

# 澜沧—耿马地区中小地震精确定位研究\*

李丽<sup>1</sup>, 刘剑<sup>1</sup>, 付虹<sup>2</sup>

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 概述了双差定位方法及其基本原理, 并运用该方法对 1979 ~ 2009 年澜沧—耿马地区发生的 4 279 个中小地震进行精确定位, 获得了 4 124 个地震基本参数, 走时残差均方根的平均值由定位前的 0.502 s 降到了 0.086 s。定位结果显示震中沿北北西向的构造呈明显的条带状分布, 且更加集中于断层附近, 在深度上改变了定位前的层状分布现象, 震源深度的优势分布为 3 ~ 15 km, 表明该区的发展震层较浅。虽然地表显示有部分段落不连续, 但从深度剖面和震源机制等结果来看, 该北北西向的断裂在地下可能是相通的。

**关键词:** 双差定位; 中小地震; 澜沧、耿马地震带; 北北西向构造

**中图分类号:** P315.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2011)04-0482-06

## 0 引言

1988 年 11 月 6 日 21 时 03 分 14.5 秒和 15 分 44.9 秒, 在云南省澜沧县境内 (22°50'N, 99°43'E) 和耿马县境内 (23°23'N, 99°36'E) 分别发生了 7.6、7.2 级强烈地震, 两次地震的震中均位于北西向的耿马—澜沧—勐海强震带内。该区域地震活动密集, 不同方向的断裂相互切割, 活动断裂断续相连, 且发生的 5 级以上地震在该强震带上呈条带状分布 (姜葵, 1993)。为了研究澜沧—耿马地震的发震构造及其孕震背景, 进行地震活动性分析, 需要了解震源之间精确的空间偏移情况。由于定位精度受台网分布形状、震相到时读数的精度和地下速度结构等因素的影响, 使得常规定位方法典型的不确定性比事件本身的震源尺度大很多倍, 因此限制了地震活动精细结构的研究 (Waldhauser, Ellsworth, 2000), 为此需要用定位精度较高的定位方法对该地区发生的中小地震进行重新定位。

双差定位法是一种相对定位方法, 由于使用的是两两地震间的到时差, 因此可以有效提高地震相对位置的精度。Waldhauser 和 Ellsworth (2000) 利用该方法对 1984 ~ 1998 年发生在美国加州北海沃德断层上的地震重新进行定位, 平面定位精度可达到几十米, 深度可达到几百米。我

国的许多地震工作者已将该方法广泛应用于国内的具体工作, 并取得了一定的进展 (杨智娴等, 1999, 2002, 2003)。双差定位法基于: 当两个地震震源之间的距离足够小时, 震源区到同一个台站间的整个射线路径几乎相同, 这两个地震事件的走时差就来自于事件之间高精度的空间偏移, 这样就可以部分地消除速度模型的不确定性所带来的误差。因此双差定位法特别适合于地震发生密度高的地区, 并能较好地显示地震发生区断层的特征。

本文尝试运用双差地震定位法对 1979 年至 2009 年 12 月澜沧—耿马地区发生的 4 279 个中小地震进行重新定位, 期望通过定位结果获得对发震构造的更多的认识。

## 1 方法简介

双差地震定位方法是由 Waldhauser 和 Ellsworth (2000) 提出的一种相对定位方法。该法反演的是一组丛集地震中每个地震相对于丛集矩心的相对位置, 有效地减少了由于对地壳结构了解不够精细而引起的误差, 该法还能够应用在空间跨度比较大的地震事件群体, 只要两个相邻事件的距离远小于震中距及速度不均匀体的线性尺度即可。

在反演过程中, 双差定位法基于传统的盖格法 (Geiger, 1912) 的迭代求解技术, 即通过对未

\* 收稿日期: 2011-01-12.

基金项目: 国家重点基础研究 973 (2008CB425701) 项目资助.

知震源位置地震波走时方程的观测走时与理论计算走时差作泰勒展开，保留一阶项迭代求解，使得两者残差最小时获取震源位置和发震时刻。

定义  $dr_k^{ij}$  是两个事件之间观测和理论计算走时差的残差：

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal}.$$

(1)

式 (1) 表示第  $i$  个地震事件到第  $k$  个地震台站的地震波的走时  $t_k^i$  与第  $j$  个事件到第  $k$  个地震台站的地震波走时  $t_k^j$  之差的观测值  $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$  与理论计算值  $(t_k^i - t_k^j)^{cal}$  的残差。

对地震到时  $t$  求震源参数的偏导数，联立双差残差就可以确定两个地震  $i$  和  $j$  的相对位置

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij}.$$

(2)

式中， $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta t^i)^T$  是第  $i$  个地震震源参数： $(x^i, y^i, z^i, t^i)^T$  的改变量； $\Delta m^j$  是第  $j$  个地震震源参数的改变量。其中， $x$ 、 $y$ 、 $z$  是震源东西、南北和垂直方向的坐标； $t$  是发震时刻。结合一个台站的所有地震对建立式 (2)，再将所有台站的方程写成如下形式的方程组

$$WGm = Wd.$$

(3)

式中， $G$  是一个  $M \times 4N$  偏微分商矩阵； $M$  是双差观测的数目； $N$  是地震数； $d$  是双差资料矢量； $W$  是用以对方程加权的对角线矩阵， $m$  为由待定的震源参数改变量构成的维数为  $4N$  的矢量。采用阻尼最小二乘法求解式 (3)，即可得到震源位置和发震时刻。

2 资料选取

本文研究的范围是  $22^\circ \sim 23.7^\circ N$ ， $98.8^\circ \sim 100.3^\circ E$ ，包括了澜沧—耿马地震带上的所有地震。定位资料来自于云南地区不同时期的 162 个地震台 (图 1) 所记录的 1979 年至 2009 年 12 月发生在澜沧—耿马地区的 4 279 个  $2.0 \leq M \leq 5.2$  的中小地震，共计 31 955 条 P 波和 S 波震相资料。笔者选用震中距在 250 km 以内的地震事件，每个地震保证至少有 6 个震相记录，且使用的初至波均为直达波。

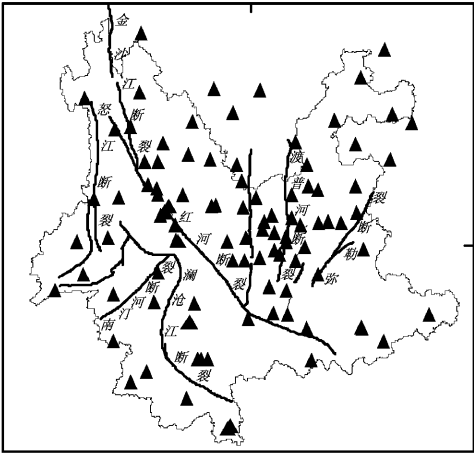


图 1 1979 年以来云南地区架设的地震台站分布示意图

Fig. 1 Distribution of stations set up in Yunnan since 1979

地震波速度模型对地震定位精度影响较大，对地壳结构认识越精确，地震定位精度就越高。而双差定位法很好地克服了速度横向不均匀性的问题，采用水平分层速度模型，对定位结果产生影响的主要是震源所在层的速度值，该值虽不影响事件间的方位分布，但会影响事件簇状分布图像的尺度，因此需要尽可能地选用接近真实地壳的速度模型。本文结合林中洋等 (1993) 对滇西地区地壳上地幔速度结构的研究结果，将地壳分为 7 层，且波速比定为 1.71 (表 1)，进行双差定位。

表 1 澜沧—耿马地区水平层状地壳速度模型

Tab. 1 Velocity model of horizontal and layered crust in Lancang-Gengma area

深度/km	0.0	3.0	12.0	17.0	23.0	30.0	47.0
$V_p/(km \cdot s^{-1})$	4.30	5.20	5.98	6.20	6.35	6.60	7.80

3 定位过程和定位结果

3.1 定位过程

双差地震定位方法是在 Geiger 定位法基础上发展起来的一种多地震联合相对定位方法。在实际计算中，需要获得地震的初始位置。笔者首先采用 Hypo2000 定位方法 (Klein, 2007) 确定这些地震的初始位置。Hypo2000 定位方法的基本原理是：首先计算近场特定模型下的走时表，通过走时反演确定地震的震中位置和深度。其最大优点

是可以考虑比较复杂的地下结构状况,在震中附近地区设置多达 10 个梯度层结构的模型,这样,就可以依据地质体的赋存位置和范围分别设定不同的地下层参数,因而特别适合于近场定位。基于云南地区壳幔速度横向不均匀性较为显著的特点,笔者在研究区域设置了 9 个不同的速度点,大部分使用的是测深数据,且经过多次试验证明该定位方法的结果的水平误差和残差较小,说明使用 Hypo2000 进行初始绝对定位是合理的。

以 Hypo2000 方法的定位结果作为初始值,再用双差法进行相对定位。双差定位中所有事件都是相对于地震丛集的质心位置来定位,质心位置随着计算的迭代不断调整,同时,每个地震的位置相对于质心位置亦不断调整,直至满足设定的精度要求。在进行双差地震定位计算时,需要确定先验权重,由于 S 波震相走时读数精度要比 P 波震相走时读数精度低,所以对 P 波读数赋予 1.0 的权重,相应的 S 波读数赋予 0.75 的权重。由于数据较多,笔者采用共轭梯度法求解方程,得到阻尼最小二乘法的解。第一轮 8 次迭代中,采用标准偏差的 10 倍作为截断值;第二轮的 10 次迭代中,采用标准偏差的 6 倍作为截断值来剔除数据。通过反复迭代,舍去残差大于截断值的震相数据,并用上一次迭代的结果更新震源位置、残差和矩阵,将每一次迭代得到的残差大小作为下一轮迭代的加权函数,经过多次迭代,直到得到稳定解。

### 3.2 定位结果

用双差定位法进行重新定位后,笔者共获得了 4 124 个地震基本参数,走时残差均方根的平均值由 0.502 s 降到 0.086 s。震源位置的测定误差(2 倍标准偏差)在 EW 方向平均为 1.47 km,在 NS 方向平均为 1.30 km,在 UD 方向平均为 1.69 km。图 2 是 Hypo2000 方法定位的结果(蓝色)和 HypoDD 方法定位的结果(红色)的震中分布图,对比发现重定位后的震中分布的收敛性要好一些,有向构造带趋近的变化,不过震中总体分布格局变化不是很大,都是沿北北西向带状分布,且远离条带之外的地震较为稀少和分散。

图 3 是重定位前后沿 AB 条带分布的北北西向的震源深度剖面图。云南测震台网最初给出的深度是大量缺失的,绝对定位后的震源深度大部分分布在 15 km 以内,在 5 km 和 10 km 两个深度上出现了地震集中分布的现象,双差定位后这种由

定位误差造成的层状现象得到了明显的改善。双差定位后的震源深度主要集中在 3 ~ 15 km 范围内,平均深度为 7.9 km。震源深度结果显示,澜沧—耿马中小地震主要发生在上地壳,发震层深度较浅,这一结果对于确定滇西南地壳内的发震层厚度,

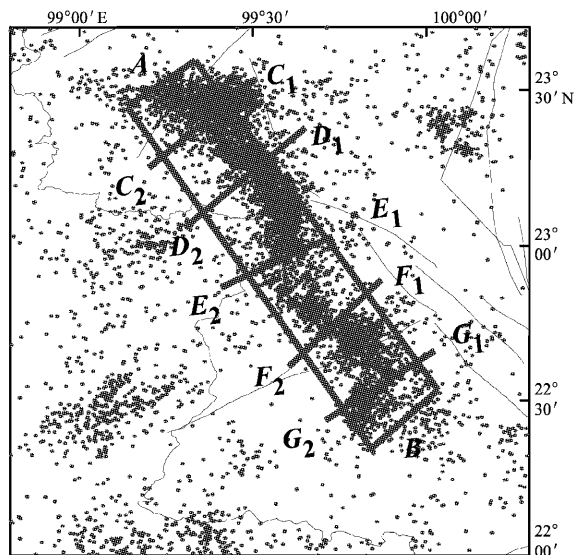


图 2 重定位前后的震中分布

(蓝色: Hypo2000 定位结果;红色: 双差定位结果)

Fig. 2 Epicenter distribution before and after relocation  
(blue: positioning by Hypo2000; red: positioning by HypoDD)

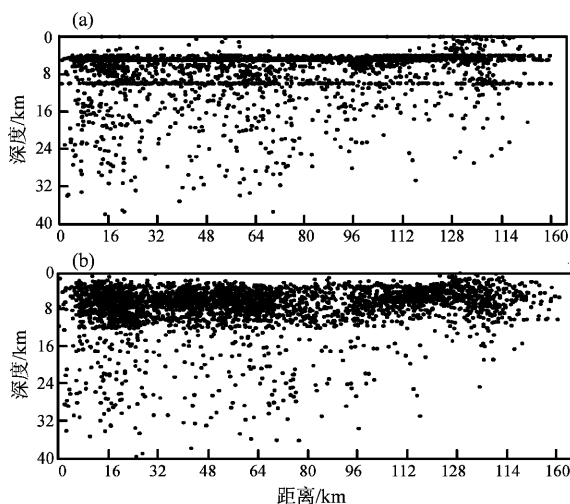


图 3 震源深度剖面

(a) 重定位前沿 AB 方向震源深度剖面; (b) 重定位后沿 AB 方向的震源深度剖面

Fig. 3 Focal depth profile

(a) Focal depth profile along the A-B direction before the relocation; (b) Focal depth profile along the A-B direction after the relocation

确定活动地块的下部边界，阐明地震的成因和机制以及对地震危险性分析可以提供重要的约束条件。

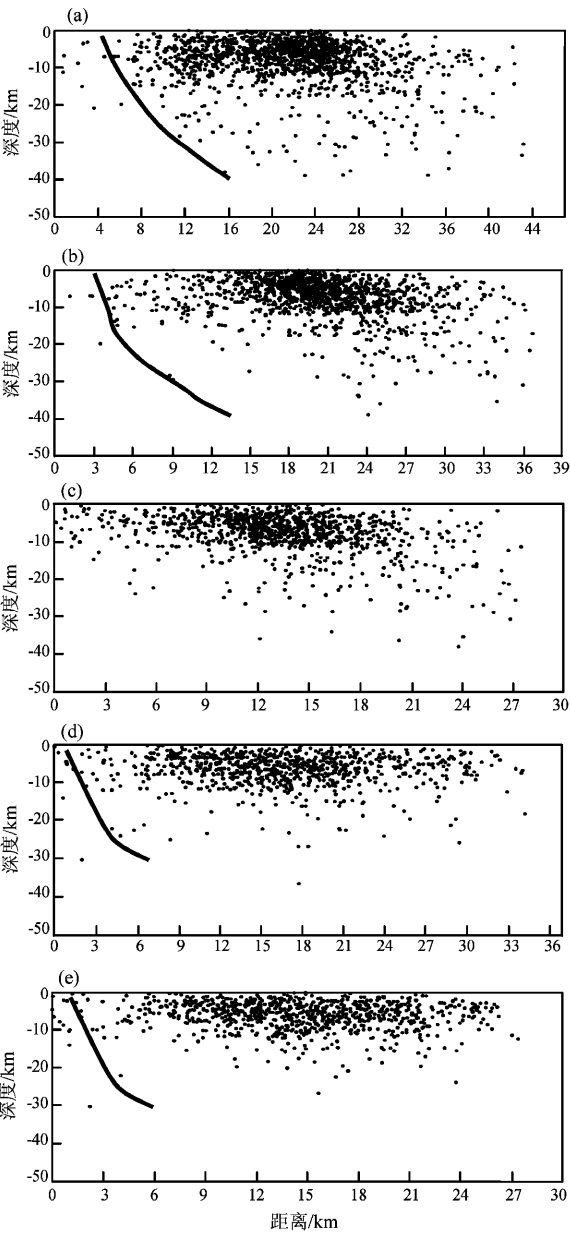


图 4 沿不同方向的震源深度剖面图  
(a) 沿  $C_1-C_2$  方向的震源深度剖面；(b) 沿  $D_1-D_2$  方向的震源深度剖面；(c) 沿  $E_1-E_2$  方向的震源深度剖面；(d) 沿  $F_1-F_2$  方向的震源深度剖面；(e) 沿  $G_1-G_2$  方向的震源深度剖面  
Fig. 4 Focal depth profile along different directions  
(a) Focal depth profile along the  $C_1-C_2$  direction; (b) Focal depth profile along the  $D_1-D_2$  direction; (c) Focal depth profile along the  $E_1-E_2$  direction; (d) Focal depth profile along the  $F_1-F_2$  direction; (e) Focal depth profile along the  $G_1-G_2$  direction;

沿地震条带（图 2），分别截取 5 个剖面，作每个剖面的震源深度图（图 4）。从图 4 可见在北段和南段，断层的倾角似乎较大，中段  $E_1-E_2$  方向附近平缓一些，但不排除是因为该段的地震相对较少造成的。该地震活动段南段属于澜沧—勐遮断裂，该断裂总体走向北  $35^\circ$  西，倾向南西，倾角  $60^\circ \sim 80^\circ$ ，从南段  $F_1-F_2$  和  $G_1-G_2$  段的投影结果看，断层倾角较大，与毛玉平和韩新民（2003）给出的地质构造（图 5）较为吻合。从我们的定位结果分析，北段的断层倾角也较陡，倾向和南段也大致相同。从图 5 可见 NNW 向的构造是存在的，虽然中间小部分段落被 NE 向的断裂所切割，有些不连续，但历史上沿 NNW 向呈带状发生过 5 次  $M > 6$  的地震，其中 4 次  $M \geq 7$ ，1988 年澜沧 7.6 级和耿马 7.2 级地震产生的地震断层走向、活动性与该条带也基本一致（毛玉平，韩新民，2003）。澜沧—耿马地震序列部分震源机制解的结果分析（表 2），该地震带南北段都有断层走向接近  $325^\circ \sim 338^\circ$  倾向 NW，倾角也接近的地震（王绍晋等，1993），这些震源机制的相似可能说明断层属性是相似的。虢顺民等（1999）根据地质构造组成、形成时期以及地震活动与断裂带活动相关性认为滇西南龙陵至澜沧一带存在一条新生的断裂带。综上所述，笔者分析认为澜沧至耿马 NNW 向构造带在地下可能是相通的。

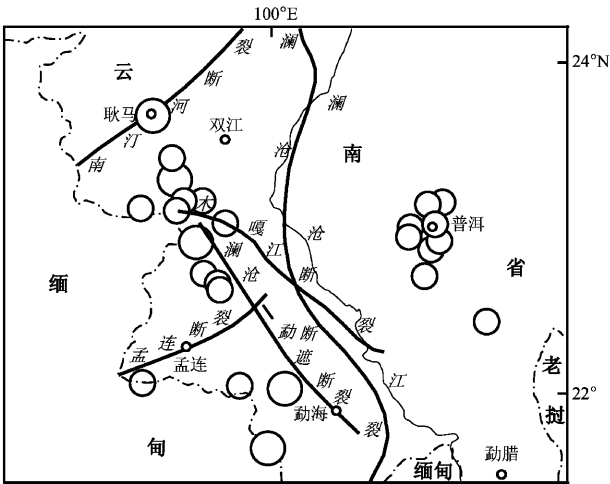


图 5 澜沧—耿马地区地质构造图  
(图中圆圈表示地震) (毛玉平，韩新民，2003)  
Fig. 5 Geologic structure in Lancang-Gengma area  
(Circle refers to earthquake) (Mao, Han, 2003)

表 2 澜沧—耿马地震序列部分地震震源机制（王绍晋等，1993）

Tab. 2 Table of focal mechanism of several earthquakes in the Lancang – Gengma earthquake sequences（Wang <i>et al.</i> , 1993）												
编号	发震时刻		震中分布			震级	节面 A			节面 B		
	年-月-日	时:分	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	地区		走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角
1	1988-11-06	21:03	22°50′	99°43′	澜沧	7.6	324.5°	SW	78.5°	54.5°	SE	88.5°
2	1988-11-27	12:17	22°41′	99°48′	澜沧	6.3	334°	SW	88°	245°	NW	75°
3	1988-11-06	21:15	23°23′	99°36′	耿马	7.2	338°	SW	76.5°	79°	NNW	49°
4	1988-11-07	04:24	23°13′	99°46′	澜沧	6.1	357°	W	85°	267°	N	80°
5	1988-11-19	09:37	23°23′	99°49′	耿马	5.1	334°	SW	45°	262°	NNW	73°

4 结论与讨论

利用双差地震定位方法，对 1979 ~ 2009 年澜沧—耿马地区发生的震级范围在  $2.0 \leq M \leq 5.2$  的 4 279 个中小地震进行重新定位，获得了 4 124 个地震基本参数。定位后走时残差均方根的平均值由 0.502 s 降到 0.086 s。震源位置的测定误差（2 倍标准偏差）在 EW 方向平均为 1.47 km，在 NS 方向上平均为 1.30 km，在 UD 方向上平均为 1.69 km。定位精度在理论上得到了很大的提高。

定位后平面上的震中分布变化不是很大，但对震源深度结果改善较多，从深度上改变了以往定位精度不够引起的层状分布现象。从深度剖面可见，南段和北段的断层倾向和角度有相似之处，澜沧、耿马地震序列中，部分地震的震源机制解也支持这一结果。再结合前人的研究，初步认为澜沧、耿马构造带的南北段在地下可能是相通的，而且断层属性有很多的相似之处。

重新定位结果显示，地震主要发生在 0 ~ 40 km 范围内，发震优势层为 3 ~ 15 km，表明该区域中小地震主要发生在上地壳，发震层深度较浅，这一结果对于确定滇西南地壳内的发震层厚度，确定活动地块的下部边界，阐明地震的成因和机制以及地震危险性分析可以提供一个重要的约束条件。

参考文献：

骥顺民,向宏发,周瑞奇,等. 1999. 滇西南龙陵—澜沧断裂带——大陆地壳上一条新生的破裂带[J]. 科学通报, 44 (19): 2118 – 2121.

姜葵. 1993. 1988 年云南澜沧—耿马地震[M]. 昆明: 云南大学出版社.

林中洋,胡鸿翔,张文彬,等. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J]. 地震学报, 15(4): 427 – 440.

毛玉平,韩新民. 2003. 云南地区强震( $M \geq 6$ )研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.

王绍晋,阚荣举,宋文,等. 1993. 澜沧—耿马地震孕育过程中应力场时空变化与预测检验[J]. 地震研究, 16(2): 111 – 112.

杨智娴,陈运泰,张宏志. 1999. 张北—尚义地震序列的重新定位[J]. 地震地磁观测与研究, 20(6): 6 – 9.

杨智娴,陈运泰,张宏志. 2002. 张北—尚义地震序列的重新定位和发震构造[J]. 地震学报, 24(4): 366 – 377.

杨智娴,陈运泰,郑月军等. 2003. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学, 33(增刊): 129 – 134.

Geiger L. 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only[J]. Bull St Louis Univ, 8: 60 – 71.

Klein F W. 2007. User's Guide to HYPOINVERSE – 2000: a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes [EB/OL]. U S Geological Survy Open File Report, (2011 – 01 – 12) [2000 – 04 – 22], <http://www.ipgp.fr/~arnaudl/NanoCD/documentation/3rdParty/hyp2000-1.0.pdf>.

Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A Double – Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward fault, California [J]. BSSA, 90(6): 1353 – 1368.

## Accurate Location of Small- and Medium- Earthquakes in Lancang And Gengma Area

LI Li<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, FU Hong<sup>2</sup>

(1. *School of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China*)

(2. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

### Abstract

After outlining the double-difference earthquake location algorithm, we applied it to the accurate relocation of 4279 small- and medium- earthquakes occurred in Lancang and Gengma area in Yunnan Province from 1979 to 2009, and obtained the parameters of 4124 earthquakes. We found that the root mean square of the travel-time residuals reduced from 0.502 s to 0.086 s. The results displayed that the epicenters were stripedly distributed along the NNW-trend structure. The distribution the earthquake focuses were mainly distributed in the range of 3 – 15 km, which proves that the seismogenic layer in this area was relatively shallow. The original NNW-trend structure seemed discontinuous in the Earth's surface, but judging from the depth profile and the focal mechanism, we thought that this structure may be linked together underground.

**Key words:** double-difference earthquake location method; small- and medium- earthquake; lancang-Gengma Seismic Belt; NNW-trend structure