

# 新丰江水库 5.3 级(1964)地震区三角网平差 和震源参数反演\*

朱成男 刘玉权 王椿镛

(云南省地震局)

卢汝圻 陈俭德

(广东省地震局)

## 摘 要

本文系统地介绍了地震区三角网平差和利用平差结果反演断层参数的“随机尝试——动态平差”方法。通过新丰江水库 5.3 级地震区三角测量资料的处理,进一步阐述如何应用这种方法,并给出反演 5.3 级地震断层参数结果:断层走向北东  $62^\circ$ , 倾向南东, 倾角  $59^\circ$ , 断层长 4.7 公里, 上界面深 0.45 公里, 下界面深 4.5 公里, 倾向滑距 73.4 毫米, 走向滑距 25.5 毫米, 为正断右旋走滑断层, 地震矩  $m_0 = 2.0 \times 10^{24}$  达因·厘米, 应力降  $\sigma = 12$  巴, 释放的应变能下限  $E = 1.2 \times 10^{19}$  尔格。

文中依据所得结果,结合地震机制和构造资料讨论了新丰江水库地震的力源问题,指出区域应力场是主要力源,水压应力场是主要的诱发力源。

## 一、前 言

新丰江水库自 1959 年蓄水以后,地震活动频繁,引起了各方面的重视。1963 年建立了新丰江 A 震区水平形变三角网,十多年来复测多达 18 次,取得了一些有价值的资料。复测期间在测网内发生了 10 次 4 级以上地震,其中以 1964 年 9 月 23 日 5.3 级地震为最大。

由于震区复测网范围不大,地震引起的地面位移对网内任一测点都会有显著影响,因此如何选择参考点进行平差,求得可靠的地面位移,始终是处理这批资料的关键问题。

文献[1]全面回顾了利用地形变资料反演震源参数工作的进展情况。作为震区小三角网平差过程中如何选择参考点,如何反演震源参数,新丰江 5.3 级地震前后的形变资料处理具有一定的代表意义。本文将系统阐述我们曾经使用过的<sup>[2]</sup>并经过若干改进形成的“随机尝试——动态平差”法,通过处理 5.3 级地震形变资料说明这种方法的可取之处。

另外,依据本文结果,并结合其它资料探讨了水库地震的成因。

\* 1979 年 11 月 2 日收到。1980 年 9 月 5 日收到修改稿。

## 二、震区小三角网平差与断层参数模拟

当一个三角网作过复测之后,比较两期测量分别平差得到的三角点坐标,便可获得两期测量期间的三角点水平位移。对于重复水准测量,同样可求各水准点垂直位移。

三角网平差方法有按条件观测平差和按间接观测平差两种。人工计算考虑到计算的工作量,通常都采用条件观测平差,而电子计算机上两种平差方法均能处理。因为不同的三角网一般都具有不同的条件方程式,因而试图编制包罗所有条件方程式的通用程序是困难的。凡是事先能给出条件方程式的三角网,在电子计算机上按条件观测平差是容易做到的。本文叙述的 5.3 级地震区小三角网的平差,根据具体情况,我们采用了间接观测平差。

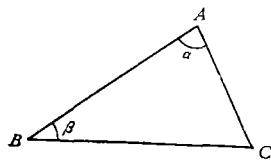


图 1 三角形边角注记  
下式,

$$\left. \begin{array}{l} x_c = \frac{x_A \operatorname{ctg} \beta + x_B \operatorname{ctg} \alpha - y_A + y_B}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta} \\ y_c = \frac{y_A \operatorname{ctg} \beta + y_B \operatorname{ctg} \alpha + x_A - x_B}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta} \end{array} \right\} \quad (1)$$

对于测边网应用下式,

$$\left. \begin{array}{l} x_c = x_A + P \cos t_{AB} - h \sin t_{AB} \\ y_c = y_A + P \sin t_{AB} + h \cos t_{AB} \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中

$$\left. \begin{array}{l} \sin t_{AB} = \frac{y_B - y_A}{AB}, \quad \cos t_{AB} = \frac{x_B - x_A}{AB} \\ h = \sqrt{(AC + P)(AC - P)} = \sqrt{(BC + q)(BC - q)} \\ P = \frac{-BC^2 + AC^2 + AB^2}{2AB}, \quad q = \frac{BC^2 - AC^2 + AB^2}{2AB} \end{array} \right\} \quad (3)$$

概略坐标的推算受推算路线的影响,确定好的路线常常是比较复杂的问题。考虑到计算地震引起的地面位移的第二期平差是建立在第一期平差基础上的,可以利用第一期平差结果作为第二期平差的概略坐标,经过数次迭代,仍可得到精确的真实坐标值,从而求得可靠的地面位移。这是建立地震引起地面位移场在平差过程中出现的第一个特点。正因为这样,同时考虑到反复平差,为了节省计算时间,程序(图 2)中输入的不是原始数据角度和边长,而是经过处理的边长差。

另一个问题是参考点位移对平差结果的影响。象新丰江水库那样小的三角网,震区地面位移将影响到网内所有三角点。按常规平差,将参考点位移设为零,必然带进一个系统误差,影响平差精度和由此而产生的对震源参数估计的错误。为此,我们引入“动态平差方法”。所谓“动态平差”,是参考点位移通常不为零,在反演断层参数时,用给定的断层模

式,由位错理论去计算参考点位移,求得参考点新坐标。以参考点新坐标为出发点进行平差,实质上相当于将参考点移至无穷远处<sup>[2]</sup>。如图 2 所示。在给定一组断层参数之后,计算一次参考点位移,作一次平差。

在初始断层参数每修改一次之后,又重新计算参考点位移并重新平差。理论位移计算次数与平差次数相等。这样做,参考点的位移取决于断层模式。而断层模式是在随机尝试过程中选取实测和理论位移残差平方和的最小者。因此,所选择的平差方案也是最佳方案。

关于理论位移的确定,这里运用随机尝试法给定断层参数,按文献[3]的解析式计算断层错动的位移场。简而言之,按弹性静力学位错理论<sup>[1,3-5]</sup>,设矩形断面在地表投影点坐标为  $x$ 、 $y$ ,半长度  $l$ ,走向  $\phi$ ,倾角  $\theta(0^\circ - 180^\circ)$ ,上界深度  $d$ ,下界深度  $D$ ,走向滑距  $u_s$ ,倾向滑距  $u_d$ ,这九个参量与地表给定点位移  $u$  之间存在函数关系,即

$$u = f(x, y, l, \phi, \theta, d, D, u_s, u_d), \quad (4)$$

文献[1—3]中列出了不同情况下的解析式。

一般来说,对于一个已知地震,上述九个参数的上下限范围是能给出的。以新丰江 5.3 级地震为例来说,  $x$ 、 $y$  应在震中附近。从水库周围地震台密布情况看,震中位置的误差不超过 3 公里,为保险起见,  $x$ 、 $y$  的扫描空间放在以震中为原点,5 公里为半径的范围内;  $\phi$  和  $\theta$  均可在  $0^\circ - 180^\circ$  范围内扫描;  $d$  在 0 至几公里范围内;  $D$  在几公里至十几公里范围内;  $u_s$  和  $u_d$  由初步平差结果可知其范围在 0 至几百毫米范围内。在考虑到各参数变化范围时,用随机尝试法在每个参数各自的范围内随机给出数值,用这些参数随机组合分别计算位移场。并在此基础上平差,求得各点理论和实测位移的残差平方和  $\delta$ 。选取  $\delta$  最小的一组断层参数和相应的平差结果,作为最佳计算方案。

如果因参考点选择不当(参考点有相当的非地震位移时),会造成残差平方和  $\delta$  远大于测量误差,这时应改变参考点位,用上述方法重新计算,选取最佳方案。

上述反演断层参数和三角网平差方法根据其特点可称为“随机尝试——动态平差法”,图 2 给出了计算框图。

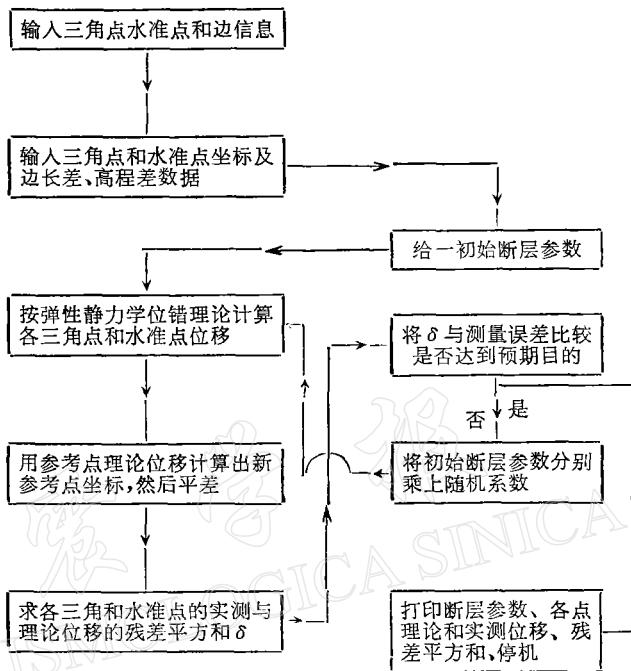


图 2 计算地震引起地面位移和断层参数的  
“随机尝试——动态平差”方框图

### 三、5.3 级水库地震形变资料的处理

**1. 资料说明** 5.3 级地震之前于 1964 年 1 月 4 日—28 日作了第一期测量，震前的 5 月 9 日—7 月 16 日作了第二期测量，震后的 10 月 11 日—12 月 1 日作了第三期测量，至 1965 年 10 月共测了 6 期，有 5 期复测结果。到目前已有 18 期复测结果。本文应用第三期和第二期资料对比确定 5.3 级地震形变和震源参数。

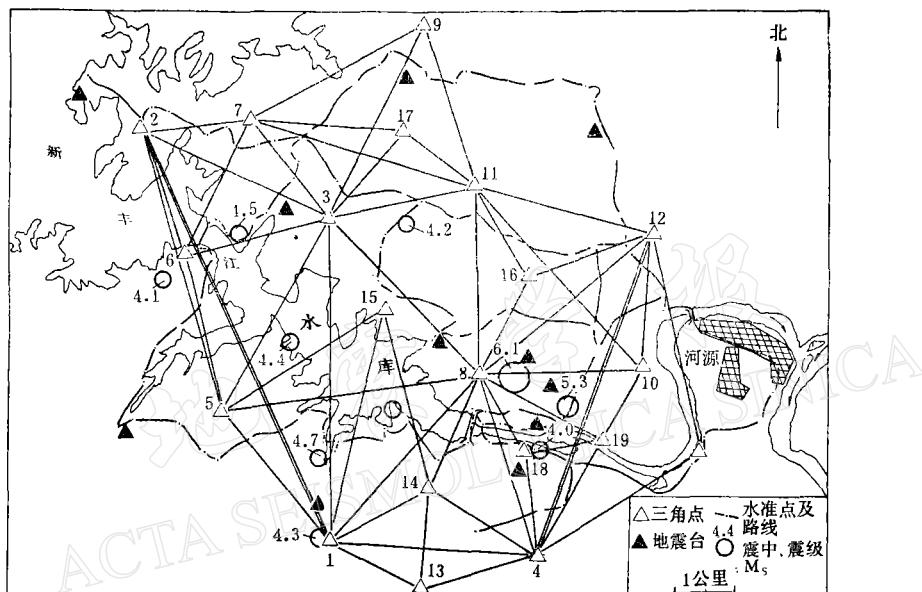


图 3 新丰江 5.3 级地震和震区三角网位置

三角网、水库和震中位置如图 3 所示。对于第二、三期资料共有 19 个三角点计 50 条边和 34 个水准点资料可以利用。由于水准点位精确坐标的散失，并难以重新确定其精确坐标，本文根据各点间的相对位置，在 5 万分之一的地形图上读取坐标。用水准测量资料参与计算和不参与计算分别进行平差，比较二者之间的差别。

关于本区三角网有下述几个特点：

- 1) 点位埋设基础好，是按抗 X 度地震设计的，埋于基岩上的整体钢筋混凝土观测墩，不会因为基础失效造成偏差。
- 2) 标志中心、仪器中心、照准点中心三心一致，可认为中误差为零。
- 3) 高精度。有一套不同于一般大地测量的技术措施，例如天文方位角复测采用同人同仪器，以削弱人仪差的影响。
- 4) 设点布局充分考虑地质、地震研究的需要。5.3 级地震落在测网内。
- 5) 三角测量平均测角中误差  $M_{\text{角}} = \pm 0.42''$ ，最大  $\pm 0.57''$ ，最小  $\pm 0.30''$ 。物理测距平均内符比例误差为  $0.5 \times 10^{-6}$ 。

为了评价参考点及其位移的不同所构成平差结果的差异，我们选择了各种不同参考

点和不同的位移，分别进行平差，确定位移场。图 4 给出了具有代表意义的三种情况，即固定 1、2 号点；固定 1, 12 号点；给固定点不同的初始位移。

由图 4 清楚可见，参考点及其位移的不同对平差结果有显著影响，其根本原因可能是观测误差引起的。图 4 还表明，不论用哪一种参考点进行平差所得震区位移场均显示出明显的规律性。说明 5.3 级地震的震区形变量已超过上述观测误差。

**2. 计算结果** 选用不同参考点，用前述方法平差，反演断层参数，比较各种情况的残差平方和  $\delta$ ，其中唯有固定 1、2 号点（图中星号所示）时获得一组断层数具有残差平方和  $\delta = 3078.8 \text{ mm}^2$ ，各测点平均残差为 9mm，小于观测误差。这一组断层参数是，走向北东  $62^\circ$ ，倾角  $59^\circ$ ，倾向 SE，断层长 4.7km，断面上界 0.45km，下界 4.5km，倾向滑距 73.4mm，走向滑距 25.5mm，为右旋正断层，断层中心点地表投影位置 0，如图 5 所示。

依据上述断层参数，应用吴尔夫网作图法可求得相应的震源应力参数，其结果如表 1 所列；同时可求得其它震源参数，地震距  $m_0 = 2.0 \times 10^{24}$  达因·厘米，应力降 12 巴，释放的应变能下限  $1.2 \times 10^{19}$  尔格。

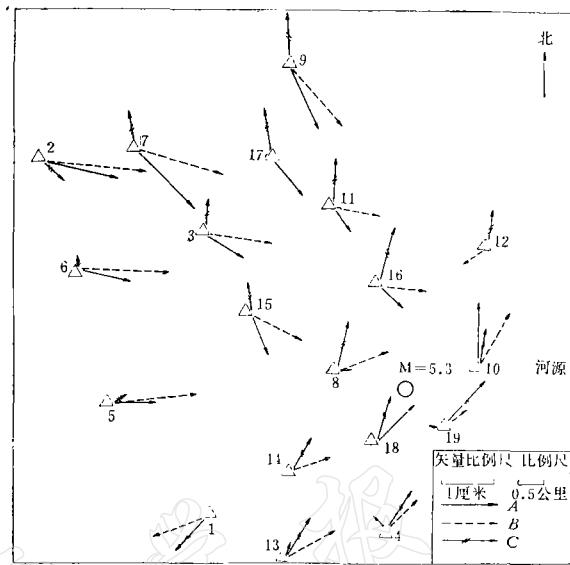


图 4 应用不同的参考点，得到的平差结果

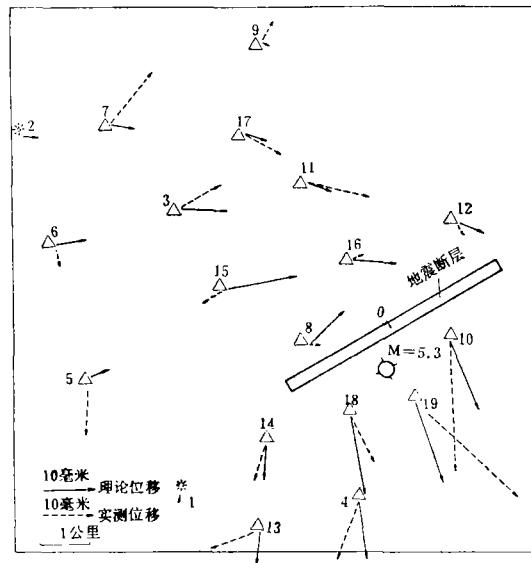


图 5 新丰江水库 5.3 级地震断层模式及地面位移

表 1 新丰江水库 5.3 级地震不同方法测定的震源力学参数对比表

测定方法	节面 A			节面 B			X 轴		Y 轴		P 轴		T 轴		N 轴		资料来源
	走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角	
形变反演	97°	NE	33°	62°	SE	59°	3°	52°	153°	32°	110°	70°	345°	12°	252°	16°	本文
P 波初动解 析 法		352°	66°		122°	35°					210°	60°	333°	17°	71°	24°	国家地震局
P 波初动作 图 法	113.5	NE	55°	30.5°	SE	80°	120.5°	10°	23°	35°	77.5°	32°	337.5°	16.5°	224.5°	53°	

#### 四、新丰江水库地震成因问题

关于新丰江水库地震成因问题，已有文献<sup>[7-9]</sup>详论。我们试就本文计算结果并结合有关资料加以探讨。

我们将广东一带 5 级以上地震的震源机制结果和本文测定的结果一并列于表 2。比较这些地震的震源力学参数，发现有下述几个特点。

表 2 新丰江水库地震与水库外围其它地震主应力参数对比表

编 号	地震时间 (年、月、日)	震 中	震 级	P 轴		T 轴		N 轴		测定方法
				方 位	仰 角	方 位	仰 角	方 位	仰 角	
1	1966.9.26.	广东汕头	5.3	256°	10°	351°	25°	121°	63°	图 解
2	1965.10.7.	南沙群岛	5.7	100.5°	7°	199.5°	55°	6°	34.5°	图 解
3	1962.3.19.	新 丰 江	6.4	286.5°	8.5°	17°	5.5°	141°	80°	图 解
4	1964.9.23.	新 丰 江	5.3	77.5°	32°	337.5°	16.5°	224.5°	53°	图 解
5	1969.7.26.	广东阳江	6.1	117°	9°	218°	49°	19°	39°	解 析
6	1964.9.23.	新 丰 江	5.3	110°	70°	345°	12°	252°	16°	地形变

注：表中 1—5 号地震主应力参数系国家地震局测定结果，6 号为本文结果。

(1) 1964 年 9 月 23 日的 5.3 级地震，本文中用地形变资料得到的力学参数与国家地震局由 P 波初动测定的结果比较接近：主压应力轴方位为近东西向，主压应力轴的仰角大于主张应力轴的仰角。说明 5.3 级地震有明显的正断分量。

(2) 新丰江水库地区的地震应力场包括由一些小震显示的应力场，主压应力轴的优势方位为近东西向。这一点与水库外围地区的地震主压应力轴优势方位相接近，表明区域应力场对水库地震的控制作用。

(3) 已测定的新丰江水库地区的两个 5 级以上地震的震源应力参数表明，主压应力轴的抑角均大于主张应力轴仰角。文献[7]所测定的 150 次小地震断层面解和 2038 个小震发震应力方向，揭示了这里绝大多数水库地震的主张应力轴具有低仰角( $< 30^{\circ}$ )特征。

水库外围地区的地震，已测定结果(表 2)无一例外地表明主压应力轴的仰角小于主

张应力轴。说明华南地区现代区域地震应力场的另一个特点是水平挤压作用的优势地位，表现在地震断层上有一定比例的逆断分量(如前述，水库地震有明显的正断分量)。这一特点明显地与水库地区地震应力场不同，其原因何在呢？

文献[7]计算了该水库的水压位移场和水压应力场，指出该区弹性垂直位移超过3厘米的区域远大于地震活动区；水体引起较大的垂直位移，库区中心下沉量最大约10厘米。这一事实说明水库蓄水后水压应力场的影响是不可忽视的。考虑到已发生的水库地震比水库外围地区的地震主压应力轴仰角有明显增加的特征，证明了水压应力场是这里水库地震的力源之一。但这个力源尚未达到改变区域应力场的方位，表明区域应力场仍然是这里水库地震的重要力源。

就其构造方面来看，库区位于多组活动构造的交汇部位(图6)，这是新丰江水库地震的基本构造条件。

关于水的渗透作用对新丰江水库地震成因的影响问题，本文难以作出评论。

## 五、讨 论

由新丰江水库5.3级地震形变资料的处理表明，“随机尝试——动态平差”方法，对于分析小三角网的地震形变，能做到变换平差的参考点，并用理论位移代替参考点位移，消除参考点的客观位移引起的计算误差，因而在建立合理的断层模式方面有一定的优越性。

尝试或称试验设计有多种方法，随机尝试是计算机上的常用方法。据文献[10]介绍，对于多因素多水平的试验设计，可以大大减少试验次数，例如8因素，每因素7水平，全部试验要 $7^8 = 5,764,801$ 次，用正交拉丁方只需49次(文献[10]第40页)。

本文中的尝试是9因素，若用9水平，按正交设计做72次尝试，等效于全部试验的 $9^9 = 387,420,489$ 次。在5.3级地震区三角网平差中，对三种不同的参考点，每种都计算了一百次，三种情况的残差平方和最小值均出现在第20次试验之前。这可能与我们所选定的断层参数上下限与实际参数差距不很大有关。这就是说在合理地估计了断层参数的上下限之后，可以大大减少尝试次数，对应于一组参考点的位置，20次尝试常可达到目的。

我们以若干次尝试（在一定统计意义上，相当于一个需要进行数亿次试验的全面筛选）的实测位移与理论位移的残差平方和最小者作为选定模式的标准。因此所得结果是有限次尝试范围内的最佳结果，因而，解不是唯一的，这是随机尝试法的缺点所在。另外随机尝试法也很难给出评价断层参数精度的具体指标。

因为物理测距平均内符比例误差为 $0.5 \times 10^{-6}$ ，而测边长度大多在2公里左右，平均边长误差为10毫米。计算结果表明各测点理论位移与实测位移平均残差为9毫米，它小

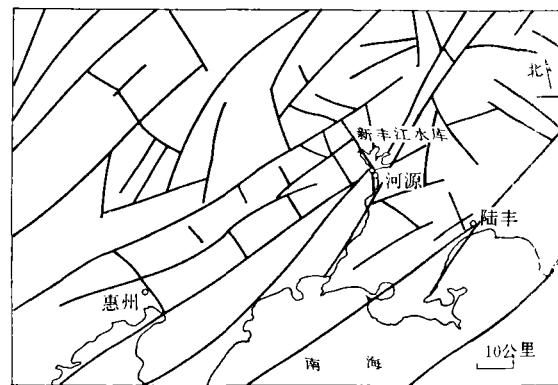


图6 新丰江水库及其周围地区卫星照片解释构造图

于测量误差。而且断层附近的多数点的实测和理论位移比较接近，说明所选模式具有一定的合理性。但是还可以看到有些点，例如 15、5 号等点的理论与实测位移不一致，一方面可能因为观测误差分布不均引起，另一方面的原因仍然可能在于模式的过于简化，而客观的地震断层比较复杂。

### 参 考 文 献

- [1] 陈运泰等，用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式，地球物理学报，**22**, 3, 1979.
- [2] 王椿镛等，用地形变资料确定通海地震的断层参数，地球物理学报，**21**, 3, 1978.
- [3] L. Mansinha and D. E. Smylie, The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **61**, 5, 1971.
- [4] 陈运泰等，根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程，地球物理学报，**18**, 3, 1975.
- [5] T. Maruyama, Statical elastic dislocations in an infinite and Semi-infinite medium, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Tokyo Univ., **42**, 2, 1964.
- [6] F. Press, Displacements, strains and tilts at teleseismic distances, *J. G. R.*, **70**, 10, 1965.
- [7] 王妙月等，新丰江水库地震的震源机制及其成因的初步探讨，地球物理学报，**19**, 1, 1976.
- [8] 中国科学院地质研究所破裂与震源力学组、广东省科技局新丰江地震总结组，新丰江水库区微震震源力学的初步研究，地质科学，**3**, 1974.
- [9] 冯锐，新丰江 6.1 级水库地震前后的波速比变化，地球物理学报，**20**, 3, 1977.
- [10] 中国科学院数学研究所统计组编，常用数理统计方法，科学出版社，262, 1974.

## TRIANGULATION NET ADJUSTMENT AND THE FOCAL PARAMETERS OF THE 1964 MAGNITUDE 5.3 EARTHQUAKE OF THE XINFENGJIANG RESERVOIR AREA BY INVERSION

ZHU CHENG-NAN LIU YU-QUAN WANG CHUN-YONG  
(Seismological Bureau of Yunnan Province)

LU RU-QI CHEN JIAN-DE  
(Seismological Bureau of Guangdong Province)

### Abstract

In this paper, the triangulation net adjustment in the Xinfengjiang reservoir area and the method of “random try-motion adjustment” used to get the fault parameters by inversion of the results of adjustment are systematically described. In treating the triangulation data before and after the magnitude 5.3 earthquake of the Xinfengjiang reservoir area it has been further made clear the applicability of the method.

Through inversion, the parameters of the earthquake fault are: strike N62°E, dipping to the southeast at an angle of 59°, the length of the fault, 4.7 km, depth of its upper boundary, 0.45 km, lower boundary, 4.5 km, dip slip dislocation, 73.4 mm, strike slip dislocation, 25.5 mm. It is a normal right-lateral fault, seismic moment  $m_0 = 2.0 \times 10^{24}$  dyne-cm, stress drop  $\sigma = 12$  bars, strain energy release  $E = 1.2 \times 10^{19}$  ergs.

It is also discussed the force system causing the earthquakes of the Xinfengjiang reservoir area based on the results thus obtained and the data of focal mechanisms and of tectonic structures. The conclusion is that the regional stress field constitutes the main cause, while the water pressure provides the triggering effect of the earthquakes.