

1985年禄劝地震部分余震的精确定位

吴明熙 王 鸣 孙次昌 柯光明 王培德 陈运泰

(国家地震局地球物理研究所)

吴 大 铭

(美国宾厄姆顿纽约州立大学地球科学系)

摘 要

利用由4台DCS-302型数字磁带记录加速度地震仪组成的临时地震观测台网获得的记录,对1985年4月18日发生在云南省禄劝县的 $M_s6.1$ 地震的部分余震作了精确定位。采用直接从条件方程求最小二乘解的方法处理了观测数据,并就算法的简单性和精度的评估等问题将这个方法与阻尼最小二乘法和奇异值分解法作了比较。所得出的28个余震的震中分布在洗马河、九龙河及数条北西向和北东向断裂所围成的区域内。其空间分布显示了这些余震的发生与走向为北东向断层的密切关系。

关键词 禄劝地震;地震定位;最小二乘法

一、引 言

1985年4月18日,云南省禄劝县发生了 $M_s6.1$ 的强烈地震(图1)。震后第六天,即4月24日,在靠近震中的地方我们布署了一个由4台地震仪组成的临时观测台网(表1),连续进行了为期12天的野外观测。这次余震观测为研究极震区的强地面运动特征积累了资料,在余震频繁发生的14天里(4月24日至5月7日),共记录到404个地震,其中有4个地震的震级超过了 M_L4 级。

表1 禄劝临时地震台网的名称、代号和台站位置

台名	代号	经度 ($^{\circ}\text{E}$)	纬度 ($^{\circ}\text{N}$)	海拔 (m)	台基
转龙	ZHL	102.854	25.911	2000	灰岩
桂泉	GUQ	102.865	25.883	1980	灰岩
马街	MAJ	102.912	25.772	2065	灰岩
沙鱼郎	SHL	102.800	25.831	1980	砂岩
沙鱼郎*	SSY	102.810	25.822	2040	砂岩

* 1985年5月3日自沙鱼郎迁来。

1987年9月18日收到本文初稿,1988年1月19日决定采用。

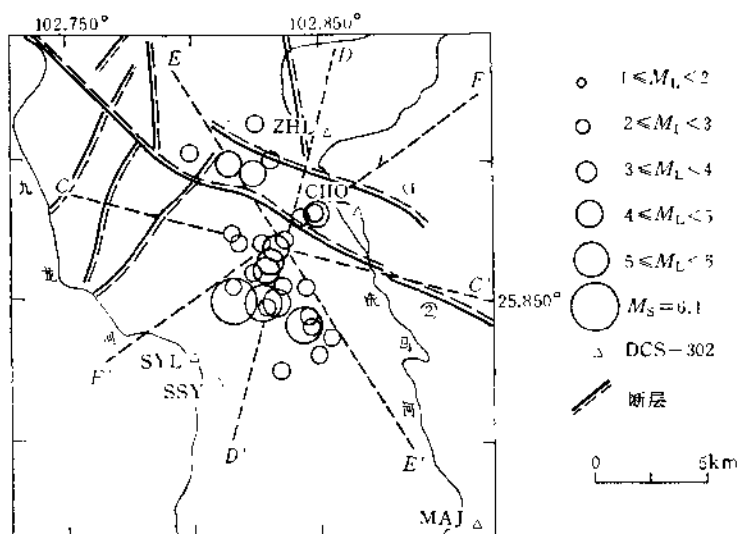


图 1 经精确定位后的禄劝余震(1985 年 4 月 26 日至 5 月 5 日)震中分布图。
虚线表示剖面在地面上的投影, ①为红岭坡断层, ②为则邑断层

野外观测所用的地震仪器是美国泰若公司 (Terra Technology Corp.) 生产的 DCS-302 型数字磁带记录加速度地震仪, 该仪器具有动态范围大、自动触发记录、便于携带、省电等优点, 尤适于记录近场地面运动^[1]。地震事件记录在普通的 60 分钟索尼 (Sony) 盒式磁带上, 每盒磁带可以记录 15 分钟。如果将触发延迟调节到 60 秒, 则每盒磁带可以记录约 15 个地震事件。野外资料的回放过程如下:

(1) 将从野外取回的盒式磁带放在与 DCS-302 地震仪配套的 SMR-104 型回放仪上, 用 SMR 程序引导, 把盒式磁带上的地震信息存入 IBM-PC/XT 的硬盘, 然后在终端屏幕上显示所记录到的每一个事件 (包括误触发), 把确认出的地震事件存入软盘。

(2) 将所有地震事件存入软盘后, 用美国纽约州立大学地球科学系提供的 CONV2 程序将软盘上的地振动三分量的记录信息转换成相应的三个以 m/s^2 为单位的十进制的时间序列。

(3) 用 PLOT 程序将各个台站记录的每个地震三分量记录按我国固定台站地震图的习惯格式绘制成图。作为举例, 图 2 给出了转龙台记录到的禄劝地震震级分别为 $M_L 2.0$ 和 $M_L 3.5$ 的两个余震的记录。

所记录到的余震大部分有完整的记录和清晰可辨的震相, 但也有部分余震因触发前预存时间太短而丢失其初至波的记录。我们的经验表明, 若预存时间能从现有的 1.92s 延长到 3—4s, 则更有利于近场强地面运动的记录和研究。

在记录到的所有余震中, 我们对 28 个可以定出震源位置和发展时刻的余震进行了处理。定位程序参考了 Herrmann^[2] 为微机改写的 HYPO71 程序, 与 Herrmann 以及许多地震定位的工作不同, 我们提出并使用一种直接从观测方程求得最小二乘解的“合成法”, 确定地震的位置。

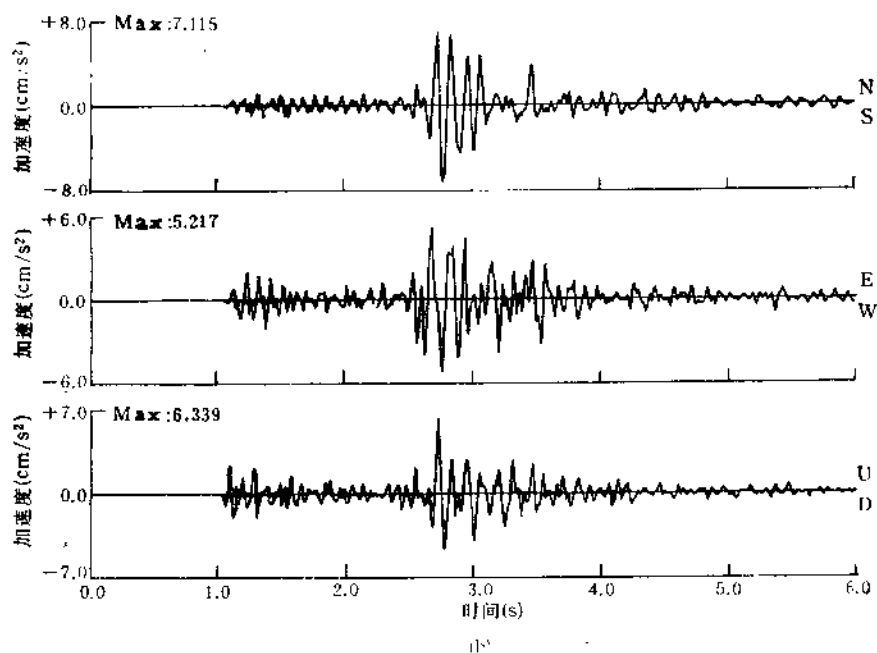
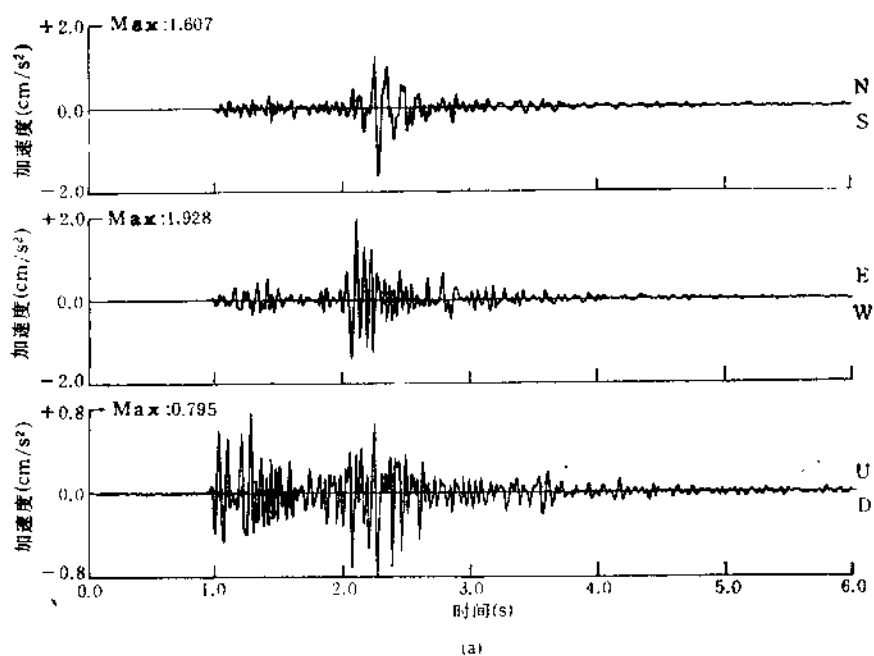


图 2 DCS-302 型地震仪记录到的禄劝余震地震图

(a) 1985 年 5 月 1 日 18 点 07 分地震, $M_L = 2.0$; (b) 1985 年 5 月 1 日 21 点 08 分地震, $M_L = 3.5$

二、方 法

设: $\mathbf{A}$ 为走时函数的偏导数 $m \times n$ 矩阵, $\mathbf{X}$ 为震源位置和发展时刻的 n 维解向量, $n = 4$, $\mathbf{B}$ 为观测到时与理论走时之差的 m 维资料向量, 那么, 地震定位的条件观测方程可表示为:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (1)$$

(1) 式的正规方程为

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{A}^T\mathbf{B} \quad (2)$$

$\mathbf{A}^T$ 为 $\mathbf{A}$ 的转置矩阵. 假定 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 满秩, 则 (2) 式的解便是最小二乘解:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{B} \quad (3)$$

从线性方程组数值求解的误差分析^[3]知道, 解 $\mathbf{X}$ 的误差

$$\frac{\|\delta\mathbf{X}\|}{\|\mathbf{X}\|} \leq \text{Cond}(\mathbf{A}^T\mathbf{A}) \frac{\|\delta(\mathbf{A}^T\mathbf{B})\|}{\|\mathbf{A}^T\mathbf{B}\|}$$

这说明, 解的误差来源于 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$, 以及定量表示 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ “好”与“坏”的条件数. $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 谱范数意义下的条件数为

$$\text{Cond}(\mathbf{A}^T\mathbf{A}) = \sigma_1/\sigma_n \quad (4)$$

这里 σ_1, σ_n 分别为 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 最大、最小的特征值, $\text{Cond}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})$ 表示 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 的病态程度.

为了对那些性质不好的 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 能顺利地求解方程 (2), 可以用阻尼最小二乘法, 即以

$$(\mathbf{A}^T\mathbf{A} + \theta^2\mathbf{I}_n)\mathbf{X} = \mathbf{A}^T\mathbf{B} \quad (5)$$

来代替 (2). $\theta^2 \geq 0$, 为阻尼因子, $\mathbf{I}_n$ 为单位矩阵. $(\mathbf{A}^T\mathbf{A} + \theta^2\mathbf{I}_n)$ 的条件数为

$$\text{Cond}(\mathbf{A}^T\mathbf{A} + \theta^2\mathbf{I}_n) = (\sigma_1 + \theta^2)/(\sigma_n + \theta^2) \quad (6)$$

显然

$$\text{Cond}(\mathbf{A}^T\mathbf{A} + \theta^2\mathbf{I}_n) \leq \text{Cond}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})$$

这说明采用阻尼最小二乘法可望减小条件数. 不过, 阻尼因子 θ^2 大小的选取与条件数密切相关. 从 (6) 式可以看出, 只有当

$$\sigma_n < \theta^2 < \sigma_1$$

时, 条件数才能有显著的变化, 况且奇异值 σ_i 预先并非已知. 另外, 从最小二乘解的最小方差性质可以推出: 任意阻尼最小二乘解的残差平方之和总是大于最小二乘解的残差平方和. 不管怎样, 只要形成正规方程 (2), 计算 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 就难免要产生舍入误差, 除此以外, 由于^[4]

$$\text{Cond}(\mathbf{A}^T\mathbf{A}) = \text{Cond}^2(\mathbf{A}) \quad (7)$$

人们更倾向于不形成正规方程而直接对 $\mathbf{A}$ 进行运算, 如奇异值分解法^[5]. 令

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T \quad (8)$$

则

$$\mathbf{X} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{U}^T\mathbf{B} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ 为正交矩阵, $\mathbf{\Lambda}$ 为非零的特征值组成的对角矩阵. 误差主要来源于 $\mathbf{\Lambda}$ 的最小特征值的计算, 而 $\mathbf{\Lambda}$ 对于已知的 $\mathbf{A}$ 是不变的.

表 2 定位时采用的分层均匀地壳模型^[1]

层 号	1	2	3	4	5
层厚 (km)	0.28	13.33	19.89	9.17	∞
P波速度 (km/s)	4.30	5.93	6.30	6.60	7.75

表 3 1985年4月18日禄劝地震部分余震的发展时刻、震源位置和震级

编号	日期 (年·月·日)	发震时刻 (时-分-秒)	地理坐标		深度 (km)	震级 M_L	精 度		
			$\varphi_N(^{\circ})$	$\lambda_E(^{\circ})$			rms (s)	R (km)	$Norm$
1	1985.4.28	01-19-8.4	25.825	102.835	5.8	2.2	0.00	0.01	479.7
2	1985.4.28	06-14-43.8	25.855	102.836	4.2	2.6	0.17	0.87	200.6
3	1985.4.28	12-19-14.3	25.855	102.845	4.7	2.2	0.04	0.32	124.1
4	1985.4.28	18-37-14.9	25.896	102.824	7.0	3.1	0.04	0.24	86.9
5	1985.4.28	18-38-13.6	25.855	102.816	9.6	2.9	0.15	0.81	86.4
6	1985.4.29	00-35-44.9	25.872	102.836	4.3	2.6	0.03	0.22	241.2
7	1985.4.29	05-52-38.8	25.901	102.831	7.3	2.9	0.06	0.39	106.5
8	1985.4.29	12-42-46.8	25.860	102.824	8.5	2.2	0.04	0.26	184.1
9	1985.4.30	13-50-10.4	25.881	102.844	5.9	2.4	0.00	0.03	290.1
10	1985.5.1	08-15-44.8	25.882	102.848	3.9	2.7	0.02	0.16	192.0
11	1985.5.1	13-1-24.0	25.837	102.855	0.9	2.4	0.10	0.50	91.0
12	1985.5.1	14-23-7.0	25.903	102.799	7.8	2.4	0.03	0.37	377.3
13	1985.5.1	16-59-4.8	25.819	102.829	4.1	4.8	0.18	0.89	146.8
14	1985.5.1	17-23-11.5	25.842	102.845	1.2	4.1	0.07	0.17	15.8
15	1985.5.1	18-7-21.4	25.913	102.825	7.5	2.0	0.07	0.64	240.5
16	1985.5.1	18-14-31.3	25.871	102.819	5.2	2.4	0.04	0.35	198.6
17	1985.5.1	18-42-43.5	25.848	102.830	1.1	2.3	0.05	0.30	134.6
18	1985.5.1	19-5-52.7	25.862	102.830	9.4	3.2	0.13	0.62	65.0
19	1985.5.1	20-44-46.5	25.869	102.833	3.7	3.2	0.16	0.73	129.4
20	1985.5.1	21-8-28.1	25.865	102.831	9.6	3.5	0.08	0.37	67.2
21	1985.5.2	19-33-22.1	25.831	102.850	4.8	2.2	0.01	0.13	357.4
22	1985.5.2	23-13-21.6	25.849	102.833	0.4	3.4	0.06	0.35	159.0
23	1985.5.3	05-14-24.2	25.844	102.846	6.0	2.4	0.00	0.02	326.2
24	1985.5.3	13-31-57.5	25.841	102.848	1.5	2.7	0.03	0.20	230.8
25	1985.5.3	17-49-57.8	25.899	102.816	8.3	3.6	0.05	0.33	91.4
26	1985.5.3	20-39-3.0	25.874	102.816	8.8	2.4	0.06	0.33	89.3
27	1985.5.4	00-25-57.7	25.870	102.828	5.6	2.5	0.03	0.25	217.5
28	1985.5.5	15-13-13.3	25.881	102.849	4.4	3.3	0.12	1.29	536.1
SUM							1.82	11.2	5465.5

除了上述的奇异值分解法外, 我们受到下述事实的启发: 在线性方程组的已有解法中, 还没有一类算法在时间和精度方面比高斯消去法更好^[3]. 在消去法中计算误差取决于主元素的选取, 我们总能采用全主元素法使得这些选取的主元素相对来说比较集中, 这是相对于奇异值分解法的便利之处. 能否从观测方程组 (1), 设法用高斯消去法得到最小二乘解, 使之在时间和精度方面都比较好? 只要用最小二乘解的另一种表示, 这是可能的. 根据行列式相乘的一条引理^[6], 对于正规方程 (2) 的解有

表 4 用阻尼最小二乘法计算的结果

编号	日期 (年·月·日)	发震时刻 (时-分-秒)	地理坐标		深度 (km)	M_L	精 度		
			$\varphi_N(^{\circ})$	$\lambda_E(^{\circ})$			rms (s)	R (km)	$Norm$
1	85.4.28	01-19-8.4	25.816	102.839	6.4	2.2	0.00	0.02	1144.3
2	85.4.28	06-14-48.8	25.861	102.828	6.5	2.6	0.24	1.39	99.8
3	85.4.28	12-19-14.3	25.849	102.853	5.6	2.2	0.04	0.40	242.8
4	85.4.28	18-37-14.9	25.903	102.820	7.6	3.1	0.05	0.33	85.9
5	85.4.28	18-38-13.8	25.858	102.809	10.6	2.9	0.18	1.02	74.3
6	85.4.29	00-35-44.9	25.870	102.844	5.7	2.6	0.03	0.25	228.0
7	85.4.29	05-52-38.8	25.909	102.825	8.1	2.9	0.06	0.48	151.9
8	85.4.29	12-42-46.8	25.862	102.818	9.2	2.2	0.00	0.02	123.9
9	85.1.30	13-50-10.4	25.881	102.851	6.9	2.4	0.00	0.03	426.7
10	85.5.1	08-15-41.8	25.882	102.859	5.0	2.7	0.02	0.17	141.2
11	85.5.1	13-01-24.0	25.803	102.889	0.0	2.4	0.95	18.90	3406.9
12	85.5.1	14-23-07.0	25.906	102.797	8.7	2.4	0.03	0.42	478.8
13	85.5.1	16-59-04.8	25.850	102.821	5.4	4.8	0.24	1.65	242.3
14	85.5.1	17-23-11.5	25.844	102.838	3.3	4.1	0.21	0.93	130.1
15	85.5.1	18-07-21.4	25.918	102.826	8.2	2.0	0.06	0.71	364.5
16	85.5.1	18-14-31.3	25.868	102.822	6.5	2.4	0.04	0.41	278.0
17	85.5.1	18-42-43.5	25.851	102.809	4.1	2.3	0.30	1.64	158.3
18	85.5.1	19-05-52.7	25.866	102.825	10.3	3.2	0.16	0.79	58.9
19	85.5.1	20-44-46.5	25.875	102.827	5.4	3.2	0.24	1.16	90.3
20	85.5.1	21-08-28.1	25.868	102.826	10.4	3.5	0.10	0.54	68.1
21	85.5.2	19-33-22.1	25.822	102.857	5.2	2.2	0.01	0.19	853.6
22	85.5.2	23-13-21.6	25.854	102.818	2.5	3.4	0.25	1.27	141.2
23	85.5.3	05-14-24.2	25.837	102.852	6.7	2.4	0.00	0.02	782.6
24	85.5.3	13-31-57.5	25.814	102.879	1.3	2.7	0.18	5.13	2767.7
25	85.5.3	17-49-57.8	25.907	102.808	8.8	3.6	0.05	0.42	193.0
26	85.5.3	20-39-03.0	25.878	102.810	9.4	2.4	0.08	0.61	180.4
27	85.5.4	00-25-57.7	25.868	102.833	6.8	2.5	0.03	0.29	289.2
28	85.5.5	15-13-13.3	25.889	102.842	6.0	3.3	0.11	1.12	291.3
SUM							3.66	40.30	13494.0

$$X = \frac{\sum D^2(i_1, \dots, i_n) X(i_1, \dots, i_n)}{\sum D^2(i_1, \dots, i_n)} \quad (10)$$

其中求和号 $\sum$ 表示 $(1, 2, \dots, m)$ 中一切可能的组合 $(1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_n \leq m)$, $X(i_1, \dots, i_n)$ 为对应于组合 $(i_1, \dots, i_n)$ 所形成的 n 阶方程组的解, $D(i_1, \dots, i_n)$ 为相应的行列式, 所有这些均可用消去法得到。

计算中使用了分层均匀的地壳模型, P 波速度和层的厚度等参数采用了胡鸿翔等^[7]用爆炸资料所作的该地区附近的结果, 主要参数如表 2 所示。使用定位的震相全部为直达 P 波和直达 S 波, S 波的速度模型具有与 P 波速度模型相同的界面, 各层的 S 波速度假设为相应的各层的 P 波速度分别除以 $\sqrt{3}$ 。对台站的海拔高程按照地壳模型第一层速度进行了初步的校正。

用定位程序算得的余震震源位置和发震时刻如表 3 所示。震级栏中的数值是云南省

地震局综合预报研究室(1985)发表的测定结果^[8]。最后三列是有关确定的震源位置和发震时刻的精度指标。其中, rms 表示均方根; R 表示与震中置信椭球等体积的球半径; $Norm$ 表示方差矩阵的 $\|\cdot\|_1$ 范数;最后一行分别表示上述三个量的和。

表 4 是采用阻尼最小二乘法算得的结果。从表 2 和表 3 的最后一行可以看出: 用阻尼最小二乘法算出的 rms , R , $Norm$ 总和均比用本方法算得的总和大 2—3 倍。

三、结论与讨论

所有精确定位的余震震中如图 1 所示。图 1 中还表示了主震震中、临时台站的位置、震中区河流的位置和主要断层的分布情况。由图 1 可以看出, 绝大部分余震发生在洗马河、九龙河、普渡河以及极震区中几条北西向和北东向断裂所围成的区域内。刘正荣等^[9]认为, 地震区内的北西向的则邑断层与这次地震有关。根据野外宏观地质调查的结果, 李克昌等^[1]则认为与则邑断层平行的较短的红岭坡断层是发震断层。周家玉等^[10]运用王兴辉提供的云南省遥测台网的初动资料以及我们在表 2 给出的 28 个余震的资料分别确定了主震的断层面解和余震的综合断层面解。他们的结果表明综合断层面解(图 4)和主震断层面解(图 3)相差不大。由图 3 可以看到, 主震断层面解的节面 II 走向与地表出露的北西向的则邑断层和红岭坡断层走向一致。为了判断发震断层的位置, 我们绘制了与两个节面走向平行的并且与地表垂直的剖面上 28 个余震震源的投影图。图 5(a)是余震震

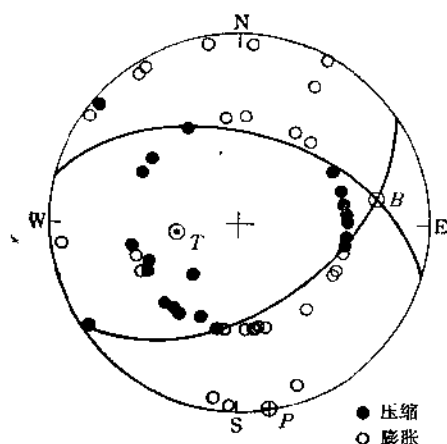


图 3 1985 年 4 月 18 日禄劝地震震源机制
(震源球上半球等面积投影)

节面 I: 走向 236.3° , 倾角 51.6° , 滑动角 55.8° ;
节面 II: 走向 103.9° , 倾角 49.6° , 滑动角 125.3° ;
P 轴: 方位角 169.7° , 倾伏角 1.1° ; T 轴: 方位角 262.0° , 倾伏角 63.8° ; B 轴: 方位角 79.2° , 倾伏角 26.1°

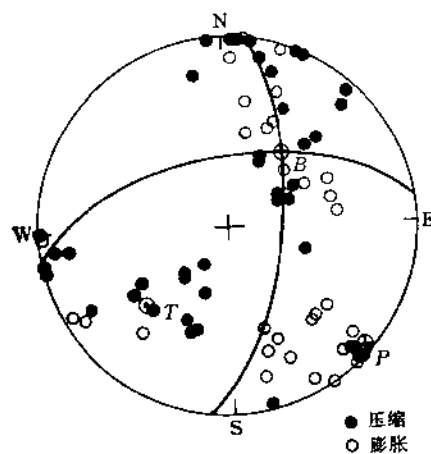


图 4 禄劝余震的综合断层面解
(震源球上半球等面积投影)

节面 I: 走向 81.9° , 倾角 59.3° , 滑动角 152.5° ;
节面 II: 走向 186.7° , 倾角 66.6° , 滑动角 33.8° ;
P 轴: 方位角 132.9° , 倾伏角 4.6° ; T 轴: 方位角 226.7° , 倾伏角 39.9° ; B 轴: 方位角 37.4° , 倾伏角 49.7°

1) 李克昌、姚孝执、李胜德、胡竟望, 1985. 1985 年 4 月 18 日昆明市禄劝县转龙 6.3 级地震烈度及地震构造考察报告。

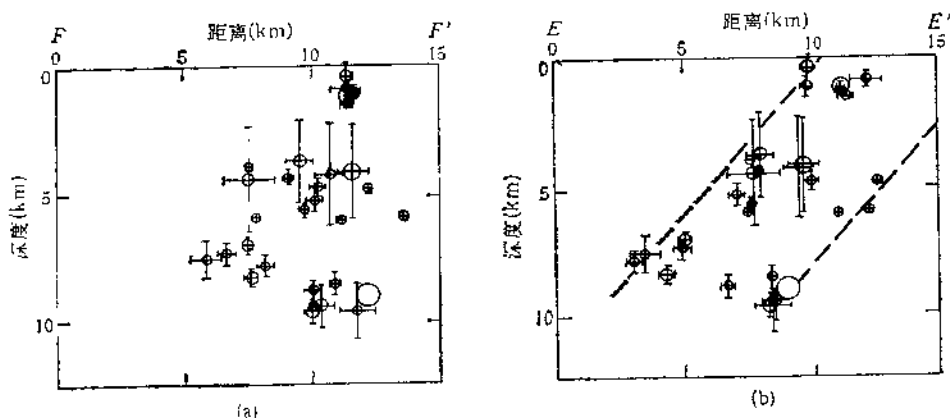


图 5 (a) 禄劝余震在与节面 I 走向平行的 $F-F'$ 垂直剖面上的投影
(b) 禄劝余震在与 $F-F'$ 剖面垂直的 $E-E'$ 垂直剖面上的投影

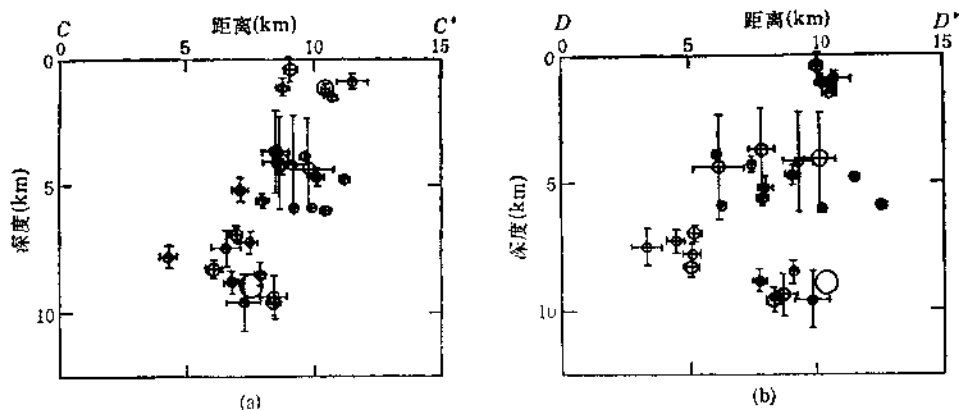


图 6 (a) 禄劝余震在与节面 II 走向平行的 $C-C'$ 垂直剖面上的投影
(b) 禄劝余震在与 $C-C'$ 剖面垂直的 $D-D'$ 垂直剖面上的投影

源在与节面 I 走向平行的垂直剖面 $F-F'$ 上的投影, 图 6(a) 是余震震源在与节面 II 走向平行的垂直剖面 $C-C'$ 上的投影。分别与上述两垂直剖面垂直的 $E-E'$ 剖面和 $D-D'$ 剖面上的余震震源的投影如图 5(b) 和图 6(b) 所示。各剖面在地面上的投影的位置如图 1 所示。由图 5(b) 可以看出, 28 个余震震中的绝大多数分布在倾向北西的约 5 公里宽的倾斜条带内。余震空间分布的这个特征表明, 这次地震的发震断层比较可能是节面 I 所表示的走向北东-南西、倾向北西的左旋-逆断层。

本工作系地震科学联合基金会和国家地震局滇西地震预报试验场共同资助项目, 云南省地震局姜葵、王贵美、陈金海、刘正荣、李一正、阚荣举和王兴辉等同志在野外观测和研究工作期间给予我们热情关心和大力支持, 作者谨向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 王培德, 1981. 一种新型的数字磁带记录地震仪——DCS-302 型地震仪. 地震科学研究, **3**, 62—64.
- [2] Herrmann, B. R., 1979. FASTHYPO——A hypocenter location program. *Earthq. Notes*, **50**, 25—35.
- [3] 福赛思, G. E., 莫勒, C. B., 1979. 线性代数方程组的计算机解法, 19, 徐树荣译, 科学出版社.
- [4] Stewart, G. W., 1973. *Introduction to Matrix Computation*, 223, Academic press.
- [5] Lawson, C. L., and Hanson, R. J., 1974. *Solving least squares problems*. Prentice-Hall.
- [6] 菲赫金哥尔茨, T. M., 1954. 微积分教程, 第一卷, 第二分册, 448, 叶彦谦译. 人民教育出版社.
- [7] 胡鸿翔、陆涵行、王椿镛、何正勤、朱良保、颜其中、樊跃新、张国庆、邓英娥, 1986. 滇西地区地壳结构的爆破研究. 地球物理学报, **29**, 133—143.
- [8] 云南省地震局综合预报研究室, 1985. 昆明电信传输地震台网云南地震目录(1985年1—6月).
- [9] 刘正荣、陈 敬, 1986. 1985年4月18日云南禄劝地震. 地震学报, **8**, 增刊, 161—165.
- [10] 周家玉、陈运泰、倪江川、王 鸣、王培德、柯兆明、吴大铭, 1985年4月18日云南省禄劝 $M_s 6.1$ 地震部分余震的震源时间函数. 地震学报, 待发表.

ACCURATE HYPOCENTER DETERMINATION OF AFTER-SHOCKS OF THE 1985 LUQUAN EARTHQUAKE

WU MINGXI, WANG MING, SUN CICHANG, KE ZHAOMING, WANG PEIDE and CHEN YUNTAI
(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

F. T. WU

(Department of Geophysical Sciences, State University of New York, Binghamton, U. S. A.)

Abstract

Based on the cassette tape readings acquired from a temporary seismic network of 4 digital DCS-302 seismometers, the detected aftershocks are determined of the $M 6.1$ Luquan earthquake which occurred on 18 April 1985 in Luquan County of Yunnan Province. An alternative algorithm of least squares solution to the hypocenter parameters without normalizing the observation equations is used in locating the events. The advantage of the proposed algorithm over the damped least squares method and the singular value decomposition method is assessed in terms of processing simplicity and computation precision. The 28 aftershocks determined are located in an area roughly surrounded by the Xi Ma River, the Jiu Long River, and a number of NW and NE trending faults. The space distribution of these events suggests that they are closely related to the faulting activities of the NE direction.