果。从重定位结果的平面分布可以看出(图 3),小震主要集中在滇西地区,地震的分布与主要活动断裂关系密切,在一些断裂交汇区域,小震更为集中。震源深度集中分布在 20km 以上,而徐彦等(2005)得到的结果最深达 50km,这可能与所采用的初始模型有关,本研究采用更适用于研究区的最小一维速度模型,能够较好地改善地震的初始位置。同时,重新定位后小震呈丛集性分布(图 3)。在一些主要断裂带上,小震分布具有明显特点,如红河断裂带上小震多分布在断裂带的南北两端,尤其在北段地震更为密集,而在中段小震相对稀少。前人研究结果表明,红河断裂的北段是走滑型断裂的尾端拉张区,受洱源、程海断裂的影响,该段地震活动性较强(虎雄林等,2006),历史上 6 级以上地震几乎都集中在北段。而红河断裂带从 30Ma 以来经历了左旋韧性剪切作用,到 5.5Ma 以后又经历了右旋剪切变形作用(朱俊江等,2003),其中段受川滇块体向 SE 方向的挤出和顺时针右旋走滑作用,导致该段长期处于压扭环境,形成宽厚的断层泥带(李亚敏等,2008),从而导致中段地震活动性较弱。在红河断裂带南段,由于受 NE 向多条断裂的影响,该段小震活动也相对较强。

云南地区中小地震非常活跃,特别是在滇西地区,在 2011 年连续发生盈江地震和腾冲地震,给人们的生产生活带来较大损失,在我们流动台站的布设期间,也记录到盈江地震及

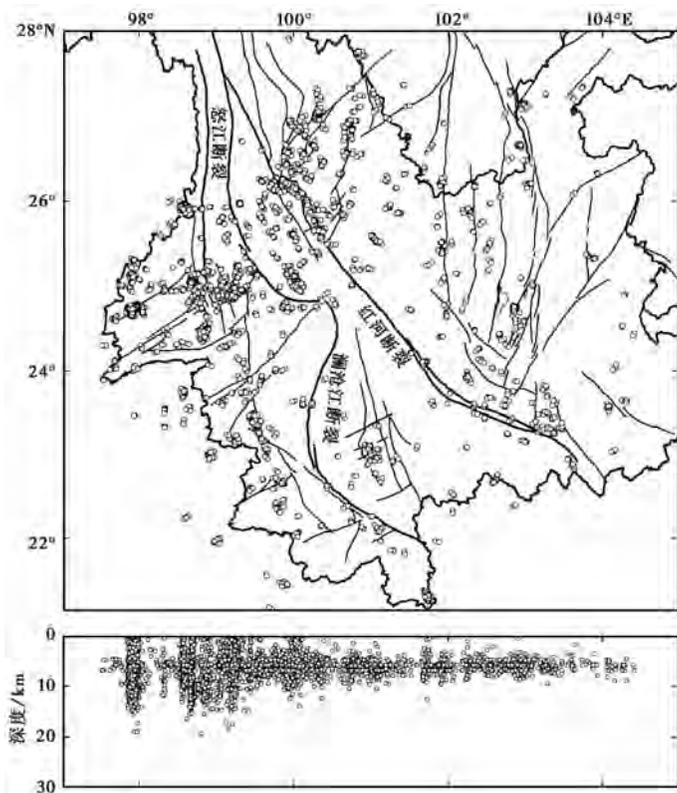


图 3 对云南地区地震重新定位后的震中分布

腾冲地震序列。小震的分布能够较好地展示断裂带的优势展布方向及发震层,为此,我们给出盈江地震及腾冲地震序列震源深度的详细剖面(图4),分析断裂带及周边小震的分布特征。

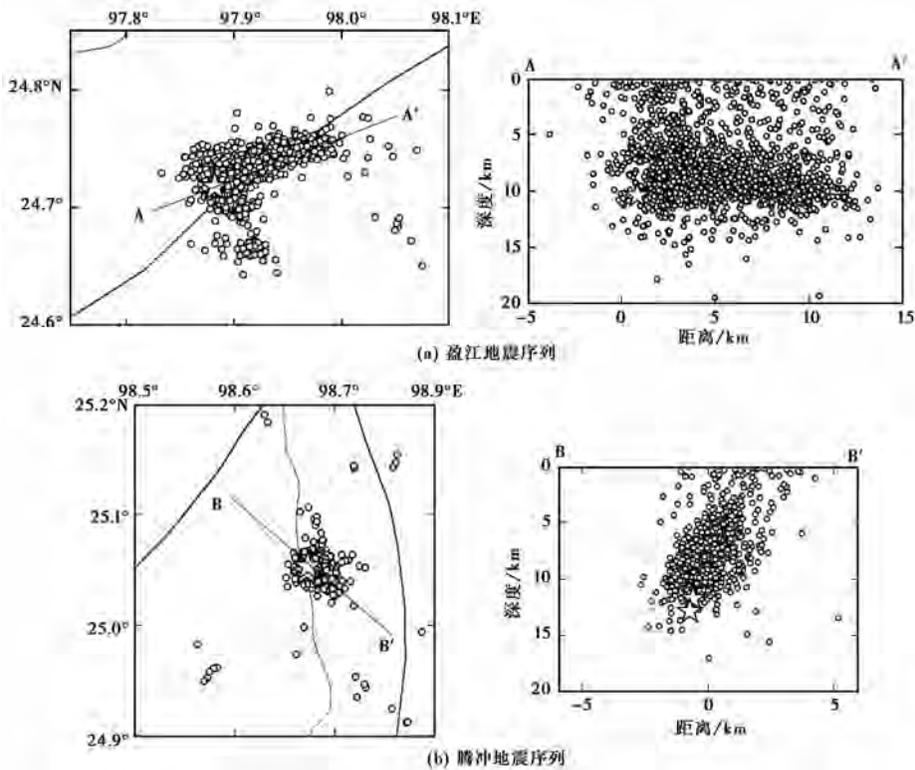


图4 重定位后的盈江(a)及腾冲(b)地震序列震中分布的平面图及剖面图  
星号为  $M > 5.0$  地震, 圆为余震震中

图4(a)展示的是盈江地震序列,小震主要沿NEE向条带状分布,另外还有一个SSE向的共轭小震活动带,而盈江5.8级主震震中就处在NEE与SSE向两条活动带的交汇处,表明在断裂的交汇处更易于产生破裂。从深度上看,盈江地震序列震源深度集中在15km以上,表明大盈江断裂的优势发震层位于上地壳,这与Lei等针对盈江地震序列的重新定位结果比较一致(Lei et al, 2012)。图4(b)展示的是腾冲地震序列,其震源分布特征与盈江地震序列具有明显差别,地震在深度上呈柱状分布,震源主要朝更深的方向上扩展,在平面上并没有明显地向其他方向延伸,且震源深部向NW方向倾斜,而腾冲火山就位于该地震序列的NW向。人工地震测深结果表明,在腾冲东南部存在岩浆囊或部分熔融体(楼海等, 2002);腾冲火山区数字台网记录的地震群结果表明,地震主要围绕在岩浆囊体的周围,与岩浆活动密切相关(叶建庆等, 2003)。为此我们推测,此次腾冲地震序列与火山热物质的运移活动密切相关。

## 2.2 $b$ 值分布特征

采用双差精定位后的地震目录计算云南地区  $b$  值,首先采用最大曲率法获得最小完整

震级  $M_c$  (图 5), 在曲率最大处  $M_c$  值为 1.4, 在计算云南地区  $b$  值时, 只选择  $M \geq 1.4$  的地震事件共 4530 个参与计算, 获得云南地区平均  $b$  值为 0.699, 误差为  $\pm 0.009$  (图 5)。

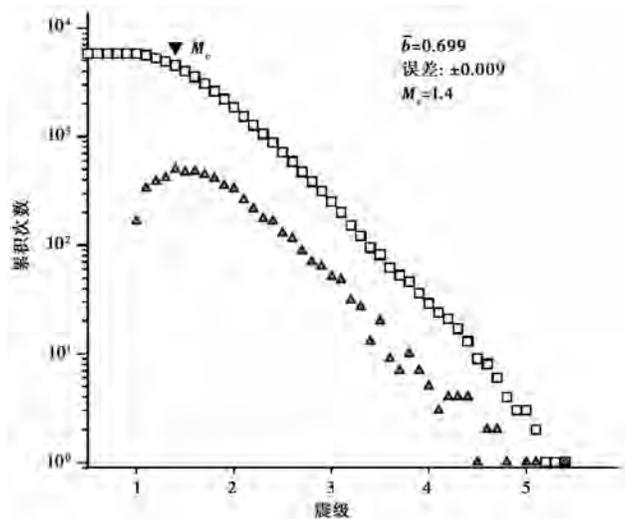


图 5 云南地区  $M_c$  值及平均  $b$  值

为进一步分析云南地区  $b$  值随震源深度变化的特征 (图 6), 本研究计算不同深度上的  $b$  值, 设定地震最小样本数为 150 个。由图 6 可以看出,  $b$  值随震源深度增加而逐渐减小, 从  $b$  值变化曲线可以看出, 在地壳的浅部 (0~6km)  $b$  值较大, 在 6~9km 范围内  $b$  值趋于稳定, 在 9~10km 范围  $b$  值发生明显减小。这样的分布特征与首都圈地区 (朱艾澜等, 2005) 和美国加州地区 (Mori et al, 1997) 的  $b$  值研究结果比较一致。而这样的分布特征可能表明,  $b$  值与地壳介质复杂程度及应力状态密切相关, 在地壳浅部介质复杂, 具有强烈的非均匀性, 且围岩压力较低, 因此具有高  $b$  值; 随着震源深度增加, 围岩压力增加, 地壳物质也趋于相对均匀, 具有低  $b$  值 (Mori et al, 1997)。因此小震多产生于地壳浅部, 而大震多发生于孕震层的底部。云南地区  $b$  值随着震源深度的增加而逐渐减小尤其在 9~10km 最为明显, 可能表明在云南地区中强震孕震层多位于 9km 以下。

$b$  值能够反映介质所受应力状态和介质均匀程度, 而在地震序列中  $b$  值的分布, 可以帮助我们了解震源区应力变化和介质的破裂范围 (Singh et al, 2012)。图 7 展示了大盈江断裂及周边的三维  $b$  值分布。我们以盈江 5.8 级主震为原点, 给出 2 条剖面。一条剖面是沿大盈江断裂的 NEE 方向, 另一条剖面是与大盈江断裂共轭的方向。盈江地震序列震源深度主要集中在 15km 以上 (图 4(a)), 因此 15km 以上的  $b$  值结果是可靠的。从  $b$  值空间分布可以明显看出, 随着深度的增加  $b$  值逐渐减小, 而沿大盈江断裂的 NEE 方向  $b$  值呈现增大趋势, 共轭的 SSE 方向  $b$  值也相对较高, 并且盈江 5.8 级主震的位置处于高低  $b$  值的过渡带, 在主震震源区, 高低  $b$  值相间存在, 表征主震震源区介质性质非常复杂, 在这样一个过渡带, 很容易受到触发产生初始破裂。由于地壳浅部围岩应力值低, 破裂向上扩展, 所以余震多发生在地壳浅部, 这与 Lei 等 (2012) 对盈江地震序列随时间扩展范围的研究结果具有很好的一致性。

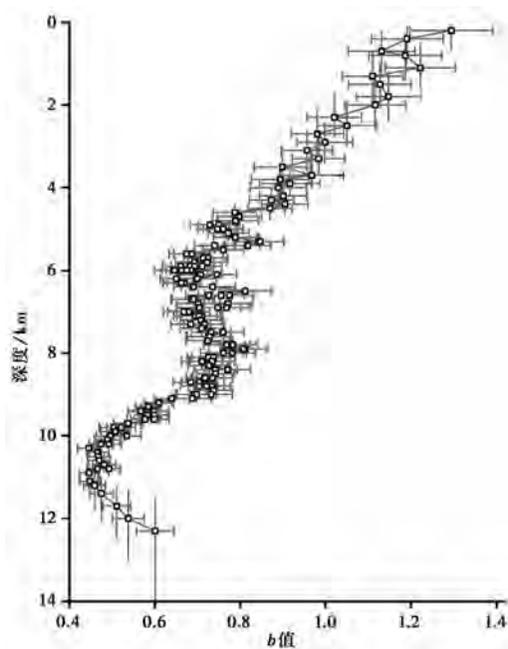


图6  $b$  值随深度的变化  
横线代表误差棒,竖线代表统计区间

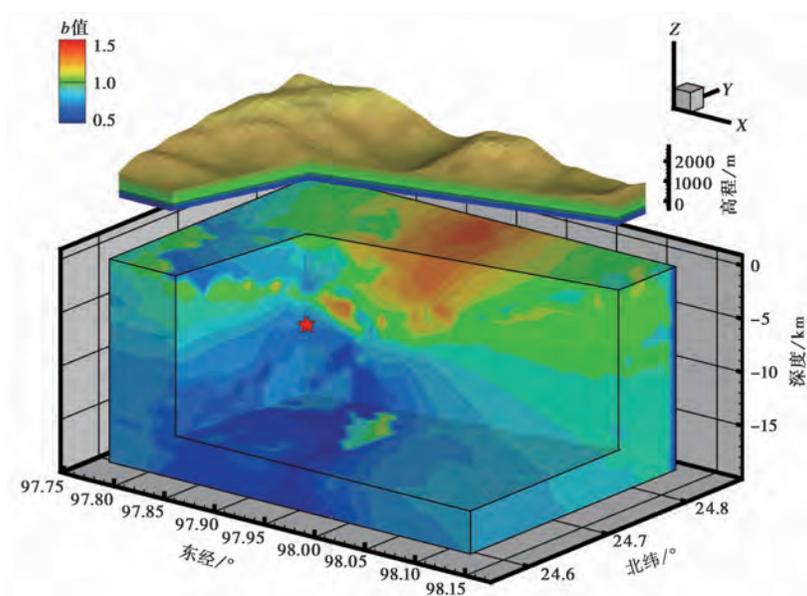


图7 盈江断裂带及周边  $b$  值的三维分布  
红色五角星为盈江 5.8 级主震震中

### 3 结论

本研究首先采用 VELEST 方法获得云南地区最小一维 P 波速度模型, 基于反演的最小一维速度模型, 用双差法对云南地区小震进行重新定位, 得到 5836 个地震的重定位结果。结果显示, 云南地区孕震层主要位于中上地壳, 且在滇西地区发震最为频繁, 震源深度也相对较深。本研究展示出盈江和腾冲地震序列的震源深度剖面图, 重新定位结果明确显示出断裂带的优势发震层及其展布方向。采用精定位后的地震目录计算云南地区  $b$  值, 获得一些新的认识: 云南地区  $b$  值随着震源深度的增加而逐渐减小, 尤其在 9~10km 最为明显, 这可能表征在云南地区中强震的发震层多位于 9km 以下; 在大盈江断裂及周边地区的  $b$  值空间分布具有明显特征, 在断裂带的浅部  $b$  值较高且分布不均匀, 且盈江 5.8 级主震发生在高低  $b$  值的过渡带, 本研究结果表明,  $b$  值对于中强震孕震环境的研究具有重要意义。

### 参考文献

- 傅竹武、刘建华、胥颐等, 2007, 利用接收函数方法研究大盈江断裂两侧 S 波速度结构, 云南大学学报(自然科学版), **29**(6), 607~612。
- 胡家富、朱雄关、夏静瑜等, 2005, 利用面波和接收函数联合反演滇西地区壳幔速度结构, 地球物理学报, **48**(5), 1069~1076。
- 虎雄林、张建国、李朝才等, 2006, 云南红河断裂带中小地震重定位及其地质构造的关系, 地震研究, **29**(4), 349~354。
- 李永华、吴庆举、田小波等, 2009, 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构, 地球物理学报, **52**(1), 67~80。
- 李亚敏、徐辉龙、孙金龙等, 2008, 红河断裂带及其邻区的震源机制解特征及其反映的断裂活动分段性, 热带海洋学报, **27**(2), 32~39。
- 楼海、王椿镛、皇甫岗等, 2002, 云南腾冲火山区上部地壳三维地震速度层析成像, 地震学报, **24**(3), 243~251。
- 马宏生、张国民、周龙泉等, 2008, 川滇地区中小震重新定位与速度结构的联合反演研究, 地震, **28**(2), 29~38。
- 吴建平、杨婷、王未来等, 2013, 小江断裂带周边地区三维 P 波速度结构及其构造意义, 地球物理学报, **56**(7), 2257~2267。
- 徐彦、杨晶琼、苏有锦等, 2005, 云南地区地震精确定位及其构造意义分析, 地震研究, **28**(4), 340~344。
- 叶建庆、蔡绍平、刘学军等, 2003, 腾冲火山地震群的活动特征, 地震地质, **25**(增刊), 128~137。
- 于湘伟、陈运泰、王培德, 2003, 京津唐地区中上地壳三维 P 波速度结构, 地震学报, **25**(1), 1~14。
- 张广伟、雷建设、梁姗姗等, 2014, 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸  $M_s 6.5$  地震序列重定位与震源机制研究, 地球物理学报, **57**(9), 3018~3027。
- 朱艾斓、徐锡伟、胡平等, 2005, 首都圈地区  $b$  值随震源深度的变化: 对地震成核的意义, 科学通报, **50**(8), 788~792。
- 朱俊江、詹文欢、唐诚等, 2003, 红河断裂带活动性研究, 华南地震, **23**(2), 13~19。
- 张晓曼、胡家富、胡毅力等, 2011, 云南壳幔 S 波速度结构与强震的构造背景, 地球物理学报, **54**(5), 1222~1232。
- Aki K, 1965, Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits, Bull Earthq Res Inst Tokyo, **43**, 237~239。
- Gutenberg B, Richter C F, 1944, Frequency of earthquakes in California, Bull Seism Soc Am, **34**, 185~188。
- Heshan M, Kaoru M, 2001, One-dimensional P wave velocity structure in the northern Red Sea area, deduced from travel time data, Earth Planets Space Lett, **53**, 695~702。
- Kissling E, 1988, Geotomography with local earthquake data, Reviews of Geophysics, **26**(4), 659~698。
- Kissling E, 1995, Velest user's guide, Institute of Geophysics, ETH Zuerich。
- Kissling E, Ellsworth W, Eberhart-Phillips D, 1994, Initial reference models in local earthquake tomography, J Geophys Res, **99**(B10), 19635~19646。
- Lei J S, Zhang G W, Xie F R, et al, 2012, Relocation of the 10 March 2011 Yingjiang, China, earthquake sequence and its tectonic implications, Earthq Sci, **25**, 103~110。

- Lei J S, Zhao D P, Su Y J, 2009, Insight into the origin of the Tengchong intraplate volcano and seismotectonics in southwest China from local and teleseismic data, *J Geophys Res*, **114**, B05302.
- Mori J, Abercrombie R E, 1997, Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California: Implications for the rupture initiation, *J Geophys Res*, **102**, 15081~15090.
- Michelini A, Lomax A, 2004, The effect of velocity structure errors on double-difference earthquake location, *Geophys Res Lett*, **31**, L09602.
- Singh A, Mishra O, Yadav R, et al, 2012, New insight into crustal heterogeneity beneath the 2001 Bhuj earthquake region of Northwest India and its implications for rupture initiations, *J Asian Earth Sci*, **48**, 31~42.
- Shi Y, Bolt B, 1982, The standard error of the magnitude-frequency  $b$  value, *Bull Seism Soc Am*, **72**(5), 1677~1687.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double difference earthquake location algorithm: Method and application to the north Hayward Fault, *Bull Seism Soc Am*, **90**, 1353~1368.
- Wiemer S, Benoit J P, 1996, Mapping the  $b$ -value anomaly at 100km depth in the Alaska and New Zealand subduction zones, *Geophys Res Lett*, **13**, 1557~1560.
- Wiemer S, McNutt S R, Wyss M, 1998, Temporal and three-dimensional spatial analyses of the frequency magnitude distribution near Long Valley Caldera, California, *Geophys J Int*, **134**, 409~421.
- Wiemer S, Malone S, 2001, A software package to analyze seismicity: ZMAP, *Seism Res Lett*, **72**(2), 374~383.
- Wiemer S, Wyss M, 2000, Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bull Seism Soc Am*, **90**(4), 859~869.

## Research on earthquake relocation and $b$ -value in the Yunnan area

*Zhang Guangwei*

Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China

**Abstract** We relocated 7172 earthquakes occurring in the Yunnan area from May, 2010 to July, 2011 by jointly using the permanent and temporary station records data. Considering the impact of velocity model, we first obtained a 1-D minimum P velocity model with the VELEST method. And then we got 5836 epicenter results by applying the double-difference method, and the results show that the seismogenic layer is basically located in the upper and middle crust, and the focal depth is more deeper in western Yunnan. We calculate the  $b$ -value of the Yunnan area using the relocated earthquake catalogs, and some new recognitions were achieved; the  $b$ -value was gradually reduced with depth, particularly at the depth of 9~10km; and the  $b$ -value 3-D distribution of the Yingjiang  $M_s 5.8$  earthquake sequences showed that the main shock was in the transition zone with high and low  $b$ -value.

**Key words:**  $b$ -value Double-difference method Upper and middle crust 1-D velocity model