

# 陕西省及邻近区域台网的测震精度

谢家树

(陕西省地震局分析预报室)

地震参数的测定精度是由多方面因素决定的。其中测震台网的几何布局也起着较大的作用。本文试图用蒙特卡罗法计算陕西省及邻近区域台网的几何布局对测震精度产生的影响。

自1965年以来,佐藤泰夫和D. Skoko<sup>[1-8]</sup>采用直角坐标系中的走时方程,先线性化处理,再采用蒙特卡罗法给出台站观测误差各种随机分布值,求解一系列线性方程组。他们先采用5个台站组成的台网,分别布列成不同几何形状,求出各种情况下地震的经纬度、深度、发震时刻和波速等5个参数的误差。因为一个台站对应于一个走时方程,所以问题是解一个恰定方程系统,这是容易求解的。D. Skoko和佐藤泰夫<sup>[5][6]</sup>还分别计算了印度台网(由15个台组成)和南斯拉夫台网(由8个台组成)的精度。S. Büyükkasikoglu(1976)<sup>[4]</sup>则计算了土耳其台网(由6个台组成)和周围外国的3个台组成台网的精度。他们的计算都得到了比较满意的结果。找出了现存台网的弱点,提供了未来增设新台站的推荐位置。

现在我们采用类似的方法,先对陕西省区域台网的测震精度进行计算,找出其弱点。然后加入周围邻省台站重新计算,以比较其结果。同时研究了当其中一个台站观测误差突出地大时,测震误差的变化。

## (一) 方法

盖革(1912)提出定位程序的统计模型是:

$$t_i - F_i = e_i \quad (7) \quad i = 1, 2, 3 \dots N \quad (1)$$

式中 $F_i$ 是某特定震相到第 $i$ 个台的理论走时,假定它是没有误差的; $t_i$ 是第 $i$ 个台上该震相的观测走时; $e_i$ 是第 $i$ 个台上的观测误差; $N$ 是台站数目。我们假定每个台上的 $e_i$ 是独立的,并有相同的均方差。

一般说来,走时是震中距 $R$ 和震源深度 $h$ 的非线性函数。为了将其线性化,需作泰勒展开,忽略二级小量,并考虑到(1)式,有

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_i \Delta x_i + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_i \Delta y_i + \left(\frac{\partial F}{\partial h}\right)_i \Delta h_i + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_i \Delta T_i = e_i \quad (2)$$

因为省内没有精确的走时曲线,并且考虑到保证求解中各参数的独立性,假定 $\left(\frac{\partial F}{\partial h}\right)_i$

= 0。並且注意到  $(\frac{\partial F}{\partial T})_i = 1$ ，于是有

$$\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_i \Delta x_i + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_i \Delta y_i + \Delta T_i = e_i \quad (3)$$

我们的目的是找出震中距误差和发震时刻误差。如果用  $\Delta R$  和  $\Delta T$  分别表示它们，那么经过一些简单的数学代换，可将 (3) 中的经纬度误差分别换成  $\Delta R$  和方位角  $\theta$  表示。即得：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta}\right)_i \cos\theta_i \cdot \Delta R \cos\theta + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta}\right)_i \sin\theta_i \cdot \Delta R \sin\theta \\ & + \Delta T_i = e_i \quad (4) \end{aligned}$$

(4) 式中： $\theta_i$  表示以真实震中为原点时，台站  $i$  的方位角；

$\Delta R$  为真实震中与计算震中的距离，即震中距误差；

$\theta$  为计算震中的方位角；

以上各参数量见右图所示。 $\Delta T$  为所求的发震时刻误差（它是台网的发震时刻误差）。

当台站数  $N > 3$  时，方程组 (3) 和 (4) 中各有  $N$  个方程，而未知数只 3 个，即  $\Delta R \cos\theta$ ， $\Delta R \sin\theta$ ，和  $\Delta T$ 。故这两个方程组是超定方程组。将 (4) 写成矩阵形式

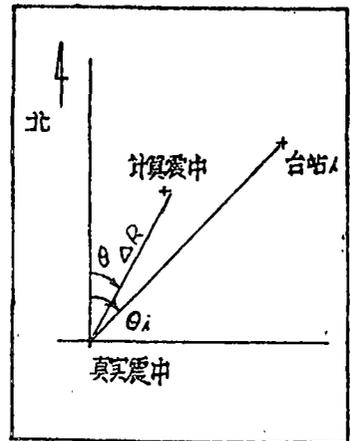


图 1

$$\begin{pmatrix} \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta}\right)_1 \cos\theta_1 & \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta}\right)_1 \sin\theta_1 & 1 \\ \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta}\right)_2 \cos\theta_2 & \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta}\right)_2 \sin\theta_2 & 1 \\ \dots\dots\dots \\ \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta}\right)_n \cos\theta_n & \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta}\right)_n \sin\theta_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta R \cos\theta \\ \Delta R \sin\theta \\ \Delta T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

或写成  $A \cdot S = B$  (6)

在 (6) 式中  $A$ ， $S$ ， $B$  分别表示 (5) 中的三个矩阵。可以证明，本省台网的参数（加邻省邻近台站也一样）代入  $A$  后，满足使其列满秩的条件。这是因为没有三个台站和真实震中排列在同一条直线上。这样， $A$  矩阵及其转置矩阵的乘积  $A^T A$  是非奇异的  $3 \times 3$  阶方阵。根据最优化理论，解向量  $S$  为

$$S = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (7)$$

在电子计算机上求解 (7) 式即可得出结果。

## (二) 计算过程及结果

采用本省台站16个。邻近的外省台站30个。其名称及经纬度见附表。采用假定的震中位置(代表真实震中)共64个。相邻震中间隔为经纬度各 $0.5^\circ$ , 均匀地分布于本省 $36.5^\circ\text{N}$ 以

计算中使用台站一览表

编号	名称	经度( $^\circ\text{E}$ )	纬度( $^\circ\text{N}$ )	编号	名称	经度( $^\circ\text{E}$ )	纬度( $^\circ\text{N}$ )
1	陕西省 西安	108.924	34.032	25	永济	110.647	34.837
2	汉中	107.025	32.894	26	河南省 洛阳	112.465	34.567
3	韩城	110.461	35.571	27	卢氏	111.037	34.017
4	华县	109.777	34.480	28	浙川	111.492	33.131
5	商县	109.948	33.885	29	镇平	112.267	33.136
6	彬县	108.077	35.066		湖北省		
7	陇县	106.704	34.920	30	丹江	111.525	32.553
8	乾县	108.217	34.570	31	保康	111.256	31.882
9	周至	108.321	34.053		四川省		
10	泾阳	108.753	34.709	32	江油	104.685	31.794
11	宁陕	108.323	33.325	33	南坪	104.228	33.276
12	蒲城	109.838	34.958	34	平武	104.548	32.415
13	安康	109.037	32.675		甘肃省		
14	延安	109.462	36.571	35	文县	104.683	32.95
15	铜川	109.085	35.178	36	武都	104.975	33.358
16	宝鸡	107.062	34.354	37	成县	105.758	33.736
	内蒙古自治区			38	礼县	105.167	34.181
17	清水河	111.667	39.9	39	天水	105.903	34.485
	山西省			40	张家川	106.266	35.017
18	离石	111.244	37.533	41	平凉	106.667	35.467
19	蒲县	111.094	36.410		宁夏回族自治区		
20	夏县	111.237	35.120	42	固原	106.282	36.012
21	隰县	111.897	36.610	43	同心	106.441	37.207
22	介休	112.032	37.092	44	盐池	107.434	37.779
23	临汾	111.531	36.077	45	石咀山	106.681	39.294
24	绛县	111.541	35.566	46	灵武	106.368	38.090

南的区域。取速度 $(\frac{\partial F}{\partial \Delta})^{-1}$ 为6.0公里/秒。对方程组(6)中各方程均未做加权处理。计算

时做如下假设:台站在同一表面;观测误差 $e_i$ 是服从高斯分布的小量等。分别取 $e_i$ 为+0.1, 0, -0.1; +0.3, 0, -0.3各种值计算。取后一组值是为了进行比较。

计算分两步:第一步先将超定方程组化为正规方程组,第二步是解该正规方程。采用改进的平方根法求解。程序框图见下图。

如果假定每一个台站的 $e_i$ 有0,  $\pm 0.1$ 三种可能值,那么16个台站之间观测误差的随机组合值有 $3^{16}$ 种。由于观测误差服从一定的分布律,当计算次数足够多时,可以用均方误差来反映所求的误差结果。在计算过程中,不断描绘误差曲线形状并比较误差值的大小,当计

算次数增加而结果变化不大时，即认为可以中止计算。

对超定方程组的“病态问题”，未做理论检验，在程序中预留了求解失败的“出口”。因为考虑到方阵  $A^T A$  一般是“病态”的，故求解中采用了奇异值分解定理。有关方程“病态”的讨论，文献〔8〕中有详尽而明确的阐述，此处不准备详述。

全部计算在 DJS—6 电子计算机上完成。

对于陕西省 16 个台站组成的台网，分别计算了 17 次，24 次，30 次，40 次，50 次随机组合值时的解，当误差曲线形状变化不大，误差值只变化 5%—10% 左右时中止计算。改变随机组合值是用改变程序中赋值语句和改变台站座标顺序来完成的。计算结果见图 (2) 和 (3)。

从图 (2) 和 (3) 中可见，均方误差  $\Delta R$  和  $\Delta T$  在陕西中部地区最小，当观测误差为  $\pm 0.1$  秒时， $\Delta R$  一般小于 0.2 公里， $\Delta T$  小于 0.05 秒。在  $33^\circ N$  至  $36^\circ N$  之间， $\Delta R$  小于 0.5 公里， $\Delta T$  小于

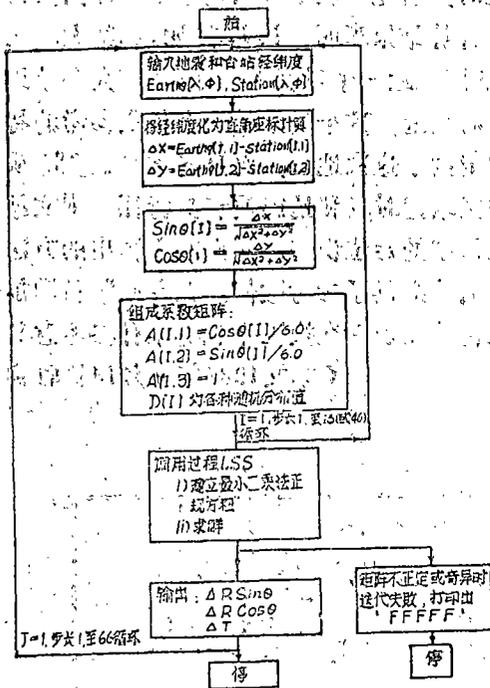
0.1 秒。离开这个区域，特别是本省最南部，误差急剧增加。对于  $\Delta T$  来说，中部的西半部又较东半部小。在外围台站附近， $\Delta R$  和  $\Delta T$  曲线向外凸出，其值也减小，这在延安、汉中两台附近尤其明显。

取  $e_i = \pm 0.3$  秒计算的结果表明， $\Delta R$  和  $\Delta T$  相应增加到上述结果的 3 倍。

根据本省台网现有观测水平，认为观测误差  $e_i$  取  $\pm 0.3$  秒较为合理。如取这个值，那么本省境内大约  $33^\circ N$  至  $36^\circ N$  之间的区域（包括关中全部、陕北南部及陕西北部）内地震定位精度的均方误差  $\Delta R < 2.5$  公里，发震时刻的均方误差  $\Delta T < 0.25$  秒，可以达到 I 类精度水平。考虑到本省地震活动性的差异和不同的监测要求，可以认为本省台网基本合理，能满足监测要求。

为了试图减小本省南部地区的测震误差，并研究当台站数目增加时误差的变化，取外省邻近的 30 个台站加入计算。这 30 个台站分属内蒙、山西、河南、湖北、四川、甘肃、宁夏等省区。计算方法及过程完全相同。其结果如图 (4) 和 (5) 所示。（取  $e = \pm 0.1$  时的结果）。

将图 (4) 与图 (2) 比较，可见  $\Delta R$  的最小值减为原来的 1/3 左右，南部的大误差区消失了。本省  $36.5^\circ N$  以南全部地区的  $\Delta R$  均小于 0.1 公里（若取  $e_i = \pm 0.3$  秒，则为 0.3 公里。）而且台数增加后， $\Delta R$  分布要均匀得多。对比图 (3) 和 (5) 可见，当台站数增加时， $\Delta T$  的最小值并无明显变化，但误差曲线形状有明显变化，而且南部大误差区消失了，误差值分



计算程序框图

布也更趋均匀。对本省在 $36.5^{\circ}\text{N}$ 以南全部地区,  $\Delta T$ 均小于70毫秒。(若取 $e_i = \pm 0.3$ 秒则为200毫秒左右)。因而对发生于本省南部地区的地震, 邻省台站的观测资料是十分重要的。对于发生省内其它地区的地震, 采用邻近的外省台站的观测数据可大大减小 $\Delta R$ 值。

为了研究某个台站误差偶然地出现较大值时, 引起测震误差的变化, 让西安台的 $e_i = \pm 1.0$ 秒, 而其余45个台站误差 $e_i = \pm 0.1$ 秒。计算结果表明, 误差有明显增大。在大多数地区,  $\Delta R$ 增为原来的4倍左右(在陕西中部地区几近一个量级), 而 $\Delta T$ 在大多数地区都增加了近一个量级。因为西安台正好位于区域中心附近, 这个结果是一个仅供参考的特例。

应该指出, 本文计算的前提是这些台站都记到了这次地震, 而且各台误差服从同一分布, 这个假定是合理的。但是由于缺乏精确的区域走时表和地震波衰减特征, 本文结果有一定的局限性。也并不完全反映目前测震日常工作中的定位误差。然而本文提出的方法可以用来评价区域台网的质量, 结果也对定位误差的估计提供了参考数值。在台站数目增加时对测震误差的变化进行研究的结果, 对于考虑增设台站和资料交换工作也有某种参考意义。

(本文1981年9月14日收到)

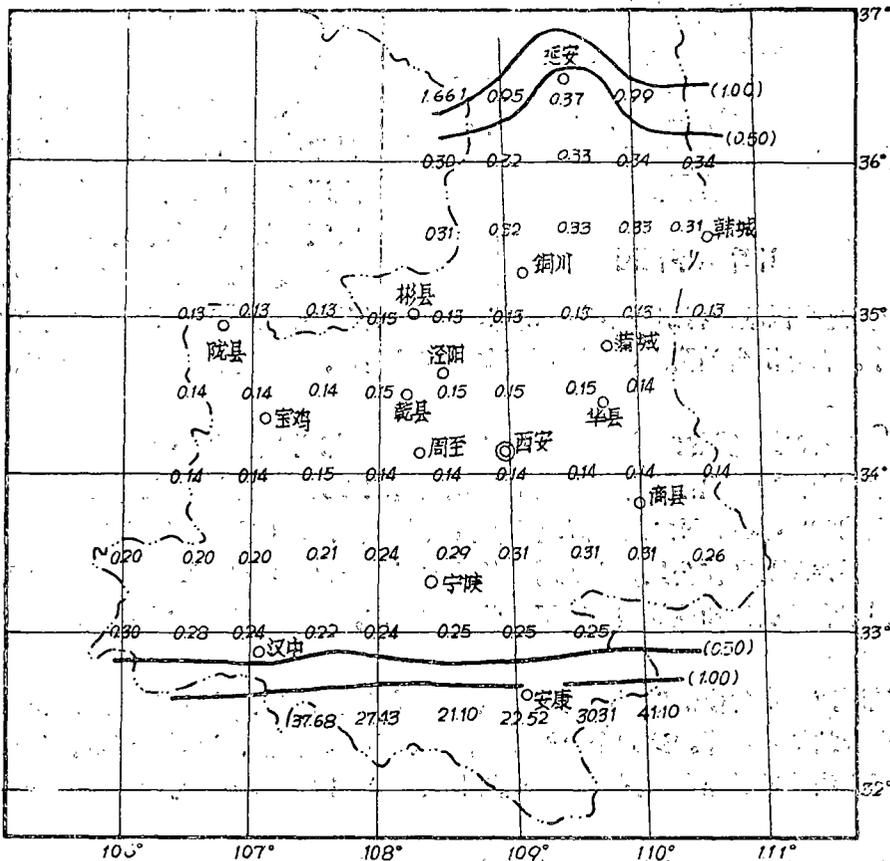


图 2

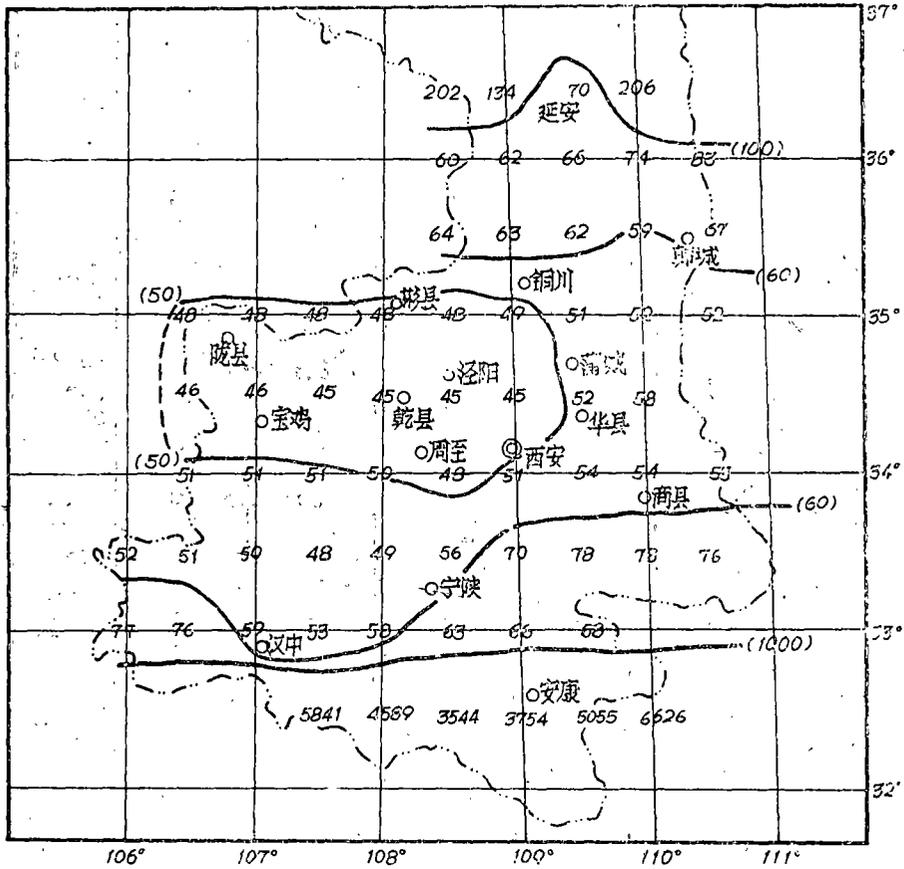


图 3

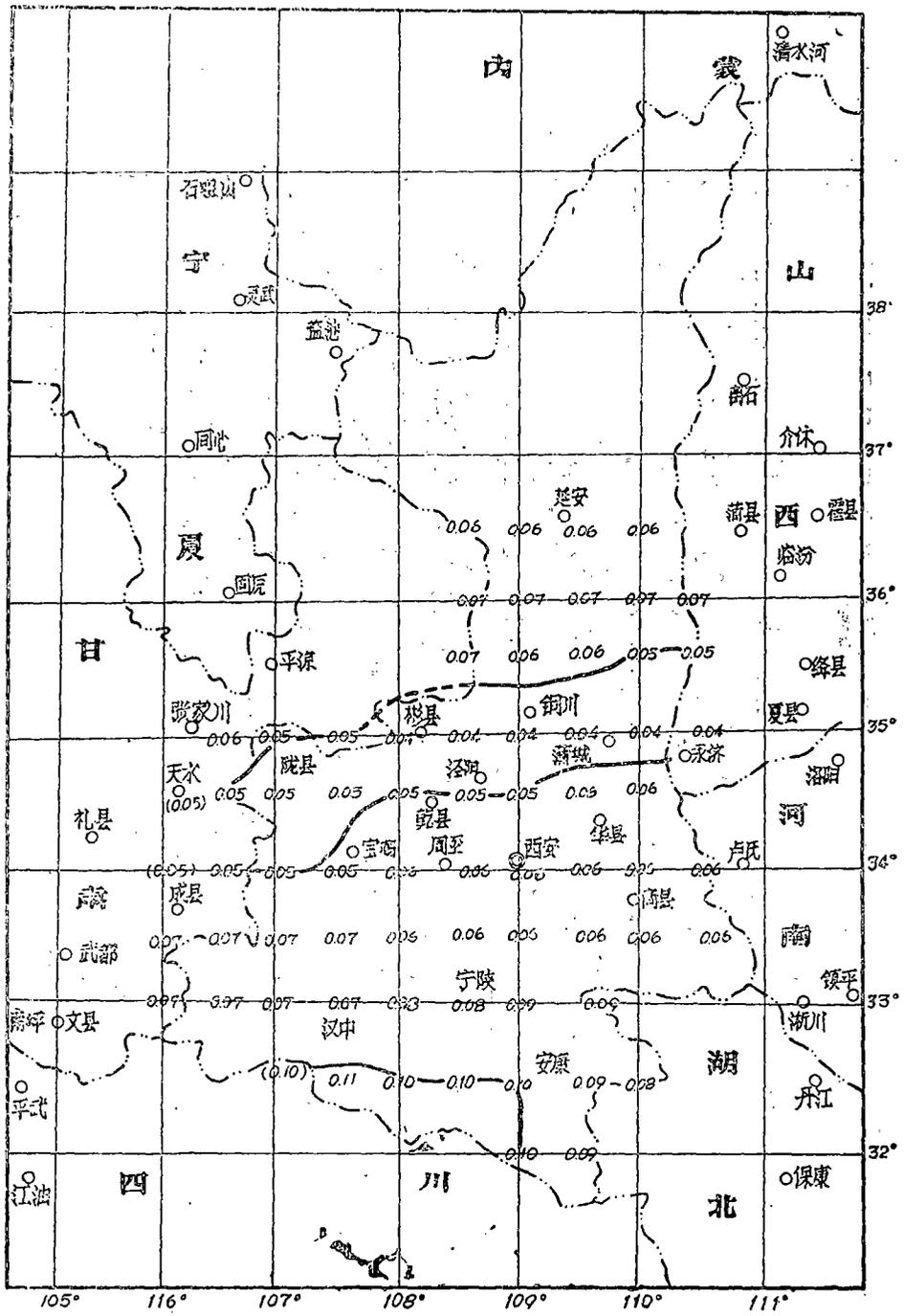


图 4

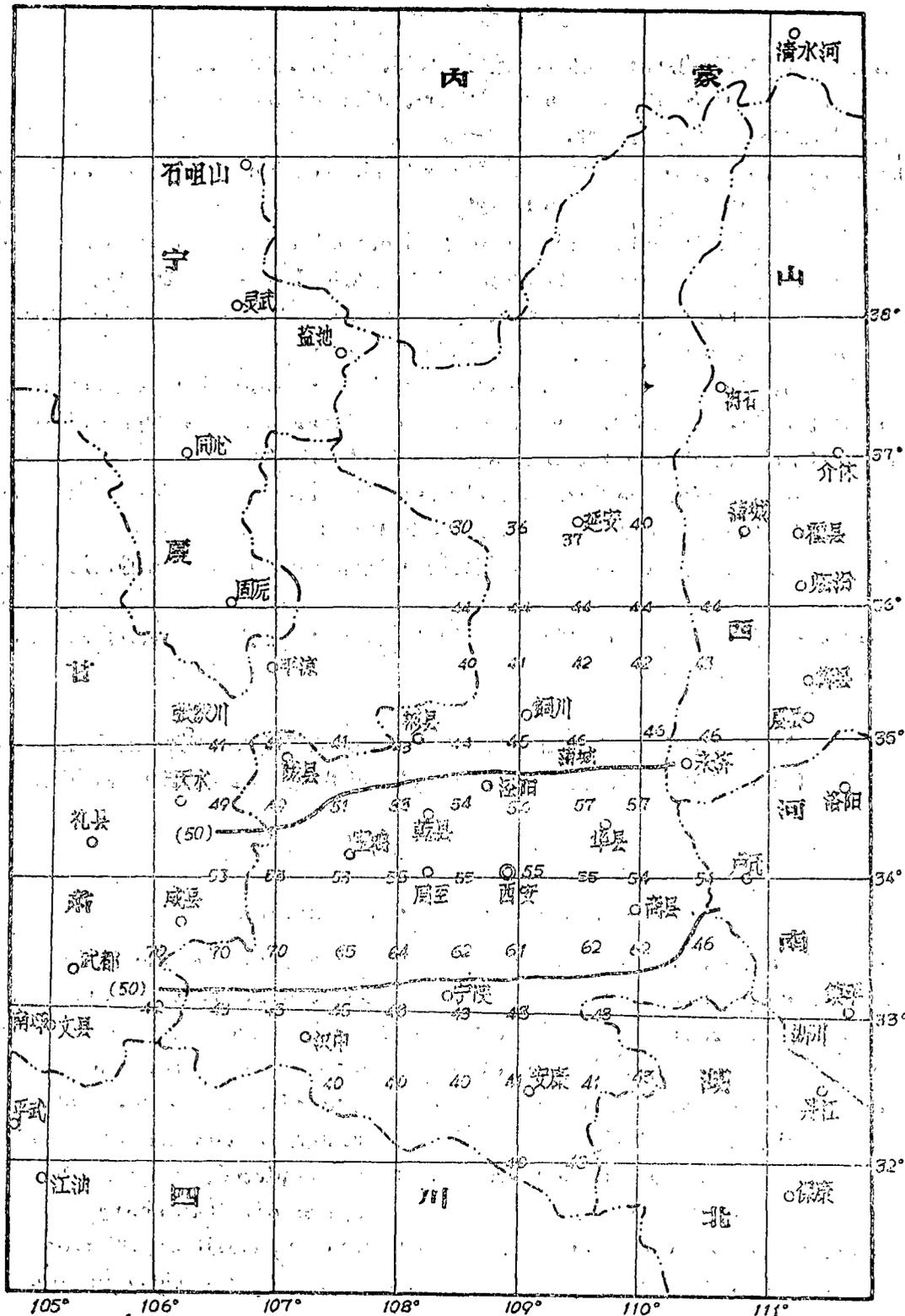


图 5

## 参 考 文 献

- [1]佐藤泰夫,地震观测点的最优分布,地震,1965,18卷,PP9—14,
- [2]Sato,Y and D.Skoko,Optimum Distribution of Seismic Observation Point, I,1965, B.E.R.I.,43, PP451—457.
- [3]Sato,Y and D.Skoko,Optimum Distribution of Seismic Observation Point, II,1965, B.E.R.I., 44, PP13—22.
- [4]Silva Büyükaşıkoglu,Accuracy of the Determination of Earthquake Epicenter and Origin time in Turkey,1976, B.E.R.I., 51, PP29—37.
- [5]D.Skoko,Y.kotake and Y.Sato,Optimum Distribution of Seismic Observation Point,V,1968, B.E.R.I., 46, PP791—820.
- [6]D.Skoko, Yasuo Sato, Itsue Ochi and Tarun kanti Dutta,Accuracy of the Determination of Earthquake Source Parameters as Determined by Monte Carlo Method,1966, B.E.R.I., 44, PP893—900.
- [7]E. A.Flinn,Confidence Regions and Error Determinations for Event Location,1965, Review of Geophysics, 3, PP157—185.
- [8]W.H. K. Lee, S.W. Stewart, 微震台网的原理和应用,1979, 国家地震局地球物理所译。
- [9]中国科学院沈阳计算技术研究所编, ALGOL程序设计, 辽宁人民出版社出版(1980年版)。

ACCURACY OF THE DETERMINATION OF EARTHQUAKE EPICENTER AND  
ORIGIN TIME IN THE NETWORK OF SHANXI AND ITS ADJACENT PROVINCES

Xie Jia-Shu

(The Seismological Bureau of Shanxi Province)

In this paper, we have calculated the accuracy of the determination of earthquake epicenter and origin time in the network of Shanxi and its adjacent provinces by Monte Carlo method. In order to study effects on the accuracy of determination of earthquake epicenter and origin time caused by random errors of arrival time of each station and station number, respectively, the calculations under the condition of different errors and station numbers have been completed. Besides, when a certain station has made an extremely large error, the change of accuracy of the network can be calculated. And the isorithm of errors of the determination of location and origin time under each condition can be drawn.