

中短期地震前兆的模糊综合识别

冯 德 益

(天津 市 地 震 局)

市 川 政 治

(日本气象厅气象研究所)

吴 国 有

(天津 市 地 震 局)

伊 藤 秀 美

(日本气象厅气象研究所)

郑 黑 铭

(天津 市 地 震 局)

摘 要

本文把模糊模式识别的直接方法用于综合分析多台多种手段观测到的地震前兆资料，以便提取较大地震前几个月内可能出现的中短期前兆异常信息。

所用方法的基本技巧是，对每一个台的每一种前兆观测手段建立起适当的前兆从属函数，并进而确定出多手段或多台的综合前兆从属函数。首先以综合前兆从属函数为基础，识别出某一地区较大地震前出现的中短期前兆异常，然后将其归纳成可用于地震预报的中短期前兆模式。

借助于所提出的方法，本文着重分析处理了 1979—1986 年间日本东海地区及其邻近地区 3 个倾斜台、2 个验潮站、2 个水氡观测站、2 个水位观测点和 30 个体积应变观测点的大量前兆观测资料，识别出了这一期间在该地区内发生的 10 余次 6 级以上地震前的中短期前兆异常时间，并得出了两类地震前兆模式：第一类前兆模式适用于在该地区内进行多种前兆手段的综合分析预报；第二类前兆模式适用于单种前兆手段（体积应变）的多台综合分析预报。

为对比起见，文中同时给出了我国唐山 7.8 级地震及其 6.9 级强余震前多台水氡含量变化的中短期前兆综合分析识别结果，所得出的前兆模式与日本东海地区的第二类前兆模式相符。

关键词 模糊模式识别；从属函数；地震前兆；中短期前兆模式；综合分析预报

一、前 言

近年来，在中国国家地震局和日本气象厅的支持下，中日两国地震学者相继开展了把模糊数学方法应用于地震预报的研究工作，并取得了一些有意义的成果^[1,2]。为了开展中日两国地震学者的合作研究，在日本造船振兴财团的赞助下，三名中国地震工作者应日本气象厅邀请，于 1987 年 1—3 月，在日本气象厅气象研究所地震火山部进行了短期集中合作研究。模糊数学方法在地震预报中的应用是该合作研究的项目之一。

本文简要介绍在日本合作期间所完成的、后又经过补充的一项研究成果。其主要内

1987 年 7 月 12 日收到本文初稿，1988 年 1 月 20 日决定采用。

容是把模糊模式识别的直接方法用于中短期地震前兆的识别与分析。文中除进一步完善方法以外,重点分析处理了日本气象厅收集的东海地区及其邻近地区十余年来多种前兆手段的大量观测资料。东海及其邻近地区是日本的地震重点监视预报区,台站分布较密,资料持续时间较长,本区及邻近地区6级以上地震较多,加之全部资料(各台每日每小时的观测数据)都储存在气象研究所的计算机数据库中,提取使用相当方便,所有这些都为我们的研究工作提供了有利条件。此外,为对比起见,本文也分析处理了中国唐山地震前京、津、唐地区多台水氡观测资料。在用计算机分析处理大量前兆观测资料的基础上,得到了分别适用于多手段综合预报和多台综合预报的两类地震前兆模式。

二、基本方法

众所周知,从属函数或从属度是模糊集理论的基础。根据从属函数识别欲确定的对象类型的方法,称之为模糊模式识别的直接方法。本文把此方法用于识别中短期地震前兆。

根据模糊集合论方法^[3,4],模糊模式识别的直接方法,原则上可分为以下三个步骤:

1. 特征提取 从对象 u 中提取可用来识别它们的主要特征;

2. 建立从属函数 若对象 u 可分为 n 类,并用模糊集 $\mathcal{A}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示,则应建立起 u 属于 \mathcal{A}_i 的从属函数 $\mu_{\mathcal{A}_i}(u)$;

3. 识别判决 按某种归属原则对元素 u 进行判别,以确定该元素应属于的类别。常用的归属原则有两种:

(1) 最大隶属原则。若有模糊集 \mathcal{A}_i ,使

$$\mu_{\mathcal{A}_i}(u) = \max [\mu_{\mathcal{A}_1}(u), \mu_{\mathcal{A}_2}(u), \dots, \mu_{\mathcal{A}_n}(u)]$$

则可认为 u 相对地从属于 \mathcal{A}_i ;或者若有某对象 u_i 满足

$$\mu_{\mathcal{A}}(u_i) = \max [\mu_{\mathcal{A}_1}(u_1), \mu_{\mathcal{A}_2}(u_2), \dots, \mu_{\mathcal{A}_n}(u_n)]$$

则可认为在诸对象 u_1, u_2, \dots, u_n 中,对象 u_i 最有资格从属于模糊集 \mathcal{A} 。

(2) 阈值原则。规定一个阈值 $\lambda \in [0, 1]$,取

$$\mu_{\max} = \max [\mu_{\mathcal{A}_1}(u), \mu_{\mathcal{A}_2}(u), \dots, \mu_{\mathcal{A}_n}(u)]$$

若 $\mu_{\max} < \lambda$,则作“拒识”判决;若 $\mu_{\max} \geq \lambda$,则认为有所识别的对象。如果总共有 $\mu_{\mathcal{A}_1}(u), \mu_{\mathcal{A}_2}(u), \dots, \mu_{\mathcal{A}_k}(u) \geq \lambda$,则可判别 u 归属于 $\mathcal{A}_1 \cup \mathcal{A}_2 \cup \dots \cup \mathcal{A}_k$ 。或者,若有一系列对象 u_1, u_2, \dots, u_n 都满足 $\mu_{\mathcal{A}}(u_i) \geq \lambda (i = 1, 2, \dots, m)$,则这些对象都可判定为属于同一个模糊集 \mathcal{A} 。阈值 λ 由经验途径确定,一般应取 $\lambda > \mu^* = 0.5$, μ^* 称为“模糊界点”。对于大多数连续观测的地震前兆曲线 $y = A(t)$,可把欲识别的时间段分为“异常”和“正常”两大类,它们的从属函数满足关系式 $\mu_{\text{异常}} + \mu_{\text{正常}} = 1$,因而只需要建立异常的从属函数 $\mu(t)$,就可以对地震前兆进行识别。据作者的研究结果^[1,5,6],在 t_i 时间段内,单项前兆的从属函数 $\mu_i = \mu(t_i)$ 可通过曲线 $y = A(t)$ 的斜率 k_i 和相关系数 r_i 这两个特征量来描述。相应的解析表达式为

$$\mu_i = \left(1 + \frac{\alpha}{|k_i| \cdot |r_i|} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中 α 为经验常数, 可根据阈值原则来确定。阈值 λ 则应根据从属函数 μ_i 与较大地震间的最佳对应关系来选定。所研究的较大地震的震级下限可取为 $M_0 = 5, 6$ 或 7 , 视具体地区的地震活动性水平和地震监测预报目标而定。如果只研究单台单手段的前兆异常识别问题, α 值的选取对识别结果影响不大, 因为 μ 值的极大值顺序不变。在不同 α 值情况下, 可通过选择不同的阈值 λ 来达到完全一样的识别结果。但若要综合识别多台或多手段的前兆异常, 就需要把各单台或单手段的前兆异常从属函数归一化到都能取相近的阈值 λ , 并在此前提下各自选定其 α 值。

当 n 类前兆或 n 个台的同一类前兆组成一个模糊集时, 总从属函数可表示为

$$\mu = \mu_1^{n_1} \vee (\text{或} \wedge) \mu_2^{n_2} \vee (\text{或} \wedge) \cdots \vee (\text{或} \wedge) \mu_m^{n_m} \quad (2)$$

式中符号“ \vee ”与“ \wedge ”分别表示模糊集的“并”和“交”的运算, 即

$$\mu_1 \vee \mu_2 = \max(\mu_1, \mu_2)$$

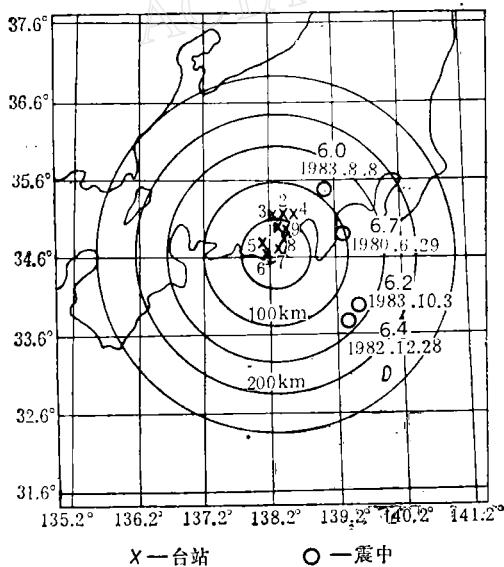
$$\mu_1 \wedge \mu_2 = \min(\mu_1, \mu_2)$$

指数 n_1, n_2, \dots, n_m 为模糊语气因子^[2,7], 应通过经验途径来确定。

确定出不同前兆的异常从属函数 μ , 并选定适当的阈值 λ 以后, 就可以根据最大隶属原则和阈值原则来得出最佳的地震前兆模式, 并识别出更为清晰一些的地震前兆。

三、不同类型地震前兆的模糊综合识别

现以日本东海地区 1979—1983 年间的几种地震前兆观测资料为例, 来对中短期地震前兆进行模糊综合识别。所选用的资料有:



1.冈部; 2.野田泽; 3.近又; 4.清水; 5.大东;
6.榛原; 7.御前崎; 8.田子; 9.烧津

图 1 台站位置和震中分布图

按前述方法选定阈值 λ , 略大于 $\mu^* = 0.5$, 便可通过经验途径确定出各类前兆观测

图 1 同时标出了一个没有选用的台, 即田子台, 说明在这一地区还有一些其它的台站。原始资料缩小比例后示于图 2。该图中同时还给出了以毫米/小时为单位的降雨量。在实际资料分析中选用的是各种前兆观测资料的日均值。

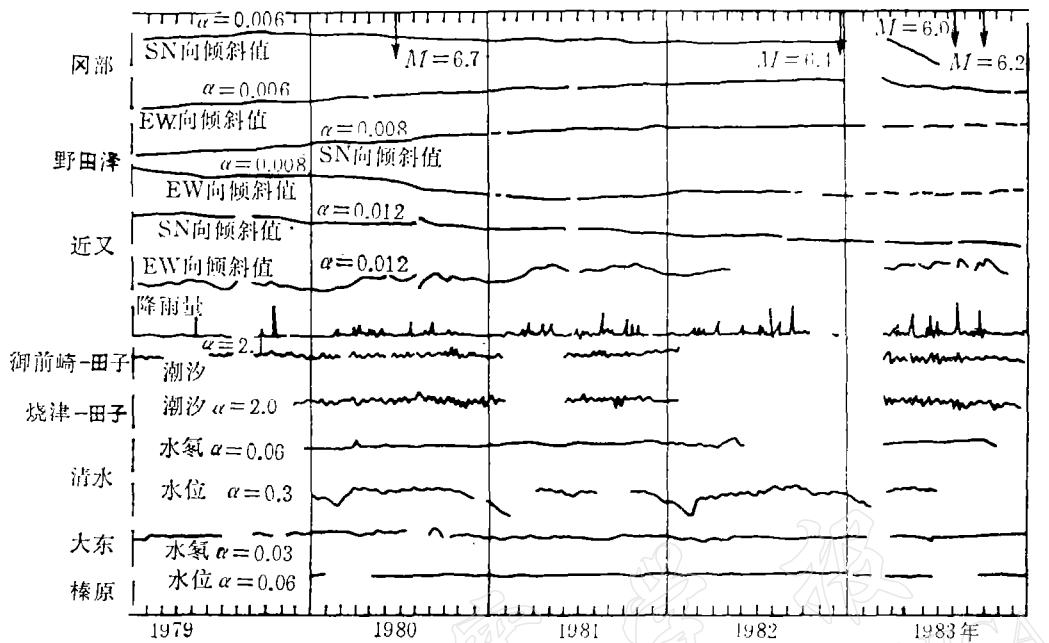


图 2 各种前兆的原始观测值曲线形态

曲线对应的 α 值, 然后由(1)式计算出相应的从属函数。本文选取的 α 值列于图 2 中各曲线旁。为了简化打印过程和分析工作, 只打印大于 $\mu^* = 0.5$ 的从属函数值和出现这些 μ 值的时间(日期)。

由于同一台站上观测到的东西、南北两个倾斜分量 T_E 和 T_N 应该彼此相关, 故可用求“并”的运算把两者的从属函数合并成一个地倾斜前兆从属函数

$$\mu_T = \mu_{T_E} \vee \mu_{T_N}$$

然后, 我们便可利用 9 个模糊集 $A_i (i = 1, 2, \dots, 9)$ 的从属函数 μ_i 来求出一个适当的地震前兆模式, 从而识别出较大地震的中短期前兆异常。这些模糊集是: 冈部的倾斜 A_1 , 野田泽的倾斜 A_2 , 近又的倾斜 A_3 , 御前崎的潮位 A_4 , 烧津的潮位 A_5 , 清水的水氡含量 A_6 , 大东的水氡含量 A_7 , 清水的水位 A_8 , 森原的水位 A_9 。

经过模糊数学中的所谓“学习过程”, 即震例分析、对比与检验过程之后, 可以得出综合识别东海地区 $M \geq 6$ 地震的中短期前兆的总从属函数

$$\mu = \begin{cases} \bigvee_{i=1}^9 \mu_i, & \text{若在小于 15 天的时间区间内, 同时有 3 个或 3} \\ & \text{个以上模糊集 } A_i \text{ 具有 } \mu \geq 0.53; \\ 0, & \text{相反情况} \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)可称为东海地区 $M \geq 6$ 地震的前兆模式, 其中

$$\mu = \bigvee_{i=1}^9 \mu_i = \mu_1 \vee \mu_2 \vee \dots \vee \mu_9$$

表 1 和图 3 给出了利用这些前兆模式对 $M \geq 6.0$ 地震的前兆进行模糊综合识别的

表 1 用公式(3)识别出的东海地区 $M \geq 6.0$ 地震前兆异常数据(1980—1983年)

| 异常日期 (年·月·日) | 异常台站 | 观测手段 | μ 值 | 前兆时间 (天) | 对应地震 |
|-----------------|--|-------|---------|-------------|---------------------------------|
| 1980.3.31 | 清水 清水 清水 清水 大东 近又 | 氯 | 0.575 | 91 | |
| 1980.4.1 | | 氯 | 0.561 | 90 | 1980.6.29 |
| 1980.4.8 | | 氯 | 0.534 | 83 | 34.91°N |
| 1980.4.9 | | 氯 | 0.586 | 82 | 139.23°E |
| 1980.4.10 | | 氯 | 0.593 | 81 | $M = 6.7$ |
| 1980.4.14 | | 东西向倾斜 | 0.552 | 77 | $H = 10\text{ km}$ |
| 1982.8.1 | 野田泽 清水 野田泽 冈部 清水 | 东西向倾斜 | 0.541 | 150 | |
| 1982.8.1 | | 水位 | 0.554 | 150 | 1982.12.28 |
| 1982.8.2 | | 东西向倾斜 | 0.599 | 149 | 33.86°N |
| 1982.8.2 | | 东西向倾斜 | 0.550 | 149 | 139.45°E |
| 1982.8.2 | | 水位 | 0.561 | 149 | $M = 6.4$ $H = 20\text{ km}$ |
| 1983.6.8 | 冈部 株原 冈部 冈部 冈部 御前崎 近又 近又 野田泽 大东 御前崎 近又 御前崎 大东 御前崎 御前崎 御前崎 南北向倾斜 御前崎 南北向倾斜 南北向倾斜 御前崎 烧津 御前崎 御前崎 近又 近又 近又 近又 近又 | 东西向倾斜 | 0.550 | 61 | |
| 1983.6.8 | | 水位 | 0.535 | 61 | |
| 1983.6.9 | | 东西向倾斜 | 0.590 | 60 | |
| 1983.6.10 | | 东西向倾斜 | 0.601 | 59 | |
| 1983.6.11 | | 东西向倾斜 | 0.645 | 58 | |
| 1983.6.11 | | 潮位 | 0.636 | 58 | |
| 1983.6.16 | | 南北向倾斜 | 0.571 | 53 | |
| 1983.6.16 | | 东西向倾斜 | 0.674 | 53 | |
| 1983.6.16 | | 南北向倾斜 | 0.627 | 53 | |
| 1983.6.16 | | 氯 | 0.766 | 53 | |
| 1983.6.16 | | 潮位 | 0.622 | 53 | |
| 1983.6.17 | | 南北向倾斜 | 0.573 | 52 | 1983年8月8日 |
| 1983.6.17 | | 潮位 | 0.608 | 52 | 35.51°N |
| 1983.6.17 | | 氯 | 0.666 | 52 | 139.02°E |
| 1983.6.21 | | 潮位 | 0.681 | 48 | $M = 6.0$ |
| 1983.6.22 | | 潮位 | 0.625 | 47 | $H = 22\text{ km}$ |
| 1983.6.22 | | 南北向倾斜 | 0.638 | 47 | |
| 1983.6.23 | | 潮位 | 0.560 | 46 | |
| 1983.6.23 | | 南北向倾斜 | 0.671 | 46 | |
| 1983.8.11 | | 潮位 | 0.636 | 53 | |
| 1983.8.11 | | 潮位 | 0.572 | 53 | |
| 1983.8.12 | | 潮位 | 0.603 | 52 | |
| 1983.8.13 | | 潮位 | 0.547 | 51 | |
| 1983.8.15 | | 东西向倾斜 | 0.666 | 49 | 1983年10月3日 |
| 1983.8.16 | | 南北向倾斜 | 0.597 | 48 | 34.00°N |
| 1983.8.16 | | 东西向倾斜 | 0.654 | 48 | 139.51°E |
| 1983.8.17 | | 南北向倾斜 | 0.650 | 47 | $M = 6.2$ |
| 1983.8.18 | | 南北向倾斜 | 0.653 | 46 | $H = 15\text{ km}$ |

结果。由表 1 和图 3 可知, 在所有 4 次 $M \geq 6$ 地震前, 且只有在这些地震之前, 才能发生共同的前兆异常。最大的前兆时间(即前兆异常起始时间)约为 5 个月, 最小者约为 2 个月。因此, 我们可以把这样识别出的前兆看成中短期地震前兆。

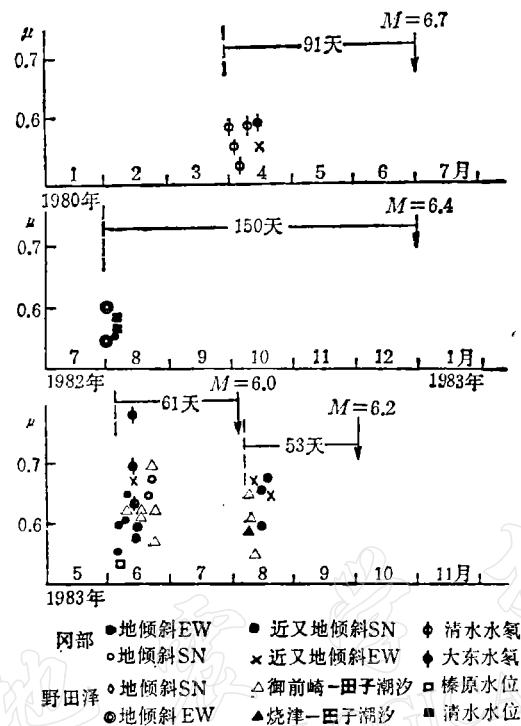


图3 由(3)式表达的从属函数随时间的变化

四、多台同类地震前兆的模糊综合识别

首先分析研究日本东海及其邻近地区的多台体积应变仪观测资料。图4为日本气象厅在这一地区建立的体积应变仪观测站的分布图。图中的台站号码是本文作者编排的。部分台站在1976—1986年间的观测资料示于图5。除了馆山以外，其它台站的资料，本文都进行了分析。但由于多数台站都只在1980年6月之后才开始工作，故本文只选用该时间以后各台的资料进行模糊识别。

利用体应变观测数据的日均值，按前述方法确定经验常数 α 和阈值 λ ，即可由(1)式算出所有台的从属函数 μ 。于是，我们可以利用30个模糊集 A_i 的从属函数 μ_i 来综合识别地震前兆。模糊集 A_i 表示第*i*个台站观测到的体应变日均值， $i = 1, 2, \dots, 30$ 。

经过对1981—1984年的实际地震样本进行分析检验之后，可得出东海及其邻近地区 $M \geq 6$ 地震的中短期前兆从属函数，应取成以下形式：

$$\mu = \begin{cases} \bigvee_{i=1}^{30} \mu_i, & \text{若在小于15天的同一时间段内有6个或6个以上} \\ & \text{模糊集 } A_i \text{ 具有从属函数值 } \mu_i \geq 0.501 \\ 0, & \text{相反情况} \end{cases} \quad (4)$$

这就是东海及其邻近地区基于体应变的 $M \geq 6.0$ 地震前兆模式。利用该前兆模式，可以对1985—1986年的体应变观测资料进行地震预报的检验。

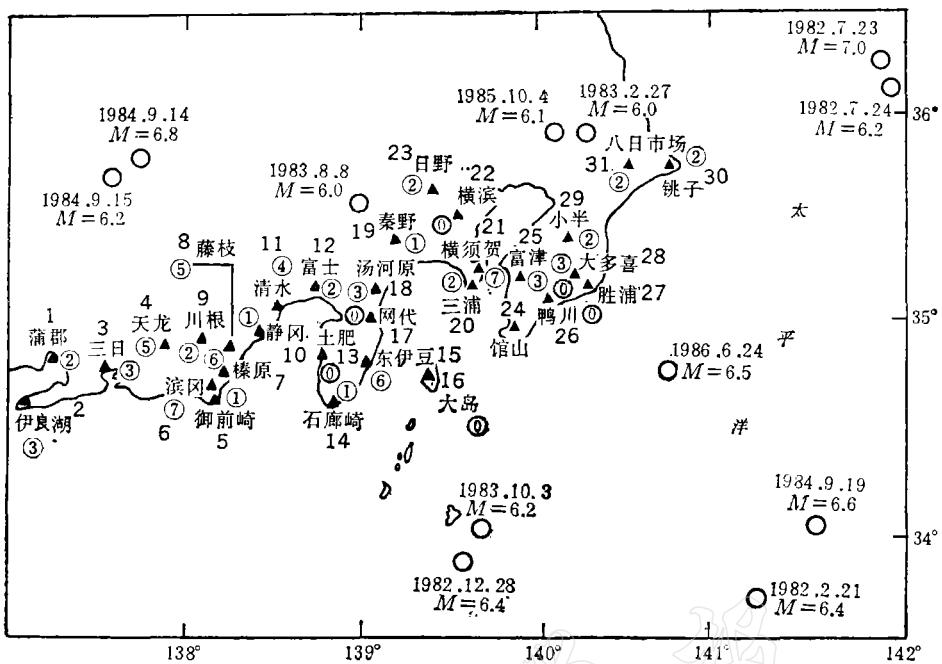


图 4 日本东海及邻近地区体积应变仪台站分布和 $M \geq 6$ 地震震中分布

(图中的黑三角表示台站,大圆圈表示地震震中,台站旁边的数字表示台号,
小圈内数字表示该台体应变出现中短期异常的次数)

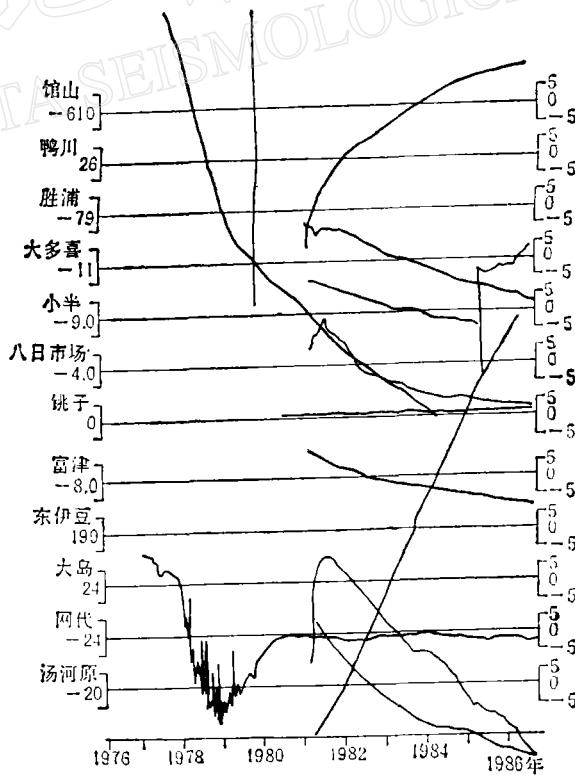


图 5 日本东海及邻近地区部分台站的体应变观测曲线形态
(单位为 10^{-6})

表2 用(4)式识别东海及其邻近地区 $M > 6$ 地震(1980年7月—1986年)的前兆异常数据

| 异常日期 (年.月.日) | 异常台站 | μ 值 | 前兆时间 (天) | 对应地震 |
|-----------------|------|---------|-------------|------------------------|
| 1981.8.16 | 10 | 0.590 | 188 | 1982年2月21日 |
| 1981.8.22 | 6 | 0.534 | 182 | 33.71°N |
| 1981.8.22 | 11 | 0.514 | 182 | 141.23°E |
| 1981.8.23 | 11 | 0.522 | 181 | $M = 6.4$ |
| 1981.8.23 | 6 | 0.583 | 181 | $H = 40\text{km}$ |
| 1981.8.23 | 7 | 0.537 | 181 | |
| 1981.8.23 | 4 | 0.537 | 181 | |
| 1981.8.23 | 2 | 0.502 | 181 | |
| 1981.8.26 | 31 | 0.503 | 178 | |
| 1981.8.27 | 31 | 0.542 | 177 | |
| 1981.10.23 | 4 | 0.540 | 120 | |
| 1981.10.23 | 1 | 0.503 | 120 | |
| 1981.10.23 | 2 | 0.539 | 120 | |
| 1981.10.23 | 6 | 0.598 | 120 | |
| 1981.10.23 | 7 | 0.555 | 120 | |
| 1981.10.23 | 5 | 0.519 | 120 | |
| 1981.10.23 | 29 | 0.549 | 120 | |
| 1981.10.23 | 8 | 0.562 | 120 | |
| 1981.10.23 | 21 | 0.518 | 120 | |
| 1981.10.23 | 20 | 0.511 | 120 | |
| 1981.10.24 | 4 | 0.512 | 119 | |
| 1981.10.24 | 6 | 0.569 | 119 | |
| 1981.10.24 | 7 | 0.557 | 119 | |
| 1981.10.24 | 8 | 0.543 | 119 | |
| 1981.10.24 | 21 | 0.572 | 119 | |
| 1981.11.1 | 12 | 0.509 | 111 | |
| 1981.11.2 | 12 | 0.578 | 110 | |
| 1981.11.3 | 12 | 0.504 | 109 | |
| 1982.4.6 | 25 | 0.519 | 104 | 1982年7月23日 |
| 1982.4.7 | 25 | 0.646 | 103 | 36.18°N |
| 1982.4.7 | 2 | 0.501 | 103 | 141.95°E |
| 1982.4.7 | 21 | 0.531 | 103 | $M = 7.0$ |
| 1982.4.7 | 15 | 0.512 | 103 | $H = 30\text{km}$ |
| 1982.4.7 | 4 | 0.503 | 103 | 1982年7月24日 |
| 1982.4.8 | 25 | 0.513 | 102 | 36.11°N |
| 1982.4.10 | 7 | 0.511 | 100 | 142.05°E |
| 1982.4.10 | 6 | 0.546 | 100 | $M = 6.2$ |
| 1982.4.10 | 25 | 0.572 | 100 | $H = 30\text{km}$ |
| 1982.4.10 | 31 | 0.522 | 100 | |
| 1982.4.11 | 6 | 0.504 | 99 | |
| 1982.4.11 | 25 | 0.560 | 99 | |
| 1982.4.19 | 31 | 0.603 | 90 | |
| 1982.4.20 | | 0.589 | 89 | |
| 1982.8.1 | 9 | 0.515 | 147 | 1982年12月28日 |

续 表 2

| 异常日期 (年.月.日) | 异常台站 | μ 值 | 前兆时间 (天) | 对应地震 |
|-----------------|------|---------|-------------|--------------------------|
| 1982.8.1 | 11 | 0.579 | 147 | 33.86°N |
| 1982.8.2 | 11 | 0.662 | 146 | 139.45°E |
| 1982.8.2 | 9 | 0.555 | 146 | $M = 6.4$ |
| 1982.8.3 | 11 | 0.617 | 145 | $H = 20\text{km}$ |
| 1982.8.3 | 3 | 0.602 | 145 | |
| 1982.8.4 | 3 | 0.651 | 145 | |
| 1982.8.4 | 18 | 0.542 | 144 | |
| 1982.8.5 | 3 | 0.576 | 143 | |
| 1982.8.5 | 18 | 0.555 | 143 | |
| 1982.8.6 | 18 | 0.554 | 142 | |
| 1982.8.7 | 18 | 0.509 | 141 | |
| 1982.8.8 | 20 | 0.501 | 140 | |
| 1982.8.12 | 15 | 0.525 | 136 | |
| 1982.8.14 | 15 | 0.571 | 134 | |
| 1982.8.15 | 15 | 0.562 | 133 | |
| 1982.9.11 | 30 | 0.575 | 106 | |
| 1982.9.11 | 9 | 0.511 | 106 | |
| 1982.9.11 | 11 | 0.557 | 106 | |
| 1982.9.12 | 3 | 0.505 | 105 | |
| 1982.9.12 | 11 | 0.629 | 105 | |
| 1982.9.13 | 3 | 0.579 | 104 | |
| 1982.9.13 | 11 | 0.582 | 104 | |
| 1982.9.13 | 23 | 0.509 | 104 | |
| 1982.9.14 | 30 | 0.595 | 103 | |
| 1982.9.14 | 1 | 0.530 | 103 | |
| 1982.9.14 | 6 | 0.519 | 103 | |
| 1982.9.14 | 18 | 0.528 | 103 | |
| 1982.9.14 | 3 | 0.576 | 103 | |
| 1982.9.15 | 30 | 0.584 | 102 | |
| 1982.9.15 | 3 | 0.512 | 102 | |
| 1982.9.22 | 25 | 0.689 | 95 | |
| 1982.11.26 | 6 | 0.520 | 93 | 1983 年 2 月 27 日 |
| 1982.11.26 | 8 | 0.515 | 93 | 39.94°N |
| 1982.11.26 | 7 | 0.520 | 93 | 140.15°E |
| 1982.11.26 | 28 | 0.522 | 93 | $M = 6.0$ |
| 1982.11.26 | 21 | 0.521 | 93 | $H = 72\text{km}$ |
| 1982.11.26 | 25 | 0.646 | 93 | |
| 1982.12.10 | 15 | 0.516 | 79 | |
| 1983.2.15 | 15 | 0.516 | 169 | 1983 年 8 月 8 日 |
| 1983.2.19 | 28 | 0.510 | 165 | 35.51°N |
| 1983.2.19 | 2 | 0.510 | 165 | 139.02°E |
| 1983.2.19 | 4 | 0.508 | 165 | $M = 6.0$ |
| 1983.2.19 | 6 | 0.550 | 165 | $H = 22\text{km}$ |
| 1983.2.19 | 7 | 0.526 | 165 | |

续表 2

| 异常日期 (年.月.日) | 异常台站 | μ 值 | 前兆时间 (天) | 对应地震 |
|-----------------|------|---------|-------------|-------------------|
| 1983.2.19 | 8 | 0.526 | 165 | |
| 1983.2.19 | 21 | 0.519 | 165 | |
| 1983.8.8 | 12 | 0.547 | 56 | 1983 年 10 月 3 日 |
| 1983.8.8 | 15 | 0.503 | 56 | 34.00°N |
| 1983.8.9 | 12 | 0.552 | 55 | 139.51°E |
| 1983.8.9 | 19 | 0.546 | 55 | $M = 6.2$ |
| 1983.8.9 | 15 | 0.504 | 55 | $H = 15\text{km}$ |
| 1983.8.10 | 19 | 0.542 | 54 | |
| 1983.8.12 | 15 | 0.500 | 52 | |
| 1983.8.13 | 15 | 0.505 | 51 | |
| 1983.8.15 | 14 | 0.503 | 49 | |
| 1983.8.16 | 14 | 0.528 | 48 | |
| 1983.8.16 | 11 | 0.654 | 48 | |
| 1983.8.16 | 9 | 0.619 | 47 | |
| 1983.8.17 | 9 | 0.578 | 47 | |
| 1983.8.17 | 11 | 0.674 | 46 | |
| 1983.8.18 | 18 | 0.540 | 45 | |
| 1983.8.19 | 18 | 0.611 | 45 | |
| 1983.8.19 | 3 | 0.513 | 44 | |
| 1983.8.20 | 19 | 0.612 | 44 | |
| 1983.8.20 | 18 | 0.580 | 44 | |
| 1983.8.20 | 3 | 0.510 | 44 | |
| 1983.8.21 | 18 | 0.510 | 43 | |
| 1983.8.21 | 19 | 0.690 | 43 | |
| 1983.8.22 | 19 | 0.668 | 42 | |
| 1983.8.23 | 19 | 0.561 | 41 | |
| 1984.4.4 | 15 | 0.509 | 164 | 1984 年 9 月 14 日 |
| 1984.4.7 | 4 | 0.530 | 161 | 35.82°N |
| 1984.4.7 | 6 | 0.594 | 161 | 137.56°E |
| 1984.4.7 | 7 | 0.514 | 161 | $M = 6.8$ |
| 1984.4.7 | 8 | 0.544 | 161 | $H = 2\text{km}$ |
| 1984.4.7 | 21 | 0.520 | 161 | 1984 年 9 月 15 日 |
| 1984.4.7 | 28 | 0.502 | 161 | 35.79°N |
| 1984.4.10 | 15 | 0.503 | 158 | 137.47°E |
| 1984.4.18 | 15 | 0.500 | 150 | $M = 6.2$ |
| 1984.4.18 | | | | $H = 6\text{km}$ |
| 1984.4.18 | | | | 1984 年 9 月 19 日 |
| 1984.4.18 | | | | 34.05°N |
| 1984.4.18 | | | | 141.55°E |
| 1984.4.18 | | | | $M = 6.6$ |
| 1984.4.18 | | | | $H = 13\text{km}$ |
| 1985.6.25 | 3 | 0.516 | 91 | 1985 年 10 月 4 日 |
| 1985.6.25 | 29 | 0.709 | 91 | 35.87°N |
| 1985.6.26 | 3 | 0.562 | 90 | 140.16°E |
| 1985.6.26 | 29 | 0.708 | 90 | $M = 6.1$ |
| 1985.6.27 | 29 | 0.690 | 89 | $H = 78\text{km}$ |
| 1985.6.27 | 3 | 0.562 | 89 | |
| 1985.6.28 | 3 | 0.544 | 88 | |
| 1985.6.28 | 29 | 0.674 | 88 | |

续 表 2

| 异常日期 (年.月.日) | 异常台站 | μ 值 | 前兆时间 (天) | 对应地震 |
|-----------------|------|---------|-------------|---------------------|
| 1985.6.29 | 3 | 0.536 | 87 | |
| 1985.6.29 | 29 | 0.664 | 87 | |
| 1985.6.30 | 30 | 0.591 | 86 | |
| 1985.6.30 | 29 | 0.655 | 86 | |
| 1985.6.30 | 3 | 0.525 | 86 | |
| 1985.6.30 | 11 | 0.543 | 86 | |
| 1985.7.1 | 3 | 0.533 | 85 | |
| 1985.7.1 | 18 | 0.516 | 85 | |
| 1985.7.1 | 29 | 0.648 | 85 | |
| 1985.7.1 | 11 | 0.503 | 85 | |
| 1985.7.2 | 29 | 0.644 | 84 | |
| 1985.7.2 | 3 | 0.507 | 84 | |
| 1985.7.2 | 18 | 0.584 | 84 | |
| 1985.7.3 | 18 | 0.613 | 83 | |
| 1985.7.3 | 30 | 0.591 | 83 | |
| 1985.7.3 | 29 | 0.638 | 83 | |
| 1985.7.4 | 29 | 0.636 | 82 | |
| 1985.7.4 | 30 | 0.625 | 82 | |
| 1985.7.5 | 30 | 0.511 | 81 | |
| 1985.7.5 | 29 | 0.612 | 81 | |
| 1985.7.6 | 29 | 0.522 | 80 | |
| 1985.7.10 | 21 | 0.537 | 76 | |
| 1986.4.4 | 2 | 0.514 | 81 | 1986 年 6 月 24 日 |
| 1986.4.4 | 4 | 0.541 | 81 | 34.82°N |
| 1986.4.4 | 6 | 0.571 | 81 | 140.73°E |
| 1986.4.4 | 7 | 0.555 | 81 | $M = 6.5$ |
| 1986.4.4 | 8 | 0.545 | 81 | $H = 73 \text{ km}$ |
| 1986.4.4 | 21 | 0.518 | 81 | |
| 1986.4.16 | 23 | 0.507 | 69 | |
| 1986.4.17 | 23 | 0.515 | 68 | |

表 2 和图 6 给出了利用体应变前兆模式(4)对 $M \geq 6.0$ 地震进行模糊综合识别的结果。由表 2 和图 6 可以看出, 在 1981 年 6 月至 1984 年底出现过 7 次前兆异常期, 继后在区域 $137^{\circ}\text{E}—142^{\circ}\text{E}, 33.5^{\circ}\text{N}—36.2^{\circ}\text{N}$ 内发生 10 次 $M \geq 6.0$ 地震, 其中有 3 次地震是在另外两次地震发生之后短时间内发生的, 从前兆上不好分辨。总的说来对应关系相当好。前兆时间最长约 6 个月, 最短约 2 个月。这些前兆同样可以看成是中短期地震前兆。对 1985—1986 年间体应变观测资料所作的外推预报, 检验结果也与实际发震情况符合较好: 在两个前兆异常时期出现之后 91 天和 81 天分别发生了两次 $M > 6.0$ 地震。

我们把上述多台前兆资料模糊综合分析识别法用于分析中国京、津、唐地区的水氡资料, 利用(1)式计算了 1975—1976 年间唐山周围 600 km 以内数据连续可靠、观测时间较长、质量较高的 50 余井(泉)的水氡观测资料的前兆异常从属函数 $\mu^{[5]}$ 。在计算 μ 的过

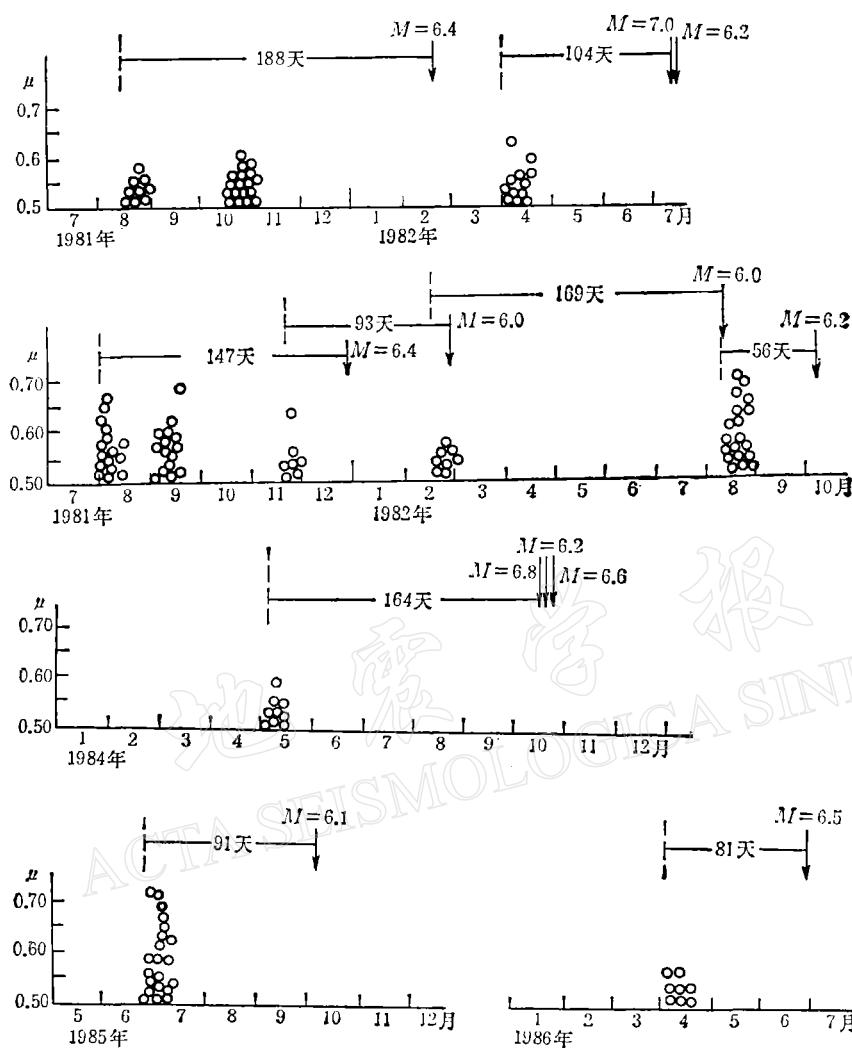


图 6 用(4)式计算出的1981—1986年间的综合前兆从属函数随时间的变化

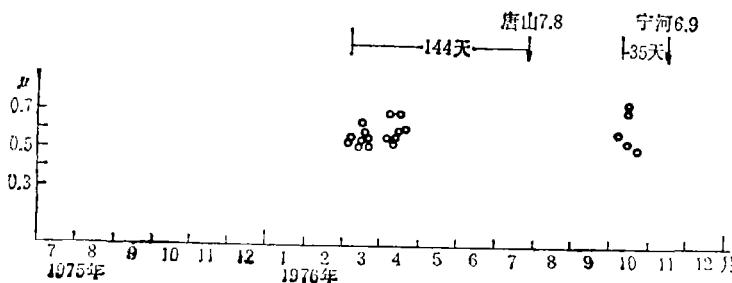


图 7 1975—1976年间京、津、唐地区综合前兆从属函数随时间的变化

程中,同样用前述方法确定了各台的常数 α 。在此基础上,通过经验途径,可以得出与公式(4)完全类似的地震前兆模式,只是在15天时间间隔内有5个或5个以上井孔具有从

表 3 京、津、唐地区 1975—1976 年间 7.8 级和 6.9 级地震的前兆异常时间

| 异常日期 (年·月·日) | 井孔名 | μ 值 | 前兆时间 (天) | 对应地震 (年·月·日) |
|-----------------|-----|---------|-------------|-----------------|
| 1976.3.5 | 宝坻 | 0.54 | 144 | |
| 1976.3.5 | 北辛堡 | 0.55 | 144 | |
| 1976.3.10 | 坝 1 | 0.51 | 139 | |
| 1976.3.15 | 文安 | 0.53 | 134 | |
| 1976.3.15 | 田疃 | 0.65 | 134 | |
| 1976.3.20 | 张道口 | 0.55 | 129 | |
| 1976.3.20 | 津 2 | 0.53 | 129 | |
| 1976.3.20 | 务 1 | 0.53 | 129 | |
| 1976.4.5 | 塘沽 | 0.55 | 114 | |
| 1976.4.5 | 宝坻 | 0.70 | 114 | |
| 1976.4.10 | 安各庄 | 0.56 | 109 | |
| 1976.4.10 | 棉四 | 0.57 | 109 | |
| 1976.4.15 | 张道口 | 0.70 | 104 | |
| 1976.4.15 | 务 1 | 0.56 | 104 | |
| 1976.10.10 | 张道口 | 0.60 | 35 | 1976.11.15 |
| 1976.10.15 | 雄县 | 0.73 | 30 | |
| 1976.10.15 | 矾山 | 0.75 | 30 | |
| 1976.10.15 | 东花园 | 0.54 | 30 | |
| 1976.10.25 | 塘沽 | 0.52 | 20 | |

属函数 $\mu_i \geq 0.51$ 时,便可取综合从属函数 $\mu = \vee \mu_i$; 而相反的情况取 $\mu = 0$ 。表 3 和图 7 给出了 1975—1976 年京、津、唐地区多台地下水氡含量前兆异常的模糊综合识别结果。由表 3 和图 7 可知,1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震和 1976 年 11 月 15 日宁河 6.9 级地震以前,水氡都有明显的前兆异常,前兆时间为 144 天和 35 天。

五、初步结论

根据本文研究结果,可得出以下初步结论:

- 利用模糊模式识别的直接方法,可以更清晰地综合识别出多手段及多台前兆资料所反映出的中短期前兆异常。某些干扰因素,如降雨量的影响(见图 2 近又台的两个倾斜仪分量)和季节性变化(见图 2 清水台的水位)等均有可能消除。
- 地震前兆的模糊综合识别法的核心是建立起由(1)式表达的单台单手段的从属函数和由类似于(3),(4)式表达的多手段及多台前兆异常从属函数。为此,必须通过经验途径确定出从属函数表达式中的常数 α 及阈值 λ 。
- 在用模糊数学方法综合识别出中短期地震前兆之后,就可以对这些前兆的时间和空间分布特性作进一步研究,并用于地震综合分析预报当中。
- 根据不同台站和不同手段的观测资料在多次较大地震前出现共同异常的次数比例,可以讨论各台站和各手段观测资料反映地震前兆的能力,即预报地震的能力。例如:图 4 中给出日本东海及邻区不同台站体应变观测值出现中短期异常的次数 N ,数目 N 直

接由表 2 统计出。由图 4 可以看出, 反应地震前兆能力较强的台站有滨冈、横须贺、榛原、东伊豆、天龙、藤枝等。

作者衷心感谢以笛川良一先生为会长的日本造船振兴财团给予本课题的财政资助。同时, 日本国立防灾研究中心和地质调查所为本课题提供部分地倾斜和潮位观测资料; 日本气象研究所的科技人员和管理人员也给予本课题各方面的帮助, 在此一并致谢。

本课题是中国国家地震局和日本造船振兴财团共同赞助完成的合作研究项目。

参 考 文 献

- [1] 冯德益、林命週、顾瑾平、楼世博、陈化成, 1981. 模糊数学在地震预报和震源孕育模式研究中的应用. 西北地震学报, 3, 3, 1—8.
- [2] Ichikawa, M., Ito, H., Zhao, Z., 1986. Preliminary report on the application of some methods of fuzzy mathematics to seismological researches. *Fuzzy Mathematics in Earthquake Researches, Continued Volume*, 112—123. Seismological Press.
- [3] 汪培庄, 1983. 模糊集合论及其应用, 30—32, 143—152. 上海科学技术出版社.
- [4] 吴望名、陈永义、黄金丽等, 1985. 应用模糊集方法, 26—29. 北京师范大学出版社.
- [5] 冯德益、郑熙铭, 1987. 1976年唐山地震前水氡含量变化的模糊识别和前兆异常的特性分析. 中国地震, 3, 1, 38—46.
- [6] Feng Deyi, Lin Mingzhou, Jiang Chun, Cheng Ronghua, 1986. Applications of fuzzy mathematics in earthquake prediction. *J. Phys. Earth*, 34, Suppl., 213—221.
- [7] 冯德益、楼世博、林命週等, 1983. 模糊数学方法与应用, 36—41, 94—105. 地震出版社.
- [8] Feng Deyi, Lou Shibo, Lin Mingzhou, Gu Jinping, 1985. Applications of fuzzy mathematics in earthquake hazard assessment and prediction. *Fuzzy Mathematics in Earthquake Researches*, 16—31. Seismological Press.

FUZZY SYNTHETIC RECOGNITION OF MEDIUM-SHORT-TERM EARTHQUAKE PRECURSORS

Feng Deyi¹⁾, Masaj Ichikawa²⁾, Wu Guoyou¹⁾, Hidemi Ito²⁾ and Zheng Ximing¹⁾

1) Seismological Bureau of Tianjin, China

2) Meteorological Research Institute, Japan

Abstract

The direct method of fuzzy pattern recognition has been applied to the synthetic recognition of medium-short-term (several months) earthquake precursors of different kinds observed at different stations.

The basic technique of this method is to construct a suitable membership function for each single precursor at each single station and then the comprehensive membership function for several precursors of different kinds or for the same precursor observed at different stations.

By using this method, the precursors observed in the Tokai area and its vicinity of Japan are studied with emphasis. They are the radon content in ground water, groundwater level, tilt, tide and volume strain. The abundant observational data from 3 tilt stations, 2 tide stations, 2 stations for observation of radon content in ground water, 2 stations for observation of water level and 30 stations for observation of volume strain are used. Two possible precursor patterns for medium-short-term earthquake prediction in the Tokai area were proposed. One is applied to the synthetic analysis of several precursors of different kinds and at different stations, the other is applied to the synthetic analysis of one-kind of precursor (volume strain) observed at different stations.

For comparison, the result of synthetic recognition of medium-short-term precursors of radon content in ground water at many stations before the great $M=7.8$ Tangshan earthquake of 1976 and its $M=6.9$ strong aftershock observed in the Beijing-Tianjin-Tangshan area and its vicinity of China is introduced. The precursor pattern obtained corresponds to the second precursor pattern for the Tokai area of Japan.