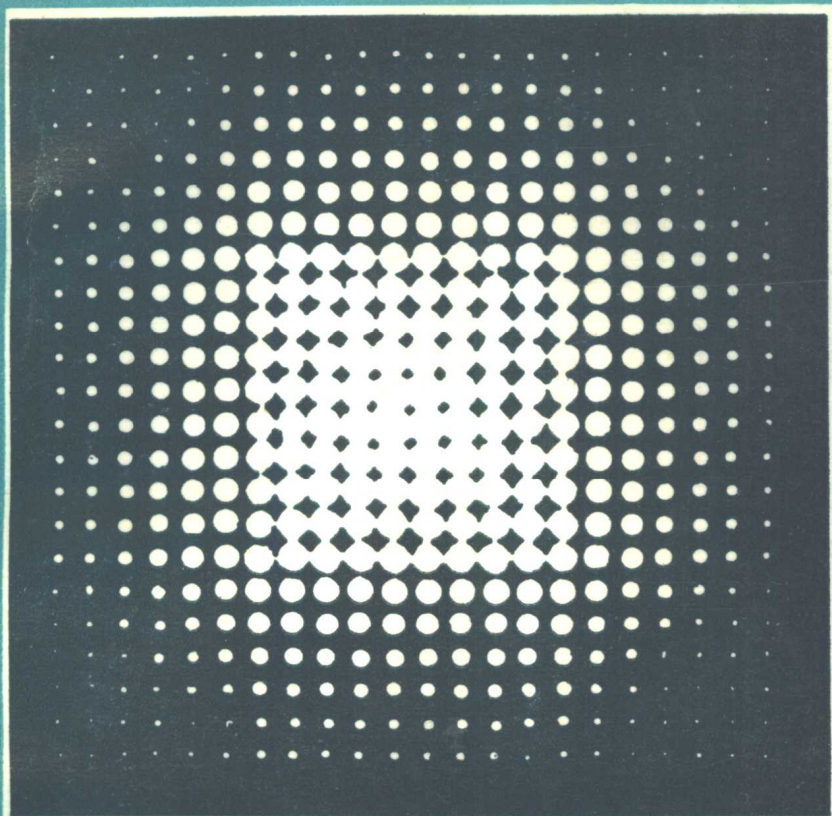




地震形变前兆特征的 识别与研究

国家地震局科技监测司 编

地震出版社



地震形变前兆特征的 识别与研究

国家地震局科技监测司 编

主 编 吴翼麟

副主编 李孟聪 徐京华

地 震 出 版 社

1994

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

本文集作者在地形变学科实用化攻关的基础上,应用我国第二代地壳形变最新资料,进行多种新方法的分析。文集充分反映了我国当前地震形变前兆研究领域中的一批前沿性研究成果。

文集完全显示了该学科研究的完整性与系统性。无论是方法上的矢量稳定性、频谱特性、综合判识、追踪分析、残差矢量以及模式识别等,还是中强震的典型图像异常特征或调和分析的研究成果,均展示了当代的先进理论和方法。这是一本理论、方法、技术和实用并重的参考书。

尽管这是一本论文集,但编者别具匠心地将此书奉献给地震科技工作者,愿更多读者同享其益。

地震形变前兆特征的识别与研究

国家地震局科技监测司 编

主 编 吴翼麟

副主编 李孟聪 徐京华

责任编辑:吴 冰

责任校对:李 珏 庞娅萍

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 12.25 印张 314 千字

1994年6月第一版 1994年6月第一次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-5028-0999-6/P·617

(1390) 定价: 15.00 元

序

过去十年,地壳形变连续观测技术的改进使其对短期内地壳活动状态的监测成为可能。研究和发现可能的地震形变前兆过程以及预报地震的可行性,引起了国际地震界的浓厚兴趣。

当前地壳研究中的基本问题仍然是它的变形过程、变形机理及其力源。地壳变形可以有两种根本不同的方式,即连续变形与不连续变形。在连续变形的理论中,已有几个分支获得非常深入的发展,弹性理论和粘性流体动力学都达到了很细致的程度,但是,由于地壳介质的不均匀性,实际上很难套用其中任一种理论。尽管连续位移理论中的塑性理论,与地壳中观测的位移有某种相似关系,但由于塑性理论主要描述金属冷却过程的行径,因此这类理论对地壳研究的应用不可能得出满意的结论。由于地壳中有许多破裂、裂隙、断裂等的现象存在,研究不连续位移(或倾斜)是极为重要的。虽然已有相当多的关于断裂的经验判别法则,但对整个断裂的认识还是不完整的,如何描述断层面的扩展这样一类问题,目前,尚未得到解决。在这种条件下去研究与识别地震形变前兆的特征,无疑是非常困惑的科学前沿难题。

但是,这本论文集的作者们,在实用化攻关的基础上,应用我国第二代地壳形变的最新资料,提出了形变信息提取与前兆特征的识别方法、震例中的前兆特征规律以及中强震的预报效果检验等成果。文集充分反映了我国当前在地震形变前兆研究领域中的一批前沿性的研究成果。

对地震形变前兆特征识别的研究当前已形成成为独立的学科,文集所收论文完全显示了该学科的完整性与系统性。无论是方法上的矢量稳定性、频谱特性、综合判识、追踪分析、残差矢量以及模式识别,等等,还是近年来中强震震例中的典型图像的信息特征或调和分析的研究成果,均展示了当代的先进理论和先进方法。这是一本理论、方法、技术和实用并重的参考书,既有科学性,又有实用性。文集的出版,无疑对正在发展中的我国地震形变前兆的研究,以及促进地震预报的进一步发展,有着重要的现实指导作用。

尽管这是一本论文集,但是编者别具匠心将此书奉献给同行,无疑值得称颂。愿更多读者同享其益。

陈鑫连

1993.9.16

前 言

1991年6月在北京召开了形变前兆特征与震例研讨会。全国各地代表投寄论文56篇,经会议交流和讨论,选取其中34篇汇集出版。这些论文内容涉及四个方面:

1. 形变前兆特征的识别方法;
2. 近年来我国发生的中强地震的预报实践及效果检验;
3. 震例的积累及前兆特征规律的研究;
4. 形变前兆信息的探索 and 发现。

论文作者除来自科研、分析预报领域外,还有监测预报第一线的台站观测人员,许多青年同志也在会上作了很好的报告。这些都赋予会议清新与务实的气息,特别是对近年来几次主要地震(如澜沧-耿马、巴塘、景泰、大同-阳高等)成功的预测,尤其是中短期预报,充分体现了形变学科实用化攻关的进展和实效。很多论文中还讨论了短临预报的艰辛和困难,表达了形变学科对短临预报理论的综合研究方法的热望。同时充分说明国家地震局八五规划提出短临预报攻关思想的正确和及时。

本集论文由李孟聪、刘序俨、李平、李旭东同志初审,吴翼麟和徐京华同志最后审定,并得到李宜璐、修济刚同志的帮助,在此一并感谢。

1993年4月21日

目 录

形变前兆异常的追踪分析	吴翼麟 (1)
地倾斜矢量稳定性的研究	牛安福 吴翼麟 (8)
潮汐应变观测中前兆性特征频谱的 提取及分析	蒋 骏 张雁滨 周翠屏 (14)
模式识别法在定点形变资料分析中的应用	李正媛 (20)
少震区形变前兆的综合判识	丁丽青 鄧 晓 (27)
洞体应变残差矢量在地震过程中 的变化	张雁滨 蒋 骏 周翠屏 (34)
井下体应变视潮汐因子及其与地震关系的 初步探讨	杨林章 何世海 姜 能 (37)
天马形变试验场地壳应变特征	刘序伊 陈兆煌 (43)
乌什台形变(应变)前兆异常研究	杨志荣 (52)
两次强震前地倾斜异常及地震预报	韩月鹏 吴秀莲 顾 军 (60)
大同-阳高两次地震前定点形变异常特征对比	杨炳顺 (66)
1991 年 3 月 26 日大同-阳高 5.8 级地震的 地壳形变异常	王川华 陈绍绪 (70)
大同-阳高地震形变前兆演变过程	车兆宏 刘天海 尹荣珍 (75)
大同-阳高地震前易县台地壳形变异常	阳为孝 高荣胜 (81)
澜沧、耿马地震前的定点形变异常特征	何翔 刘以齐 (85)
1989 年巴塘 6.7 级地震群的预报	王元海 (92)
巴塘 6.7 级地震前攀矿台的地倾斜异常	郑开碧 (98)
鲜水河断裂带上一次明显的地震前兆异常及其预报	黄 芃 (101)
提高形变台网素质 研究现场形变震例	陈德福 (105)
中强地震前倾斜潮汐相位滞后变化特征	李旭东 (114)
单项前兆信息的层次合成	卢良玉 徐心同 马秉圭 (120)
正确分析同震阶变异常	李兰生 刘建华 (127)
小震前倾斜固体潮汐因子 γ 变化的探讨	夏克明 (132)
地倾斜异常中一项新的地震预报指标	何 翔 (134)
倾斜固体潮调和分析——确认形变前兆的可靠途径	段华琛 (141)

形变信息特征及研究方向的探索	赵 城 施顺英 曹新菊	(147)
内蒙古定点形变前兆异常的研究	黄根喜	(152)
宁夏及其邻区三次中强地震的形变前兆异常	马禾青	(155)
甘肃景泰 6.2 级地震前兰州		
形变异常	唐九安 杨嘉文 周志宇等	(158)
景泰 6.2 级地震兰州台形变前兆异常特征	刘光远	(163)
由徐州台的形变观测谈形变前兆异常	刘建华 李兰生	(166)
海城 7.3 级地震地倾斜异常的再分析	罗荣祥	(171)
广西北部湾 5.0 级地震的地倾斜前兆特征	覃中显	(179)
大同-阳高地震定点形变异常的初步研究	李孟聪 吴邦素	(183)

形变前兆异常的追踪分析

吴 翼 麟

(国家地震局地震研究所)

摘 要

利用广布全国的定点形变监测台网,以形变速率、方向、岩石物性变化等指标,判别单台及多台地震前兆异常。

文中对近期发生的几次重要地震进行追踪分析,发现多台异常信度 C 值临近地震前在一定范围内急剧增高并持续高位,地震即发生在这一范围内,其尺度与未来地震的震级相应,在台站稀疏地区,无法进行 C 值计算时,单台信度 B 值的急速增高亦可预示地震的临近。

一、基 本 情 况

在国家地震局统一领导下,全国各省均建有形变连续观测台站,其中一部分是国家基本台(42个),另一部分是地方区域台(约100个),还有少量的企业台(十多个),从而在全国大部分地区(除西藏、新疆南部、青海西部、甘肃北部)形成了有效的监测台网(图1)。当前这一台网主要装备水平摆倾斜仪、水管倾斜仪,进行地倾斜连续观测。经过前一段的系统清理和技术整顿,这些台站都能可靠和不间断地输出地倾斜整点观测值,每年提供的数据约4亿组。

由系统清理总结,按现有台站的实际观测精度,监测地震的能力半径 D_j 可用下式估算:

$$\lg D_j = 0.303 (M_s + 1.6)$$

$$\text{例如 } M_s = 5, D_j \approx 100\text{km};$$

$$M_s = 6, D_j \approx 200\text{km};$$

$$M_s = 7, D_j \approx 400\text{km}。$$

据此,我国形变台网当前的布局,基本可以满足东部监测5级,西部监测6级地震的要求。当然,西藏等无形变台站地区,成为无监测能力的空白区。在图1上,以晕线标出地震形变前兆监测的空白区。

当前,全国形变台网尚未实现观测数据的实时传输,多数采用月报方式。若干省局范围内,实现了无线电台报数,每日一次。因此,就全国范围而言,进行中期预报(半年及年度全国震情预测)是现实的;在某些已实现日报的省局,可进行中、短、临预报。此外,单台的分析亦可对短临异常作出判断。

经1983—1985年的系统清理和技术整顿,通过验收且正式报数的定点形变基本台,观测资料的缺记率一般小于1%,全年资料的可利用率达95%以上;区域台的缺记率一般小于3%,资料的可利用率达90%以上,保证了进行追踪分析的可能。

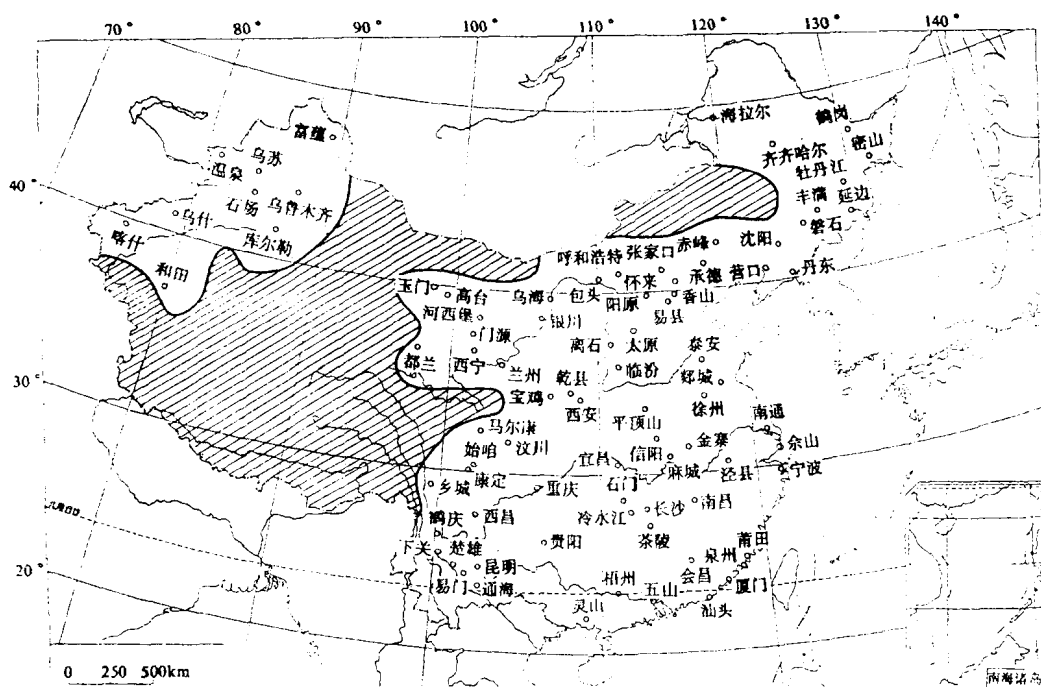


图1 中国地形变台站的地理分布

二、追踪分析方法

首先使用 40 个基本台 3 年的资料，对几种常用方法识别监测能力范围内形变异常的成功率进行了统计。成功率 η 的定义为：

$$\eta = \frac{\text{异常对应地震数 } (N_1)}{N_1 + \text{有异常而无地震数 } (N_2) + \text{无异常而有地震数 } (N_3)}$$

监测能力范围（半径） D_j 按下式考虑：

$$\lg D_j = 0.303 (M_s + 1.6)$$

统计时，按 D_j 判定该台站 3 年内共应监测到的地震，再以每种方法识别 3 年内出现的异常次数；然后以上式计算 η 值。取全国 40（或 30）个台站的 η 值平均数，作为该方法的成功率。显然，在这里有可能忽略了地区的特殊性，因此允许各省局根据本地区的台站进行 η 值的统计，但应注意统计样本数不能少于 10，统计出的 η 值与全国所得 η 值可取中数使用。

利用全国台站对各种识别形变异常方法成功率 η 的统计见表 1。

由表 1 看出，每一个单一方法识别形变异常的成功率并不很高，因此使用信息合成，提高单台识别异常的信度。

信息合成采用下述步骤：

表 1 利用全国台站资料统计的 η 值

识别方法	使用资料	适用阶段	η 值
形变速率			
1.以单分量图形识别	日均值、五日均值	中、短、临	30%
2.以差分法识别	日均值、五日均值	中、短、临	25%
3.以契氏法识别	日均值、五日均值	中、短	30%
4.以卡氏法识别	日均值、五日均值	中、短	30%
形变方向			
1.以矢量图形态识别	日均值、五日均值	中、短、临	30%
2.以最大相关系数识别	日均值、五日均值	中、短、临	25%
3.以差分矢量识别	日均值、五日均值	中、短、临	25%
物性变化			
1.以倾斜固体潮 γ 因子识别	整点值	中、短	39%

1) 根据该台的观测资料, 用各种识别方法, 判断其在某一时刻是否存在异常;
 2) 根据存在异常的几种方法, 以其各自的成功率 η_i 为信度, 合成单台异常信度 B , 方法如下:

- ① 列出几种判断异常的方法, 信度分别取 η_i ;
- ② 求其否定异常之信度 $\zeta_i = 1 - \eta_i$;
- ③ 求各 ζ 之交: $A = \prod \zeta_i$ ($\prod$ 为连乘号);
- ④ 求该台存在异常的信度: $B = 1 - A$ 。

例: 1989 年 8 月阳原台形变异常信度的确定 (表 2)。以 $B > 0.5$ 为阈值, 表 2 中 $B = 0.7$, 因此可认为: 1989 年 8 月阳原台出现形变异常。

表 2 阳原台形变异常信度

识别异常的方法	η_i	ζ_i	$A = \prod \zeta_i$	$B = 1 - A$
单分量图形态异常	0.30	0.70	0.30	0.70
γ 值异常	0.39	0.61		
契氏法异常	0.30	0.70		

若某一地区几个台站的异常被确认, 则可进一步确定该区多台异常的信度。此时, 可以某 B 值较大的台站为中心, 取距离 D_j , 将离中心台距离 R_j 小于 D_j 的各个台站检出。按各单台求取 B_i , 取 $B_i > 0.5$ 的台站 ($B_i < 0.5$ 则认为不能确认为有异常, 取为 0), 并据 $P_i = \frac{D_j - R_i}{D_j}$ 定权, 然后求出以该台为中心, D_j 半径内多台异常的信度 C ,

$$C = \frac{\sqrt{2} \sum_{i=1}^n B_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

若 $C > 0.5$, 确认该范围内多台异常成立。显然, 我们还可规定 $C = 0.5$, 反求 D_j , 以此确定异常范围。式中 $\sqrt{2}$ 的选取是保证该范围内多于半数的台站有异常时, 能判定该范围内多台异常信度 $C > 0.5$ 。

例如, 滇西北的永胜、丽江等台出现形变异常, 求离永胜台 $D_j = 200\text{km}$ 时, 多台异

常信度 C 。

首先检索 200km 内的形变台站, 为 5 个。确定各形变台站的单台信度, 然后计算 C 值 (表 3)。 $C > 0.5$, 确认永胜台 200km 范围内多台异常。

表 3 计算多台异常信度

序号	台名	B_i	R_i	D_i	P_i	$B_i P_i$	$\sqrt{2} \sum B_i P_i$	$\sum P_i$	C
1	永胜	0.6	0	200	1	0.60	1.58	2.45	0.6
2	丽江	0.5	70		0.65	0.32			
3	洱源	0.5	120		0.4	0.20			
4	团山	0	180		0.10	0			
5	渡口	0	140		0.30	0			

为确定多台异常信度, 编有计算机程序, 利用地震及台站资料库, 在选定初始 D_j 后, 可设步长 a (例如 20km) 进行搜索计算, 直到 $C < 0.5$ 时停止。按表 3, 计算 $C = 0.6$ 之后, 又以步长 $a = 20\text{km}$, 对 $D_j + a$; $D_j + 2a$; $D_j + 3a$; $D_j + 4a$; $D_j + 5a$ 等进行计算, 直至 $C < 0.5$ 时停止。

当确认在某一范围内多台异常成立, 则可进一步判定地震三要素。判定如下内容:

1) 发震时间。主要应用异常的有序性。时间上表现为形变速率、方向及岩石物性异常的同步出现; 空间上表现为孕震区范围内多数台站陆续出现异常; 定量计算时表现为多台信度 C 值在某一范围内的急速增大。

2) 发震地点。仅有单台异常, 且附近台站无异常时, 地震的地点只能定在有异常的台站附近, 矢量图上异常转折点后的趋势性方向, 多数指向或背向震中, 若该处又有发震背景, 可定为未来震中。

多台异常时, 根据 C 值的计算, 寻求 C 最大值时的中心台, 地震可能在此台站附近发生。若需进一步判定地点, 可以 C 值最大、次大及第三的三个台站, 将未来震中定在加权的重心。震中坐标可由待定系数法唯一地确定:

例: 若 C 值最大台坐标为 $X_1 Y_1$, 次大台坐标 $X_2 Y_2$, 第三大的台坐标 $X_3 Y_3$ 。按其 C 值得权半径 $R_1 = \frac{A}{C_1}$, $R_2 = \frac{A}{C_2}$, $R_3 = \frac{A}{C_3}$ 。其震中坐标 X_0, Y_0 的计算由方程组得出:

$$R_1 = \frac{A}{C_1} = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2};$$

$$R_2 = \frac{A}{C_2} = \sqrt{(X_2 - X_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2};$$

$$R_3 = \frac{A}{C_3} = \sqrt{(X_3 - X_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2};$$

方程组中 A 、 X_0 及 Y_0 为未知数, 可以唯一地确定。

3) 震级。只有单台异常时, 若周围 100km 范围内的其他台站均无异常, 则震级一般不大, 可定为 5 级以下。若周围台站稀疏, 周围无其他台站呼应, 则可将发震地点定在附近构造部位或地震多发地, 然后以离发震地点的距离, 粗略估计震级。

多台异常时, 选择 D_j 计算 C 值, 使 $C > 0.5$, 该 D_j 即为所选中心台站的异常半径。

可能有几种选择 D_j 和中心台站的方案, 则一并算出后作比较, 并按:

$$M_s = 3.3 \lg D_j - 1.6$$

估计震级。当有几个台站异常, 但因台站稀疏, 无法判明多台异常的范围时, 可用

$$M = 2.6 \lg D - 0.7$$

估计震级。式中 D 为同源异常的两个台站间的最大台距。

三、追踪分析实例

1. 1988 年 11 月 6 日澜沧-耿马地震

表 4 列出澜沧-耿马 7.6 级地震前形变台站的异常情况。

表 4 澜沧-耿马 7.6 级地震前形变台站异常

台站名	震中距 (km)	方 位	异常表现形式及出现时间
保 山	210	NW	① 6 月底起单分量图上速率异常 ② 9 月中起矢量图方向异常 ③ 6 月底起差分异常
楚 雄	270	NE	① 5 月份起单分量图上速率异常 ② 5 月份起矢量图方向异常 ③ 7 月份起差分异常
易 门	270	NE	① 5 月份起单分量图上速率异常 ② 5 月份起矢量图方向异常 ③ 5 月份起 γ 值异常
弥 渡	280	N	① 7 月份起单分量图上速率异常 ② 7 月份起矢量图方向异常
下 关	280	N	① 7 月份起单分量图上速率异常 ② 7 月底起矢量图方向异常
个 旧	310	E	① 7 月份起 γ 值异常 ② 7 月份起矢量图方向异常
通 海	310	NEE	① 8 月份起矢量图方向异常

分别取 $D_j = 300$ 、400km, 计算 1988 年 5—9 月的多台异常信度 C 值 (表 5)。图 2 示出 C 值在可结合 D_j 两个范围内的时值曲线。

表 5 1988 年 5—9 月不同 D_j 的 C 值

C 值 D_j (km) \ 时间	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
300	0.45	0.74	0.89	0.89	0.92
400	0.27	0.38	0.66	0.66	0.71

由上述 C 值的变化, 可以看出澜沧-耿马地震孕育区的形变异常有向外扩展的现象, 且随时间的进程, 选定范围内的 C 值达到阈值, 并有一突然增大的转折点, 表明未来地震的临近。由 C 值分析, 震前 5 个月 (1988 年 6 月) 300km 范围内多台异常成立, 震前 4 个月 400km 范围内多台异常成立, 此时应预测将有 $M_s > 6.5$ 地震要发生。但即使事后

总结, 要计算出 $M_S=7.6$ 地震, 是不可能的, 因为震中的西部没有形变台站。

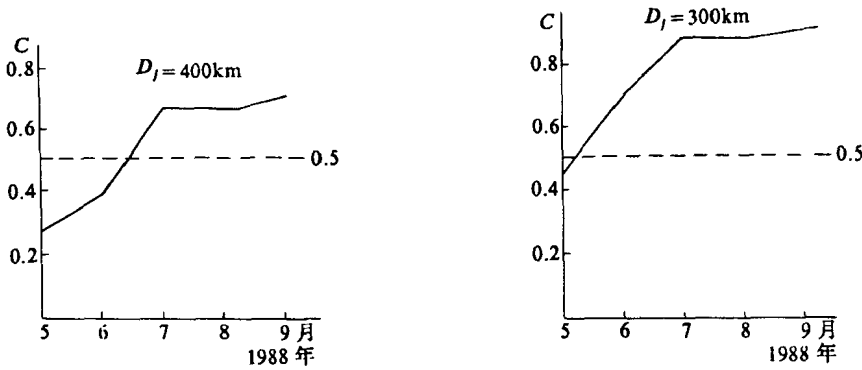


图 2 澜沧-耿马地震前 C 值的时值曲线

2. 1989 年 10 月 19 日大同-阳高地震

该次地震前周围形变台站可识别的异常见表 6。根据 $D_j=200\text{km}$ 及 300km , 所计算 C 值的时程曲线见图 3。

表 6 大同-阳高 6.1 级地震前形变台站异常

台站名	震中距 (km)	方 位	异常表现形式及出现时间
阳 原	60	SEE	① 1988 年 12 月起单分量图上速率异常 ② 1988 年 12 月起 γ 异常
张家口	110	NE	无异常
怀 来	160	E	① 1989 年元月起单分量图上速率异常 ② 1988 年 12 月起 γ 异常
易 县	180	SE	① 1989 年 6 月起单分量图上速率异常 ② 1988 年 5 月起 γ 异常
西拨子	200	SEE	① 1989 年 6 月起单分量图上速率异常 ② 1988 年 5 月起 γ 异常
香 山	210	SEE	无异常
呼和浩特	210	NWW	无异常
太 原	300	SSW	1989 年 8 月起 γ 异常
蔚 县	300	E	无异常
承 德	370	NEE	无异常

由图 3 可见, 200km 范围内多台形变异常直到 1989 年 8 月 (地震前两个月) 才能确认, 而 300km 内的多台异常不能成立。因而震级的预测只能判定为 6。

近震中的阳原台, γ 值异常出现在 1988 年 10 月底, 持续 11 个月, 恢复至正常后发震, 这是一个较为完整的 γ 值异常震例, 且有单分量图上速率异常的配套。

一个 6 级地震, 200km 范围内多台异常仅在地震前两个月才得以确认。由此可见, 台站数据的及时传递十分重要, 而及时判断异常当然更为重要。

我国西部台站稀疏的地区, 多台异常 C 值有时无法计算, 此时只能根据单台异常 B 值来判断地震的临近。按本文方法计算的 B 值急速超出阈值并持续停留在高值时, 或许

说明地震即将来临。

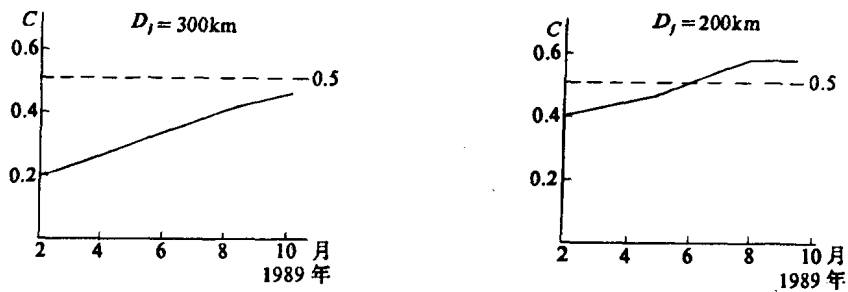


图3 大同-阳高地震 C 值曲线

例如对于1990年4月的青海共和地震，兰州台的 B 值计算结果如表7所示。

表7 1990年4月共和地震兰州台 B 值

时间 辨别方法(σ)	1989.11	1989.12	1990.1	1990.2	1990.3	1990.4	1990.5	1990.6
单分量 (0.30)	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓
矢量 (0.30)	×	×	✓	✓	✓	✓	×	×
契氏法 (0.30)	×	×	×	✓	✓	✓	×	×
卡氏法 (0.30)	×	×	×	✓	✓	×	×	✓
差分法 (0.25)	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓
B 值	0	0.30	0.51	0.82	0.82	0.75	0.25	0.64

注： σ 为标准差。

由表7可见1990年1月超过阈值，2月份急速增长并持续高值，4月中发震后有短暂的下降，后来又上升超过阈值，说明震情并未结束，预示着后面的景泰6.2级地震。

地倾斜矢量稳定性的研究

牛安福 吴翼麟

(国家地震局地震研究所)

摘 要

本文在地倾斜矢量分析的基础上, 提出倾斜矢量最大模变的概念, 分别对兰州台和易县台的地倾斜矢量进行了稳定性判别。计算结果对于认识震兆特征是令人鼓舞的。

一、地倾斜矢量的最大模变

利用地倾斜矢量进行震兆分析, 在我国已成为一个重要的手段, 其物理意义明确、直观, 我国已有几次地震前有地倾斜矢量的停滞、打结现象。

所谓停滞, 系指矢量变化缓慢, 近于“平静”; 打结则指某种意义上量的恢复。停滞未必引起打结, 同样打结并不意味着停滞。所以, 在使用矢量进行震兆识别时, 传统的分析方法会导致较多的不确定性, 可能会产生“笼统”的印象。

人们在使用单向地倾斜记录进行一系列的分析、处理时, 有时亦会遇到两个分量中仅有一个出现异常的现象, 本研究亦对解决该现象提出了研究的办法。

由于以上两方面的需要, 本文提出了倾斜矢量最大模变的概念, 其目的由以下的推导中可以较为明了地反映出来。

为研究地表倾斜, 一般的台站都可以记录到两个方向的倾斜^[1, 2]。若某一时刻其倾斜量分别为 T_E 、 T_N , 记录过程如图 1 所示。

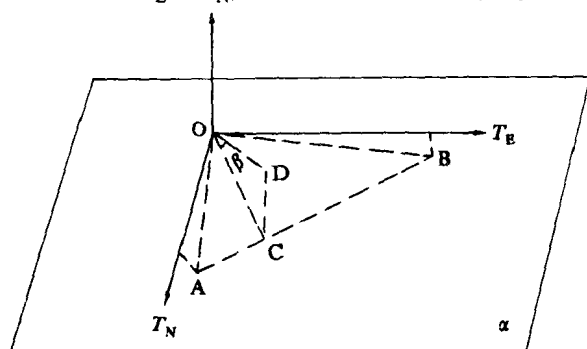


图 1 地倾斜几何图形
斜面相对于平面 α 的倾角 β 。

若平面 α 的法向矢量^[3]为 $\{0, 0, 1\}$, 即 α 为水平面。可求得倾斜面的法向矢量为 $\{-T_E, -T_N, 1\}$ (推导从简), 由此得出两平面的夹角 β :

若垂直向的下沉或升高位移为 dz , 则:

$$T_E = \frac{dz}{OA}, \quad T_N = \frac{dz}{OB}$$

其中 $OA/OB = T_N/T_E$ 。OA 与 OB 两条线段构成了一个有限平面 AOB, 该面亦可称为地倾斜面。OC 为连接 AB 线的垂直线, 由 C 点作平面 α 的垂线 CD, 连接 OD, 则角 COD 表示倾

$$\cos\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + T_E^2 + T_N^2}} \quad (1)$$

由于 β 、 T_E 、 T_N 均很小, 所以有:

$$\begin{aligned} \cos^2\beta &= (1 - \frac{\beta^2}{2} + \dots)^2 = 1 - \beta^2 + \dots \\ \frac{1}{1 + T_E^2 + T_N^2} &= 1 - T_E^2 - T_N^2 + \dots \end{aligned}$$

从而求出 β :

$$\beta = \sqrt{T_E^2 + T_N^2} \quad (2)$$

式 (2) 表明, 倾斜矢量的模即为地倾斜面的倾角^[4]。

对于地倾斜观测序列: $\{x_i, i=1, 2, \dots, N\}$ 和 $\{y_i, i=1, 2, \dots, N\}$

令:

$$\begin{aligned} T_E &= x_i - x_j \\ T_N &= y_i - y_j \quad i > j \end{aligned}$$

则 T_E 、 T_N 分别表示东西和南北向在 j 时刻倾斜的基础上 i 时刻倾斜的相对变化量。由此得 i 时刻与 j 时刻倾斜面的夹角 $\beta_{i,j}$

$$\beta_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

在分析处理时, 由 $\beta_{i,j}$ 描述一个系统的特征尚不够, 原因在于有很多个这样的 $\beta_{i,p}$ 但若用来分析月 (或季度) 地倾斜的最大变化将是很有意义的。

$$M = \max_{i,j=1,N_0} = \{\beta_{i,j}\}$$

N_0 表示一个月或季度的样本或数据点数, 所以, M 表示地倾斜角的月 (或季度) 的最大变化量, 简称倾斜矢量的最大模变。

最大模变的计算一般应采用递推式方法, 例如计算 t 时刻的最大模变 M_t :

$$M_t = \max_{i,j=1,N_0} = \{\beta_{t-i+1, t-j+1}\}$$

上式的计算看似复杂, 但借助于计算机可以很快地进行, 并绘制出 M_t-t 曲线。

二、地倾斜最大模变的计算分析

本文以兰州水管倾斜仪及易县金属摆倾斜仪近几年的观测结果为例进行最大模变分析。

图 2 为兰州台地倾斜的矢量变化曲线, 使用的是东西和南北向地倾斜观测的五日均值, 对不同年份的资料使用自适应光滑器①进行了连接。

图 3 为兰州台地倾斜矢量的最大模变曲线, 递推时间窗为 1 个月, 即 $N_0=6$ 。

图 4 与图 5 分别给出了易县台地倾斜矢量及其最大模变的曲线。所使用资料情况及其计算方法同上。

① 牛安福, 一个自适应数据光滑器, 形变台站通讯, 1990年3-4期。

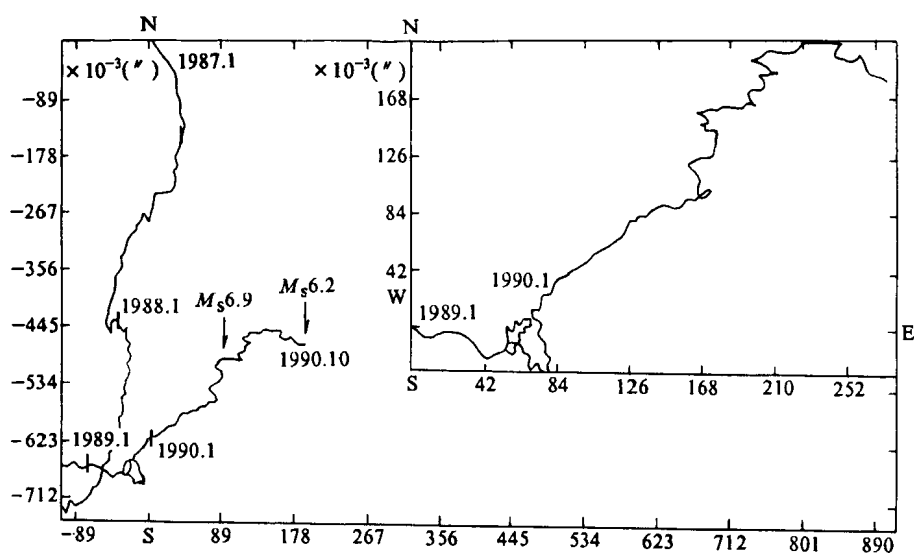


图2 兰州台地倾斜矢量曲线

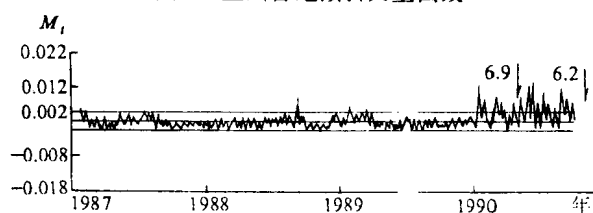


图3 兰州台地倾斜最大模变曲线

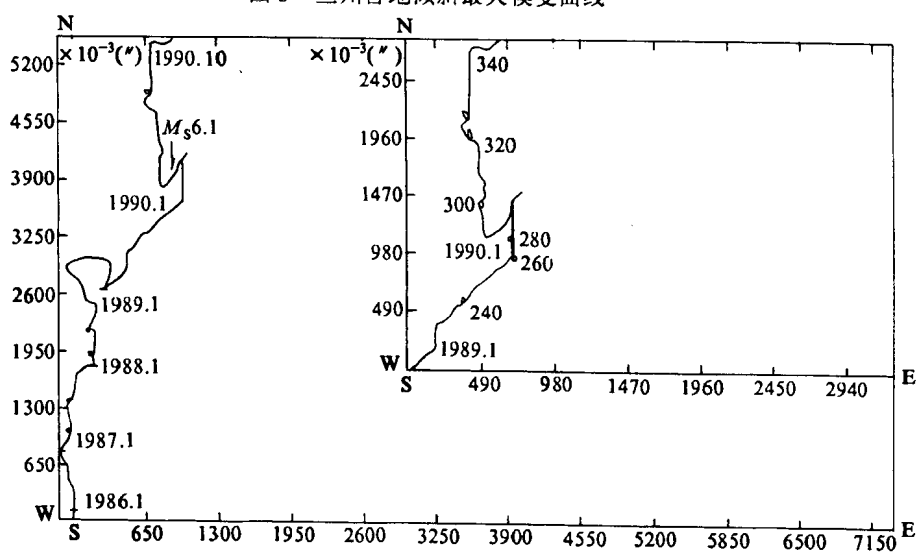


图4 易县台地倾斜矢量曲线

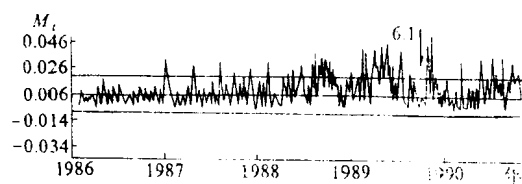


图5 易县台地倾斜矢量最大模变曲线