

地震的地电阻率统计概率预报^{*}

赵玉林 钱复业 王新华
明跃红 张洪魁 李卫平

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘要

自 1967 年开展地电阻率地震前兆探索以来, 积累了大量的震例和统计预报经验, 为了在过去经验的基础上给出概率预报方法, 首先根据统计得到的异常持续时间与震级之间的经验公式及其标准偏差, 给出所观测的地电阻率趋势异常估计某区在某时段内发生某种震级地震的概率方法, 并引出一次预报的自然寿命和多台出现异常可提高报警级别的概念; 然后根据异常检测范围与震级的统计公式, 给出一组地电阻率台网出现异常的情况, 圈划未来地震震中区域的新方法; 最后给出唐山、澜沧地震对地电统计概率预报(GSP)法的内符检验结果.

关键词 地电阻率; 概率预报; 震级; 发震时段; 自然寿命

一、前 言

自 1967 年在河间地震现场开展地电阻率地震前兆探索以来, 我国已积累了大量的前兆资料和统计预报经验, 对我们进一步研究实用的预报方法有了可能; 另一方面, 一旦拟定了实用的预报方法, 便可在今后一段时间内, 用固定统一的方法进行预报, 这反过来又可在预报实践中对地电阻率前兆的真实性, 乃至地电阻率方法本身进行较为客观的检验.

由于当前地电阻率方法像其它前兆手段一样, 尚未找到确定性前兆, 所以目前地电阻率预报地震只能应用概率方法, 即当监测到了某种地电阻率异常后, 人们将试图对某区在某段时间内发生某级地震的概率进行估计. 如何在过去经验的基础上给出概率预报方法, 过去研究得很少, 尤其是在地电学中, 这几乎还是空白. 而探索实用的地电阻率统计概率预报(GSP)方法正是本文的目的.

本文将先分析如何根据地电阻率异常持续时间与震级的经验规律, 给出某时段内发生预期地震的概率, 并进一步引出预报的自然寿命及利用多台提高报警级别的概念; 然后分析如何根据地电阻率异常最大检测范围与震级的经验规律, 给出预报震中区域的二条原则, 从而建立地电阻率统计概率(GSP)预报法; 最后以 1976 年唐山 7.8 级及 1988 年澜沧 7.2 级地震为例, 对 GSP 预报法做内符检验.

* 国家地震局地球物理研究所论著 92A0003.

1989 年 7 月 4 日收到本文初稿, 1991 年 3 月 24 日决定采用.

二、某时段内的发震概率及预报的自然寿命

钱复业等(1982)用统一的方法,系统地分析了自1967年我国开展地电阻率观测以来所积累的40多个震例,统计得到地电阻率异常持续时间 T 与震级 M 之间存在如下关系:

$$M = 0.5 + 2.5 \lg T \quad \text{或} \quad \lg T = -0.217 + 0.403 M \quad (1)$$

其结果如图1所示。从图中可明显看出,所孕育地震的震级愈大,地电阻率异常的持续时间愈长。

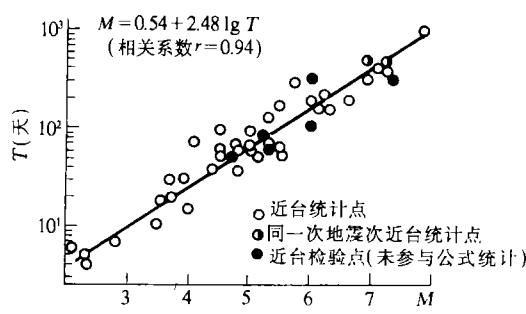


图1 近台地电阻率异常持续时间 T 与地震震级 M 之间的统计关系

$M < 4$ 时, $\Delta \leq 50$ km; $4 < M \leq 5$ 时, $\Delta \leq 100$ km; $5 < M \leq 7.9$, $\Delta \leq 150$ km

其中 ξ_1 和 ξ_2 分别为 $t_1 - t_0$ 、 $t_2 - t_0$ 的十进对数, ξ_0 是对给定预期地震震级 M 按(1)式算得的值, t_0 为异常的起始时间,计算时取 t_0 为1天。

对7级地震,按(2)式算得时间段 $\tau = t_2 - t_1$ 内发震的概率如图2所示。从图可以看出:

1. 对于7级地震,概率的极大值出现在地电阻率异常持续时间 t_1 为400天的附近,即对一个7级地震,在地电阻率出现在400天异常时发出预报,报准概率较高。

2. 当预报时段 τ 为1天时,其峰值概率甚小,仅为0.5%。即在出现持续时间为400天的异常企图报400-401天内,或401-402天内,发生7级地震的概率仅为0.5%。随预报时段的加长,发震概率上升。当预报时段 τ 为10天时,其峰值概率约为5%,当预报时段 τ 为100天时,其峰值概率约为40%。即当发现400天的地电阻率持续异常时,预报100天(约3个月)内发生预期地震

为求得 $t_1 - t_2$ 时间间隔内发生预期地震的概率,令 $\xi = \lg T$,对各震例分别有 $\xi_1 = \lg T_1$ 及 ξ_0, ξ_{01} 系按(1)式算得。从而求得 ξ_1 对统计曲线的标准偏差 σ 为0.192。假设 $\xi_1 - \xi_0$ 服从高斯分布,则 $t_1 - t_2$ 间隔内发生预期地震的概率(Rikitake, 1988)为:

$$P(t_1, t_2) = F(t_1, t_2) / [1 - F(t_0, t_1)] \quad (2)$$

其中

$$F(t_1, t_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \int_{\xi_1}^{\xi_2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} (\xi - \xi_0)^2} d\xi$$

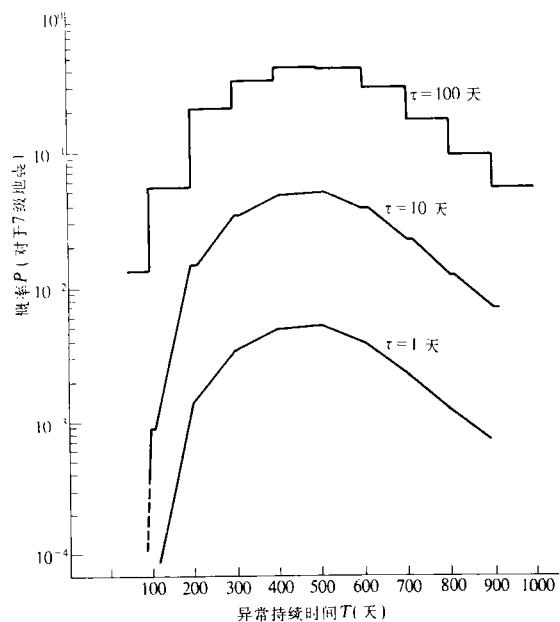


图2 指定时间段 τ 内,预期地震($M=7$)发生的概率分布

(预期地震 $M=7$) 的概率为 40%. 可见, 利用地电阻率趋势异常对发震时段做中-短期(3个月)估计时, 有一定的报准概率.

3. 峰值概率前后, 概率下降. 对 $M=7$ 而言, 峰值前 200 天以前, 峰值过后 400 天以后, 发震概率才较峰值低一个数量级, 即异常持续时间 τ , 从 200 天至 800 天其发震概率均在 10% 以上, 与峰值概率(40%)为同一个数量级. 因而对一次 7 级地震而言, 这个时间段实际上是预报的自然有效期, 或称预报的自然寿命. 尽管按人们对预报的要求做出中-短期(3个月)估计, 但按统计公式(1)的客观能力而言, 其预报的自然寿命是在峰值前后各约 1 年左右.

三、报警级别的提高及其影响因子

1. 前兆信度因子 α . 初看起来, 对 7 级地震预报时段 τ 为 100 天时, 其峰值概率可达 40%, 但由于许多尚未研究的干扰, 并非所有地电阻率异常变化都是地震前兆, 因此引入 1 个小于 1 的前兆信度因子 α , 发震概率 $P_i = \alpha P$. 如何估计 α 的值, 这是当前地电预报中需要研究的问题之一. Rikitake(1988)假定有 $1/5-1/20$ 的异常变化为前兆. 我们研究了全国 53 个地电台站近 20 年的观测结果, 排除各类干扰后, 出现 64 次持续变化 6 个月以上, 幅度超过三倍观测标准偏差的地电阻率异常变化. 其中有 35 次不与地震对应, 即 $\alpha=0.45$. 如按 Rikitake(1988)的假定, α 在 $1/5-1/20$ 间选取, 当预报时段 τ 为 100 天时, 对 7 级地震峰值概率 P_i 的量级为 0.01-0.1.

2. 多台异常与报警级别的提高. 对一个地震几个台同时出现前兆, 其各自概率为 P_i 时的合成概率(Rikitake, 1988)为:

$$P_{\text{合}} = \frac{1}{1 + \frac{\prod_{i=1}^n (1/P_i - 1)}{(1/P_0 - 1)^{n-1}}} \quad (3)$$

其中 P_0 可按研究区地震活动性估计, 如某区每一百年发生一次 7 级地震时, 100 天内发生预期地震($M=7$)的自然概率 $P_0=0.00274$. 当 P_i 在 0.01 和 0.1 范围内时, 按(3)式算得几个台对同一地震出现异常的合成概率 $P_{\text{合}}$ 随台站数 n 的变化范围如表 1 所示. 从表中可见, 对同一地震随着出现前兆的台数增多, 其合成概率上升得相当快. 单台概率为 1% 的异常同时在 3 个台出现时, 其合成概率上升一个量级, 而同时在 7 个台出现时, $P_{\text{合}}$ 高达 0.96; 单台概率为 10% 的异常, 只要在 2 个台同时出现时, 其合成概率也上升近一个数量级. 因此, 对同一地震有 2-3 个台记录到电阻率同步变化, 则可提高报警级别.

表 1 多台合成概率

$P_i \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7
0.01	0.01	0.033	0.12	0.33	0.65	0.706	0.96
0.1	0.1	0.82	0.99				

需指出的是, 公式(3)仅对各自独立的前兆 P_i 才适用. 在不同地点的地电台, 台址及观测系统彼此是独立的, 因此一般说来, 多台的异常是彼此各自独立的前兆, 可应用公式

(3). 但如果已判明各台站间彼此有并非独立的干扰, 例如, 当各台探测深度不够深时, 有可能受到大面积干旱等条件的干扰, 此时则不可使用公式(3)计算合成概率. 因此, 每个台均应有足够的探测深度, 以确保能把气象、地下水等表层干扰压低到观测误差以内. 这样, 多台对同一地震出现同步异常时, 才可使用公式(3)提高合成概率.

3. 台网密度因子 β . 考虑到台网密度及地震影响范围内不一定所有台都出现异常的情况, 需引入台网密度因子 β . 由于对同一地震有3个台同时记录到异常, 已可使合成概率提高一个数量级, 故可认为, 对同一地震影响范围内有3个台时, 台网密度为适中. 因此, 地震影响范围内台站总数 $n \geq 3$ 时, $\beta = m/n$; 而当 $n < 3$ 时, $\beta = m/3$, 其中 m 为有异常的台数. 总的合成概率 $P_{\text{总}} = \beta P_{\text{合}}$.

四、预报震中区域的二条原则

钱复业等(1982)把出现异常台的震中距和震级点在半对数纸上时, 发现绝大部分点落于直线 aa' 的一侧(图3a), 即地电阻率台对地震的前兆有一最大检测范围(图中有的强震震例近震中处无点, 主要是因为具体震例中近震中无台所致. 对于个别震例的确出现近震中台未记录到异常, 而较远台却观测到异常的现象, 王新华等(1984)用盲区、盲角加以解释). 对每个震级只取记录到异常台的最大震中距 Δ_m 统计, 直线拟合有:

$$\lg \Delta_m = 0.393 + 0.294M \quad (4)$$

多项式拟合有:

$$\lg \Delta_m = 1.58 - 0.542M + 0.172M^2 - 0.0112M^3 \quad (4')$$

其结果如图3b所示.

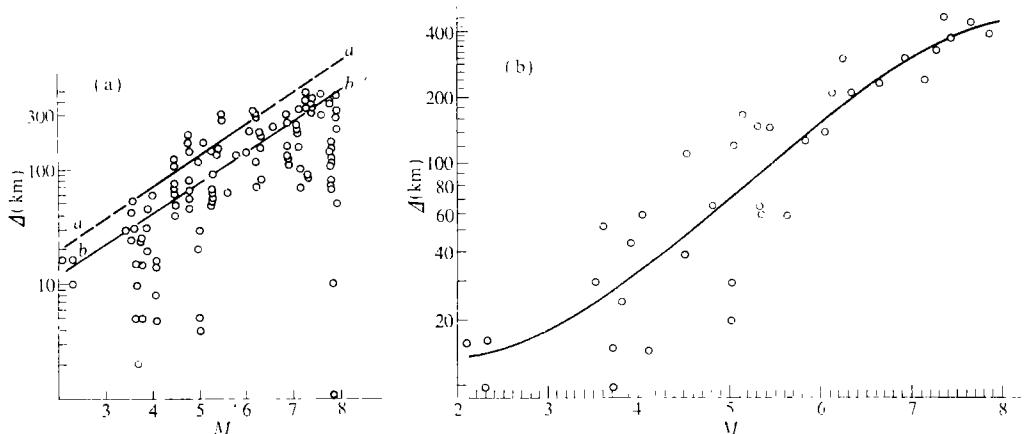


图3 不同震级地震出现地电阻率异常范围的统计结果(a)和最大控制范围多项式拟合曲线(b)

当一观测点观测到地电阻率异常时, 对预期地震(指定 M)便可按(4)式算得 Δ_m . 由于此观测点距未来地震的距离 Δ 满足下式:

$$\Delta < \Delta_m$$

则预报震中的第一条原则是: 预期地震的震中必落在以异常台为中心, 以 Δ_m 为半径的圆内(由于 $\Delta < \Delta_m$, 按 Δ_m 画圆, 震中可在圆内任何一点, 只有当 $\Delta = \Delta_m$ 的特殊情况, 未来震中才落在圆周附近). 预报震中的第二条原则是: 在一组台网中大部分台出现异常, 若同时有一台无异常时¹⁾, 则预期地震应不落在以此无异常台为圆心, 以 $\Delta_m - \sigma$ 为半径的圆内. 其中 σ 是统计曲线(4)式的标准偏差. 考虑到用第二条原则缩小第一条原则所圈划的区域, 要求第二条原则的权(概率)较高, 故排除圆半径不取 Δ_m , 而取 $\Delta_m - \sigma$. 当在同一地区有多个台记录到同一预期地震的异常时, 则预期地震的震中应落在以有异常台为圆心的诸圆的公共区域内, 尚可使用第二条原则, 以无异常台为圆心划排除圆, 缩小有异常诸圆的公共区域(未来震中区).

如果 M 初估太大, 则诸圆的公共区域很大; 若 M 初估太小或异常判断错误, 把不属于同一预期地震的异常, 误认为同一预期地震, 则诸圆彼此不相交, 无公共区域.

对同一预期地震有异常的诸台, 所对应的诸圆彼此不相交时, 可逐步提高初估震级(加大 Δ_m), 使诸圆相交的公共区域为最小, 这时等于假定有异常的诸台, 均位于未来地震的最大检测距离上, 故可按(4)式估算未来地震的震级下限. 此时需注意的是, 如误把本不属于同一地震的诸台异常, 当做一个预期地震, 并使用此原则来估计未来地震的下限, 则有可能导致虚报强震的危险.

如果台网够密, 能圈定异常范围时, 取异常范围边界上多点(此时各点距未来地震的距离恰等于 Δ_m)画圆, 选择其半径使诸圆的公共面积最小. 此时, 不仅可确定预期地震的震中, 而且根据(4)式尚可同时确定未来地震的震级.

五、唐山与澜沧地震的内符检验

1. 唐山地震 1976年7月28日唐山7.8级强震前, 在距震中150 km范围内, 有11个地电阻率台开展观测, 其中最早的始于1968年. 钱复业等(1982)对11个台的资料整理分析, 其中6个台的资料有更高的可靠性和连续性. 图4给出这6个台地电阻率(ρ_e)月均值逐月变化曲线. 从图可见, 除马坊台外, 其余5个台均于震前2-3年(1973-1976)出现趋势性下降异常, 至1976年初, 宝坻台已出现转折. 根据从异常开始至1976年初异常转折的时间及(1)式, 算得预期地震的震级为6.9-7.6. 预期地震的 M 可定为7.

使用公式(2)及(3), α 取 $1/5-1/20$, 算得5个台100天预报时段的峰值概率为 $0.65-0.99$. 在震中220 km范围内有14个地电台, 其中9个台震前2-3年内记录到地电阻率下降异常(赵玉林等, 1978), 因此 β 取 $9/14$, 得合成概率为 $0.42-0.64$. 如在1976年初异常出现转折时发预报: 100天内发生7级地震的概率为 $0.42-0.64$. 显然第1个100天(1976年1月1日-1976年4月10日)将虚报; 再延长预报100天(4月11日至7月20日), 依然虚报(距实发地震日7月28日仍差7天). 尽管按7级地震预报的自然寿命并未虚报, 因为从1976年初至7月28日唐山地震发生的7个月时间, 小于7级地震预报的自然寿命.

9个有异常的地电台围绕震中形成一个半长轴达150 km的地电阻率下降异常区(赵

1) 应注意与盲区无异常台的区别.

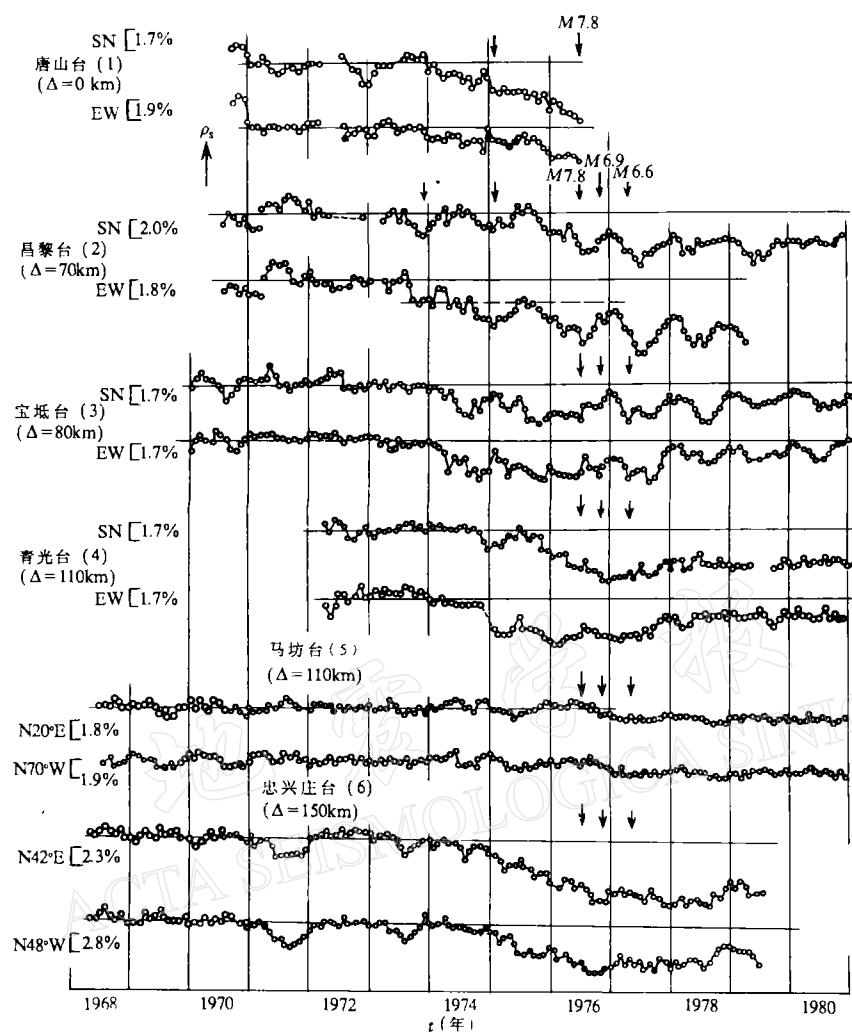


图4 唐山地震前后(1968—1981)震中周围6个台地电阻率月均值曲线

玉林等, 1978). 取靠近异常边界的三个有异常的台: 昌黎、忠心庄和徐庄子为中心画图, 使其三圆相交的公共部分最小, 可求得圆半径为 120 km. 三圆公共部分的中心座标为: 39.6°N, 117.8°E(图 5). 这与唐山 7.8 级地震的震中 39.4°N, 118.0°E 甚为接近. 用 120 km 圆半径代入(4)式可预估震级下限, 可得有大于 6 级地震的危险. 这与根据异常时间及(1)式预估的震级虽不矛盾, 但震级显得偏低, 这主要是因为三个台均是有异常的台, 并非是异常边界上的台, 其震中距小于 Δ_m 所致.

2. 澜沧地震 1988 年 11 月 6 日云南省澜沧西北发生 7.6 级地震, 同日夜又在其附近发生 7.2 级地震. 在距震中 300 km 范围内有腾冲、通海、楚雄 3 个地台. 其中, 腾冲台东西道 1986 年下半年维修改造后, 从 1987 年初起地电阻率呈现持续下降趋势, 到 1988 年 9 月曲线转折时, 异常已持续 600 天, 按(1)式预估震级为 7.4 级, 取预期地震 $M = 7$. 通海台南北向地电阻率也有持续时间 600 天的异常(汪志亮等, 1989). 而在此期间, 楚雄台地电阻率基本无异常变化. 按本文一节分析, 2 个台有异常, 预报时段为 100 天时, 峰值概率为 0.03—0.82. 当 β 取 2/3 时, 合成概率为 0.02—0.55. 如从 1988 年 9 月 15 日腾冲台地电

阻率曲线转回升时发出预报, 在预报时段 100 天内, 发生了 11 月 6 日澜沧 7.6 级地震。

图 6 给出从有异常的腾冲台与通海台为圆心, 300 km (7 级地震的 Δ_m) 为半径画的圆, 两圆(细线)的公共区域甚大。当加上以无异常的楚雄台为中心, 以 $\Delta_m - 50 \text{ km} = 250 \text{ km}$ 为半径画的排除圆(粗线)时, 则检验预报震中(23°N, 100.2°E) 与实发震中(22.8°N, 100.1°E) 甚为接近。

五、讨 论

1. 震级的初估。从异常开始至异常转折求出异常持续时间后, 按统计公式(1)初估预期地震震级, 对华北的唐山地震及西南的澜沧地震都取得较好效果。值得指出的是, 澜沧地震的资料并未参加(1), (4)式的统计, 属外延检验。

2. (4)式是为预报震中使用的, 如若使用该式预估震级时, 要注意式中的 Δ_m 应为异常最大范围的震中距。选择不当预估震级是不准的, 比如唐山 7.8 级地震, 如选预报震中的最小交切圆半径 120 km 做为 Δ_m 代入(4)式时, 则所得预报震级只有 6 级, 比实发 7.8 级明显偏低。显然, 这是由于 120 km 并不是异常的最大范围所致。

对澜沧地震, Δ_m 取 300 km 时, 按

(4)式算得 $M = 7$, 与按(1)式预估结果及实发 7.6 级均吻合。因此, 只有在判明 Δ_m 的条件下方可使用(4)式预估震级。

3. 中期预报指标。如果同时用(1)式既预估震级, 又预估发震时段, 势必形成随异常的发展, 预估震级升高, 发震时段推后的局面。因此, 在不能使用其它资料给出预期地震的震级时, 应使用异常转折等中期预报指标。

4. 虚报或漏报。使用概率预报本身, 就等于明确表示, 即使在预报时段内发生预期地震的概率再高, 也可能不发生预期地震。特别是当预估地震震级偏低时, 更容易虚报; 当预估震级偏高时, 等峰值概率时段发出预报, 又可能造成漏报。由于影响概率因子 α, β 的不确定性(事实上反映着地电预报方法本身的不确定性), 更是造成虚报和漏报的原因。因此, 为减少虚报和漏报, 探索新的有物理依据的短临预报指标, 是地电法面临的迫切课题。

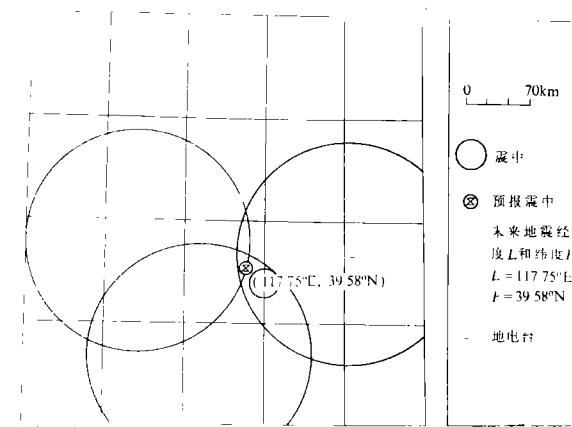


图 5 1976 年唐山 7.8 级地震实发震中及震后用 GSP 法检验预报的震中对比图

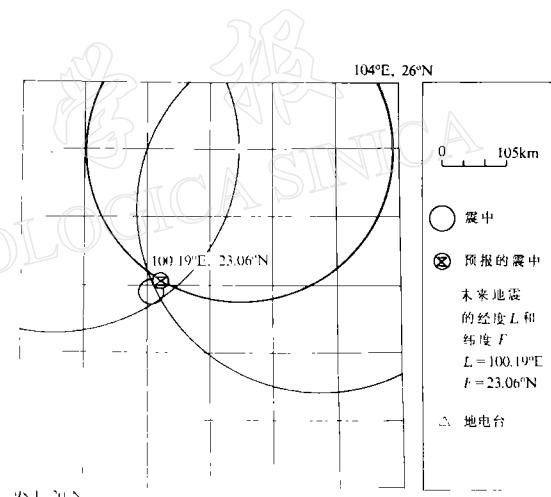


图 6 1988 年澜沧 7.6 级地震实发震中与 GSP 法检验预报震中对比图

参 考 文 献

- 钱复业、赵玉林、于谋明、王志贤、刘小伟、常思敏, 1982. 地震前地电阻率的异常变化. 中国科学 (B辑), 9: 831-839.
- 王新华、祁贵仲、赵玉林, 1984. 断层失稳前的扩展及电阻率前兆. 中国科学 (B辑), 11: 1026-1038.
- 汪志亮、余素荣, 1989. 澜沧-耿马 7.6 级地震腾冲等台地电阻率特征. 地震, 2: 42-47.
- 赵玉林、钱复业, 1978. 唐山 7.8 级强震前震中周围形变电阻率的下降异常. 地球物理学报, 21, 181-190.
- Rikitake, T., 1988. Earthquake prediction: an empirical approach. *Tectonophysics*, 148, 195-210.