

利用精确定位余震资料确定 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震的断层面参数^{*}

刘丽芳, 徐甫坤

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 运用双差定位法对 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震序列余震进行重新定位, 得到 565 次小震的精确定位结果。根据小震丛集性原则, 求解发震断层参数的数学模型, 运用模拟退火全局搜索和高斯牛顿局部搜索相结合的方法对地震发震断层面参数进行反演, 得到鲁甸 6.5 级地震断层面的走向、倾角分别为 160.8° 和 89.1° , 并对其构造环境进行了分析。

关键词: 地震断层面; 小震丛集; 云南鲁甸 6.5 级地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0489-06

0 引言

云南鲁甸 6.5 级地震震区构造复杂, 主体构造为北东向断裂和褶皱, 其次为北西向和南北向的断裂、褶皱。断裂构造主要有北东向昭通—鲁甸断裂和北西向的包谷垭—小河断裂。昭通—鲁甸断裂带由 3 条右阶斜列的次级断裂组成, 沿断裂发育昭通、鲁甸等新生代盆地, 该断裂是一条晚第四纪活动断裂。包谷垭—小河断裂是与北东向的昭通—鲁甸断裂带相配套的次级断裂, 走向 $N30^\circ W$, 由数条断续展布的断层组成, 具有走滑兼逆冲性质。历史上沿昭通—鲁甸断裂曾发生多次 5 级以上中强地震, 而 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震发生在昭通—鲁甸断裂与包谷垭—小河断裂的交汇部位^①, 因此, 运用其他方法来确定此次地震断层面参数具有重要意义。

大地震发生后的数年内, 大量小震在断层面及其附近发生。因此小震震源位置的空间分布可以较精确地勾画出断层面的形状和位置。假定地震发震断层可以用一个平面来模拟, 且设大多数小震发生在此断层面附近, 则可以通过小震震源位置参数求解发震断层的走向、倾角及位置。王

鸣和王培德 (1992) 采用这种原则, 运用小孔径观测台网得到的小震数据求得了 1989 年大同阳高地震的断层面参数。万永革等 (2008) 利用模拟退火全局搜索和高斯牛顿局部搜索相结合的方法, 根据小震精定位资料, 求得了唐山地震、滦县地震、宁河及卢龙断裂带的断层面走向、倾角、位置及滑动角参数, 其结果与前人采用其他资料和方法得到的结果近似。杨超群等 (2013)、赵晓燕等 (2013) 分别利用万永革等 (2008) 给出的方法反演 2003 年伽师 6.8 级地震断层面, 均取得了很好的结果, 结果表明利用小震资料在确定地质断层几何形态上具有重要意义。

本文利用云南鲁甸 6.5 级地震序列余震资料, 求解断层面的走向、倾角和位置, 并对鲁甸 6.5 级地震的发震构造进行了分析。

1 断层面的求解方法

要通过小震震源位置参数来求解发震断层参数, 即寻求一个平面, 使所有小震震源位置到这个平面距离的平方和最小 (王鸣, 王培德, 1992)。

在地理坐标系中, 第 i 个小震震源位置可表示为 (x_i, y_i, z_i) , 设地震断层面的走向为 φ , 倾角为

^{*} 收稿日期: 2014-10-08.

基金项目: 云南省基金重点项目“青藏高原东缘强震活动规律与板缘动力学机制” (2010CC006) 资助.

① 云南省地震局. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 6.5 级地震灾害直接经济损失评估报告 (云南灾区).

δ , 到坐标原点距离为 ρ , 断层面法向量表示为 $[\sin\varphi\sin\delta, -\cos\varphi\sin\delta, \cos\delta]$ (万永革等, 2000), 断层面的方程为

$$x\sin\varphi\sin\delta + y(-\cos\varphi)\sin\delta + z\cos\delta - \rho = 0. \quad (1)$$

震源点到平面的距离为

$$D_i = x_i\sin\varphi\sin\delta + y_i(-\cos\varphi)\sin\delta + z_i\cos\delta - \rho. \quad (2)$$

假设共有 n 个余震数据, σ_i 为第 i 个小震的定位残差, 目标函数可表示为

$$E(\rho, \varphi, \delta) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{D_i}{\sigma_i} \right]^2. \quad (3)$$

通过使 n 个小震到断层面垂直距离与观测误差比值的平方和取最小值得 φ, δ, ρ .

断层面模型的求解可以用局部算法和全局算法。模拟退火算法是一种全局反演方法, 通过在给定解附近的随机扰动来搜索整个参数空间, 在每一次修改模型的过程中随机产生一个新模型, 然后以一定的概率选择邻域中能量值小的状态 (马在田, 1997)。高斯牛顿算法是一种迭代算法 (文世鹏, 2001)。本文运用万永革等 (2008) 提出的模拟退火算法和高斯牛顿算法相结合的算法进行反演。

根据小震密集程度确定断层面所在位置, 采用 90% 的小震所在区域, 这样只有 10% 的小震落在断层面外的区域, 大震断层面的四个顶点位置分别为: 最上面的 2.5% 小震的底边界为该断层面的上边界, 最深部发生的 2.5% 的小震的上边界为其下边界, 地震丛集最左端的 2.5% 小震的右边界为其左边界, 地震丛集右端的 2.5% 小震的左边界为其右边界 (万永革等, 2008)。

2 反演结果

云南鲁甸 6.5 级地震震区地质构造复杂, 活动断裂密集发育, 历史地震活动频繁。地震发生后, 云南省地震局将 8 个云南区域测震台、3 个震后架设的流动测震台、3 个昭通小孔径测震台和 5 个巧

家台阵测震台实施了组网, 形成了由 19 个测震台组成的地震监测台网, 可有效监控鲁甸震区的余震活动。本文用双差定位 (Waldhauser *et al.*, 2000) 对鲁甸地震序列余震进行了重新定位, 得到了 2014 年 8 月 3 日至 9 月 3 日 565 次小震的精确定位结果, 其中 1.8 ~ 1.9 级 119 次, 2 ~ 2.9 级 393 次, 3 ~ 3.9 级 46 次, 4 ~ 4.9 级 6 次, 6 ~ 6.9 级 1 次。

云南鲁甸 6.5 级地震发生在北东向昭通、莲峰断裂带内。昭通、莲峰断裂带由昭通、莲峰两条北东向断裂带组成, 在横剖面上呈现为两个平行、分隔展布的逆冲断裂带结构, 其中, 莲峰断裂带宽 15 ~ 20 km, 由 2 ~ 3 个倾向北西的铲式断面组成, 基底滑脱带深约 11 ~ 15 km。昭通断裂带由一个规模更大、结构更复杂的逆冲断裂带组成, 其前缘主断裂——彝良—会泽断裂倾向北西, 并在 15 ~ 20 km 的深度与基底滑脱带相连; 主滑脱带上方除发育有北西倾的次级断裂外, 还有南东倾的反冲断裂 (闻学泽等, 2013)。鲁甸 6.5 级地震发生北东向昭通断裂带与其北西向次级断裂——包谷垭—小河断裂的交汇区, 经重新定位的鲁甸地震序列余震分布显示, 序列余震总体呈北西向的优势分布, 在主震附近也有北东东向的余震分布 (图 1), 综合区域地震构造环境等分析判定, 鲁甸 6.5 级地震的发震断层为北西向包谷垭—小河断裂^①, 北东东向的余震分布可能也反映了该方向的断裂参与了活动。因此本文选取北西向和北东东向的余震分布分别反演断层面的参数。

精确定位的小震震源深度中, 有 93.8% 的小震震源深度集中分布在 5 ~ 20 km (图 2), 5 km 以上的小震系深部破裂引发的沉积层的破裂 (万永革等, 2008), 昭通断裂带的基底滑脱带大致在 20 km (闻学泽等, 2013), 因此, 在确定发震断层面时只考虑 5 km 以下和 20 km 以上的余震。根据小震丛集性原则, 对余震数据进行初步筛选, 去掉离散的数据, 选用丛集性强的余震数据进行反演。本文在余震区的北西向和北东东向的矩形区域内分别选择各段的小震分别进行反演 (图 1), 求得断层的走向、倾角、距坐标原点的距离及断层的 4 个顶点位置 (表 1)。

① 中国地震局地质研究所. 2014. 云南鲁甸 6.5 级地震发震断层分析.

表 1 运用鲁甸 6.5 级地震序列精定位小震资料求得的地震断层面走向、倾角和位置

Tab. 1 The strike, dip and position of fault plane determined by small earthquakes with precise location of Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence

| | 小震 次数 | 走向/(°) | | 倾角/(°) | | 距离/(°) | | 顶点位置 ($\varphi_N/(^{\circ})$, $\lambda_E/(^{\circ})$, 深度/km) |
|-------------------|----------|--------|------|--------|------|--------|------|--|
| | | 值 | 标准差 | 值 | 标准差 | 值 | 标准差 | |
| 北西向 (包谷垭一小河断裂) | 199 | 160.8 | 0.77 | 89.1 | 1.12 | -0.00 | 0.04 | (27.02, 103.41, 6.9) |
| | | | | | | | | (27.02, 103.41, 16.7) |
| | | | | | | | | (27.12, 103.37, 16.7) |
| | | | | | | | | (27.12, 103.37, 6.9) |
| 北东东向 | 336 | 85.6 | 0.93 | 87.2 | 1.33 | 0.00 | 0.05 | (27.10, 103.27, 7.9) |
| | | | | | | | | (27.10, 103.27, 16.8) |
| | | | | | | | | (27.11, 103.39, 16.8) |
| | | | | | | | | (27.11, 103.39, 7.9) |

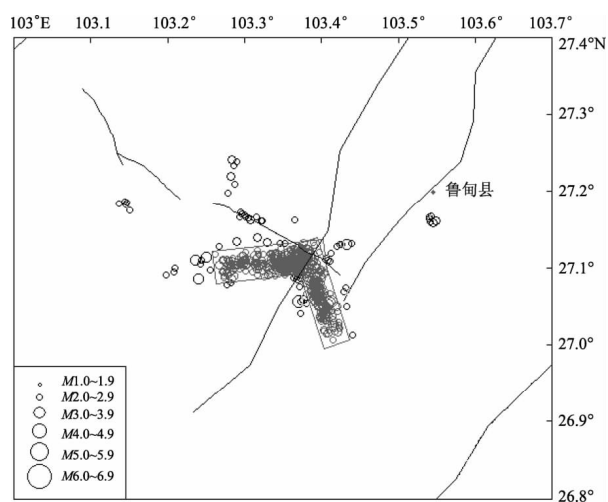


图 1 云南鲁甸 6.5 级地震序列区小震分布、反演断层走向和倾角所用的小震范围
Fig. 1 Spatial distribution of small earthquakes of the Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence and the scope of small earthquakes used to inverting the strike, dip of the fault

图 3 和图 4 分别给出了北西向包谷垭一小河断裂和北东东向断裂精确定位的小震分布在水平面、断层面、垂直于断层面的横断面上的投影及小震距断层面距离的分布，图中圆圈表示精确定位小震，粗线表示确定的断层面边界。AA'为断层上边界端点，DD 为倾向，DF 为距断层面的距离，SD 为走向。反演得到北西向包谷垭一小河断裂和北东东向断裂的地震断层面走向、倾角和位置如表 1 所示。由于小震在断层垂向弥散较大，致使倾角标准差比走向标准差大。小震距反演断层面距离的分布表明大部分

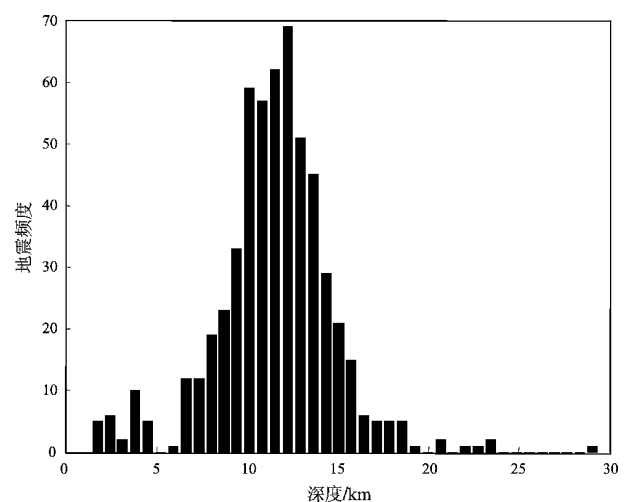


图 2 云南鲁甸 6.5 级地震序列区小震深度分布
Fig. 2 Depth distribution of small earthquakes of the Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake sequence

小震分布在所求断层面的附近，并且基本以断层为中心向两边呈对称分布。
包谷垭一小河断裂是与北东东向的昭通—鲁甸断裂带相配套的次级断裂，走向 $N30^{\circ}W$ ，表 2 列出不同机构给出的云南鲁甸 6.5 级主震断层面走向为 $N15^{\circ}\sim 20^{\circ}W$ ，本文反演得到的断层面走向为 $N19.2^{\circ}W$ ，与地表考察得到的包谷垭一小河断裂的走向及震源机制结果给出的断层面走向的结果一致。反演得到的断层倾角与表 2 中给出的倾角基本一致，即断层倾角较陡。综上所述，云南鲁甸 6.5 级地震的发震断层为北西向包谷垭一小河断裂，本文利用鲁甸地震序列北西向余震分布反演得到的鲁甸 6.5 级地震主震断层面走向为 $N19.2^{\circ}W$ ，倾角较陡，与包谷垭一小河断裂走向一致。

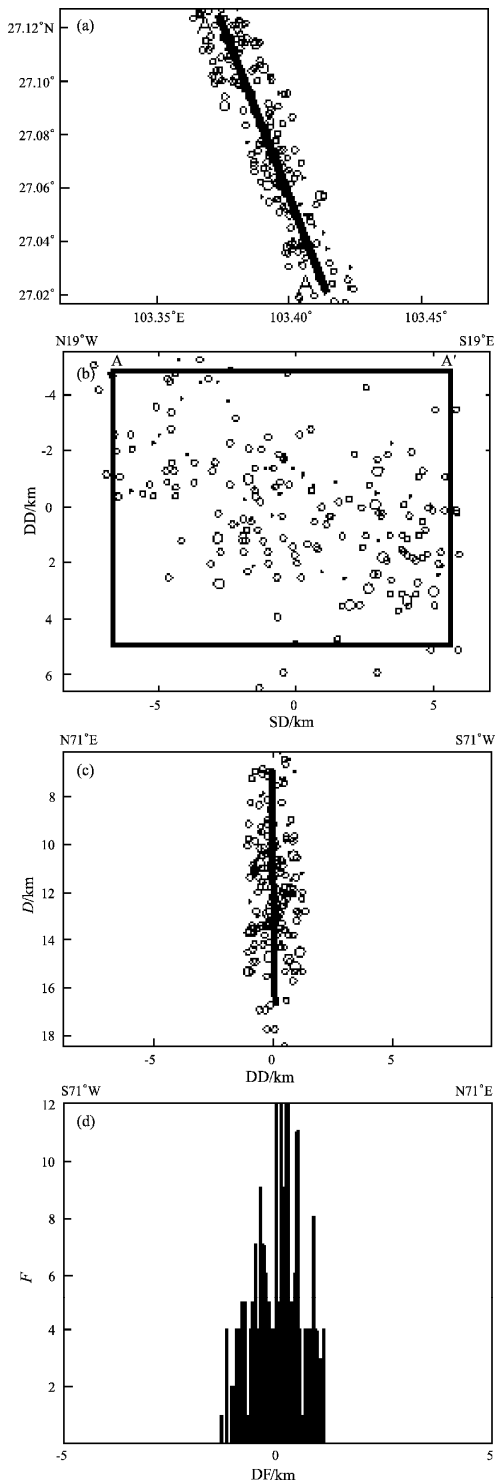


图3 包谷埡—小河断裂精确定位的小震分布在水平面 (a)、断层面 (b)、垂直于断层面的横断面上 (c) 的投影以及小震距断层面距离的分布 (d)
Fig. 3 Projection of the distribution of small earthquakes with precise location near the Baogunao-Xiaohe Fault on the horizontal plane (a), the cross-section along the fault plane (b), the cross-section perpendicular to the fault plane (c), and the distribution of distance between small earthquakes and fault plane (d)

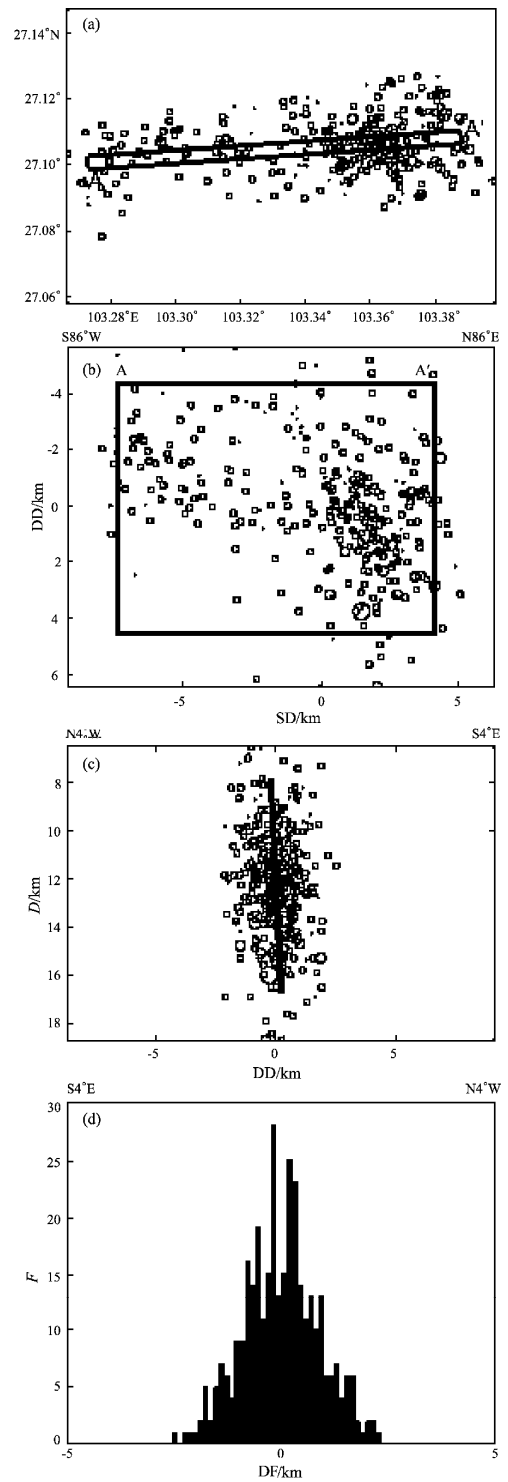


图4 北东东向断层精确定位的小震分布在水平面 (a)、断层面 (b)、垂直于断层面的横断面 (c) 上的投影以及小震距断层面距离的分布 (d)
Fig. 4 Projection of the distribution of small earthquakes of precise location near the NEE Fault on the horizontal plane (a), the cross-section along the fault plane (b), the cross-section perpendicular to fault plane (c), and the distribution of distance between small earthquakes and fault plane (d)

表 2 不同机构给出的 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震震源机制解
Tab. 2 Focal mechanism of the Yunnan Ludian M_s 6.5 earthquake on Aug. 3, 2014 from different institutions

| 节面 I/(°) | | | 节面 II/(°) | | | P/(°) | | T/(°) | | 资料来源 |
|----------|----|-----|-----------|----|-----|-------|----|-------|----|-------|
| 走向 | 倾角 | 滑动角 | 走向 | 倾角 | 滑动角 | 方位 | 仰角 | 方位 | 仰角 | |
| 162 | 86 | 6 | 72 | 84 | 176 | 297 | 1 | 27 | 7 | USGS |
| 160 | 90 | 5 | 70 | 85 | 180 | 295 | 4 | 25 | 4 | CMT |
| 165 | 87 | 6 | 74 | 84 | 177 | 299 | 2 | 30 | 6 | IGCEA |

包谷垭—小河断裂由数条断续展布的断层组成，鲁甸 6.5 级地震发生在北东向的昭通断裂带与其次级断裂带附近，而且在主震发生后第 3 天开始，序列余震又出现了北东东向的分布，可能表明北东东向存在隐伏的断层活动，我们利用鲁甸地震序列北东东向余震资料，反演得到了北东东向断层的走向为 85.6° ，倾角 87.2° ，该方向是否存在断层活动，还需进一步分析和考证。

3 结论和讨论

根据小震空间丛集性求解发震断层参数的数学模型，运用模拟退火和高斯牛顿算法相结合的有效算法，利用双差法精确定位得到的鲁甸地震序列余震资料，反演得到鲁甸地震发震断层面（包谷垭—小河断裂）的走向为 160.8° （标准差为 0.77° ），倾角为 89.1° （标准差为 1.12° ），该结果较为精确地揭示了断层的破裂机制，本文所得结果与利用波形反演得到的主震断层面解和地质调查得到的包谷垭—小河断裂走向一致。同时，我们反演得到鲁甸地震序列余震北东东向分布断层面走向为 85.6° （标准差为 0.93° ），倾角 87.2° （标准差为 1.33° ），但该结果还需进一步分析和考证。

近年来，随着数字地震观测技术的发展和数字地震台的广泛布设，地震观测资料使得震相拾取越来越精确；同时，地震定位算法（双差定位法、震源位置和速报结构联合反演定位方法等）的发展，也使地震定位精度越来越高，这就为根据小震资料确定断层面参数提供了可靠保证。在可以根据体波反演、面波反演和 P 波初动反演得到地震震源机制的同时，本文也提供了基于小震空间分布对地质构造开展研究的一个例证。

本文研究结果是基于地震序列余震是在断层面及其附近发生，并假定地震破裂面为平面。有研究认为，很多地震的断层面可能是个曲面（Shen *et al.*，2009），那么本次鲁甸 6.5 级地震的断层面是不是也应当认为是曲面？这需要今后继续深入分析研究。

本研究所用根据小震位置确定断层走向、倾角和位置的程序，由防灾科技学院万永革老师提供，在此表示衷心的感谢！

参考文献：

马在田. 1997. 计算地球物理学概论[M]. 上海: 同济大学出版社, 405–413.

万永革, 沈正康, 刁桂苓, 等. 2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报, 51(3): 793–804.

万永革, 吴忠良, 周公威, 等. 2000. 根据震源的两个节面的走向角和倾角求滑动角[J]. 地震地磁观测与研究, 21(5): 26–30.

王鸣, 王培德. 1992. 1989 年 10 月 18 日大同一阳高地震的震源机制和发震构造[J]. 地震学报, 14(4): 407–415.

文世鹏. 2001. 应用数值分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 167–186.

闻学泽, 杜方, 易桂喜, 等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景[J]. 地球物理学报, 56(10): 3361–3372.

杨超群, 孟凡顺, 万永革. 2013. 采用精确定位小震资料反演伽师地震断层面[J]. 地球物理学进展, 28(6): 2865–2871.

赵晓燕, 武晔, 高方平, 等. 2013. 根据余震资料求解 2003 年伽师 M_s 6.8 地震断层面的研究[J]. 地震, 33(3): 133–139.

钟继茂, 程万正. 2006. 由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场方向[J]. 地震学报, 26(4): 337–346.

Shen Z. K., Sun J. B., Zhang P. Z., *et al.*. 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Nature geoscience, 718–724.

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

Parameters of Fault Plane for Yunnan Ludian $M_s6.5$ Earthquake in 2014 Determined by Aftershock Data with Precise Location

LIU Li-fang, XU Fu-Kun

(*Earthquake Administration of Yunnan province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

We relocated the aftershocks of Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake in 2014 by using the double-difference location method, and obtained the accuracy location results of 565 earthquakes. According to the principle of small earthquakes cluster, we solved the mathematical model of the seismogenic fault parameters. By using the method of combining the simulated annealing global search algorithm with Gauss-Newton local search, we inversed the parameters of fault plane to obtain the strike, and the dip of fault plane which are 160.8° and 89.1° separately. Then we analyzed the tectonic environment of Ludian $M_s6.5$ earthquake.

Key words: fault plane; cluster of small earthquakes; Yunnan Ludian $M_s6.5$ earthquake