

# 前兆异常要素与地震要素模糊 关系的研究<sup>\*</sup>

汪雪泉<sup>1)</sup> 郑兆苾<sup>1)</sup> 钱家栋<sup>2)</sup>  
余华扬<sup>1)</sup> 黄显良<sup>1)</sup>

1) 中国合肥 230031 安徽省地震局

2) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

**摘要** 采用模糊信息处理方法研究两变量之间或多变量之间的关系, 这种关系有别于传统的统计相关, 而带有模糊性. 对前兆异常要素与地震要素模糊关系进行了数值模拟, 验证了该方法用于评价异常要素与地震要素关系中的可靠性和有效性. 同时也给出了霍山小震月频次与地震模糊关系的实例分析. 由于地震孕育过程的复杂性, 引进模糊关系评价时, 较传统的统计相关分析更全面、更完善, 并可用隶属度给出定量关系.

**关键词** 地震前兆 模糊信息处理 模糊关系

## 引言

地震的孕育和发生是一种复杂的自然现象. 在地震孕育过程中可能伴随出现一些物理化学现象, 即所谓的前兆信息. 人们试图利用这些前兆信息预测预报地震. 然而这些信息与地震并非存在一一对应关系. 有异常无地震以及有地震无异常是地震工作者常遇到的困惑. 为了定量地研究前兆异常要素与地震三要素之间的关系, 过去多采用统计相关研究方法, 一般是对有震的前兆异常要素进行统计, 多以线性回归方法为主(梅世蓉等, 1993). 大多数统计不包含无震时段或无震地区的异常变化, 所以基本上是一种不全面的经验式的定量统计关系, 并且其线性化模型一般缺少充分的理论依据. 同时, 在前兆异常与地震要素的相关性分析中, 存在某些不确定性, 比如观测误差、参数的突然截断等对相关性分析结果均会产生影响; 又如同一震级的地震发生之前, 同样的一种前兆可能有不同的异常特征. 为此, 本研究引入“模糊信息处理方法”, 定量地研究前兆异常要素与地震三要素的关系. 由于这一方法在信息分配时采用了向多个节点依距离远近都分配信息的模糊信息分配计算公式, 较好地处理了如观测误差等造成的不确定性. 同时包含了有震无震、有异常无异常各种情况, 全面、完整地概括出异常要素与地震要素的关系. 通过模糊近似推论, 可以由异常要素得出地震要素各论域的隶属度, 从而为预测地震要素的可信度提供了数学依

<sup>\*</sup> 中国地震局重点项目(95-07-431)资助.  
1998-12-14 收到初稿, 1999-06-14 收到修改稿并决定采用.

据，改变了目前完全凭经验或仅以线性回归外推得出某一结果的状况。

1 模糊信息处理方法

假如将  $x$  看作是地震前兆异常某要素，如地电阻率异常幅度； $y$  是地震某要素，如震级。根据大量观测到的  $x$  和  $y$  数据，包括有异常无地震（即震级在小于某一震级下限子域内）或无异常（即异常幅度在小于某一阈值的子域内）有地震的完整资料数据，建立前兆异常要素与地震某要素的模糊关系矩阵，可以借此定量研究两者的关联程度。

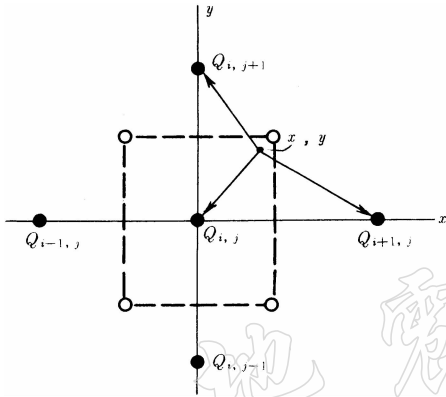


图 1 二维信息分配图。空心圆代表信息论域节点位置，实心圆代表信息矩阵节点。  $x, y$  代表一组信息

1.1 二维模糊信息分配

将  $x$  和  $y$  可能的取值范围划分为若干子域  $x_i (i=1, 2, \dots, m), y_j (j=1, 2, \dots, n)$ ，并令  $\Delta x_i, \bar{x}_i$  分别是  $x_i$  子域的长度及中位值； $\Delta y_j, \bar{y}_j$  分别是  $y_j$  子域的长度及中位值。任意一组  $x, y$  信息在坐标系中可视为一个信息点。若  $x \in x_i, y \in y_j$ ，根据它落在  $x$  和  $y$  子域中位线组成的某一个特定网格中位置（图 1），依下列原则将该点信息量分配到网格的节点  $Q_{i,j}$  及邻近的 4 个节点  $Q_{i,j-1}, Q_{i,j+1}, Q_{i-1,j}$  和  $Q_{i+1,j}$  中的有关两个节点上（王家鼎，1985）。

令  $\delta x, \delta y$  分别为  $x, y$  在  $x_i, y_j$  中的相

对偏移量

$$\delta x = (x - \bar{x}_i) / \Delta x_i \tag{1}$$

$$\delta y = (y - \bar{y}_j) / \Delta y_j \tag{2}$$

并定义符号函数

$$g(x) = \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \tag{3}$$

则

$$Q_{i,j} = (1 - |\delta x|)(1 - |\delta y|) \tag{4}$$

$$Q_{i',j'} = Q_{i,j} + |\delta x| |\delta y| \tag{5}$$

式(5)中， $i' = i + g(\delta x), j' = j + g(\delta y)$ 。例如：当  $x < x_i$  时， $\delta x < 0$ ，符号函数取  $-1$ ，则  $i' = i - 1$ 。

根据以上分配方法，对所有各组  $x, y$  均进行信息分配。最后各节点信息叠加形成一个二维信息矩阵，经过收边、归一等技术处理，得到  $x, y$  的模糊关系矩阵。矩阵中数值大的节点，反映了多组数据中两者在该节点及附近出现的频次高，表明  $x$  与  $y$  关系密切，反之亦然。

以上信息分配原理可推广至三维，可对两个异常要素  $x, y$  与一个地震要素  $z$  的多组数据通过模糊信息分配处理，得到模糊关系矩阵。

1.2 模糊近似推论

有了模糊信息关系矩阵, 就可以利用公式进行模糊近似推论(王家鼎, 1985; 王家鼎, 1988). 仍以二维信息  $x$ - $y$  为例

$$B = A \circ Q \tag{6}$$

式中, 符号“ $\circ$ ”系组合运算符, 本研究取为矩阵乘法运算.  $Q$  为模糊相关矩阵,  $B$  为要预测的信息量  $y$  的分级隶属程度,  $A$  为已得到的某异常要素  $x$  在各论域中的信息

$$A = \{a_1, a_2, \cdots, a_m\}$$
$$a_i = \max\{0, (1 - |\bar{x}_i - x| / \Delta x_i)\} \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{7}$$

通过矩阵相乘, 可以得到  $B$  矩阵. 通过归一化处理得到预测量  $y$  的隶属度表达式, 即  $y$  属于其各论域的隶属度分布预测值

$$y = \mu(y_1)/y_1 + \mu(y_2)/y_2 + \cdots + \mu(y_n)/y_n \tag{8}$$

2 数值模拟

以上模糊信息分配及模糊近似推论方法用于前兆异常要素与地震要素的关联研究, 能否达到预期效果, 以全面较好地显示相关程度. 在用实际观测资料进行处理之前, 用数值模拟的方法进行了检验. 首先产生了 4 组模拟数据, 分别标为 A 组、B 组、C 组和 D 组. 每组数据信息参量及其分布状况见表 1. A、B 两组是二维信息相关数据组, 模拟前兆异常幅度  $u$  与地震

表 1 模拟数据文件一览表

数据文件	记录数	信息参量	参量分布概况
A	5 000	$u, m$	$m$ 均匀随机, $u$ 正态分布 $N(3.0\%, 1.5\%)$
B	5 000	$u, m$	$m$ 均匀随机, $u$ 正态分布 $N(3.0\%, 0.5\%)$
C	5 000	$u, t, m$	$u, t, m$ 均匀随机分布
D	4 842	$u, t, m$	$u, t$ 均匀随机, $m$ 负指数分布

震级  $m$  之间关系.  $m$  范围为 4.0~7.0, 可等间距划分为 3 个子域( $4.0 \leq m < 5.0$ ,  $5.0 \leq m < 6.0$ ,  $6.0 \leq m < 7.0$ ),  $u$  范围为  $-2.2\% \sim 7.8\%$ , 以 3.0% 为中心划为 9 个子域( $-2.2\% \leq u < -0.5\%$ ,  $-0.5\% \leq u < 0.5\%$ ,  $0.5\% \leq u < 1.5\%$ ,  $1.5\% \leq u < 2.5\%$ ,  $2.5\% \leq u < 3.5\%$ ,  $3.5\% \leq u < 4.5\%$ ,  $4.5\% \leq u < 5.5\%$ ,  $5.5\% \leq u < 6.5\%$ ,  $6.5\% \leq u < 7.8\%$ ). 尽管两组数据中的  $u$  都服从 3.0% 为期望的正态分布(刘德贵等, 1993), 但在 A 组中  $u$  的方差较大, 为 1.5%; B 组中的较小, 为 0.5%. A 组中  $u$  的方差大, 数据离散程度大, 从  $u_1$  至  $u_9$  的各个子域中都有信息分配, 而在均值 3.0% 所在的子域  $u_5$  中信息最集中(表 2). B 组中  $u$  的方差小, 信息主要分配在  $u_4, u_5, u_6$  几个子域, 3.0% 所在子域  $u_5$  中信息最集中(表 3). 从表 2 和表 3 看, 模糊信息矩阵反映了这种差异. 从  $u_5$  开始, 表 3 中数据向两侧收敛到零的速度比表 2 的速度快得多.

表 2 数据文件 A 的模糊信息分配矩阵

$m$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$
$m_1$	0.047	0.130	0.434	0.789	0.928	0.737	0.375	0.147	0.041
$m_2$	0.033	0.150	0.433	0.803	1.000	0.846	0.412	0.147	0.051
$m_3$	0.029	0.107	0.394	0.782	0.888	0.806	0.376	0.137	0.027

表 3 数据文件 B 的模糊信息分配矩阵

<i>m</i>	<i>u</i> <sub>1</sub>	<i>u</i> <sub>2</sub>	<i>u</i> <sub>3</sub>	<i>u</i> <sub>4</sub>	<i>u</i> <sub>5</sub>	<i>u</i> <sub>6</sub>	<i>u</i> <sub>7</sub>	<i>u</i> <sub>8</sub>	<i>u</i> <sub>9</sub>
<i>m</i> <sub>1</sub>	0.000	0.000	0.004	0.243	0.923	0.226	0.003	0.000	0.000
<i>m</i> <sub>2</sub>	0.000	0.000	0.002	0.251	1.000	0.248	0.004	0.000	0.000
<i>m</i> <sub>3</sub>	0.000	0.000	0.001	0.214	0.931	0.224	0.002	0.000	0.000

*C*, *D* 两组是三维信息相关数据. 与二维相比, 增加了一项前兆异常持续时间 *t*. *m* 范围仍为 4.0~7.0, 等间距划为 3 个子域(4.0≤*m*<5.0, 5.0≤*m*<6.0, 6.0≤*m*<7.0); *u* 范围为-8%~8%, 等间距划为 4 个子域(-8%≤*u*<-4%, -4%≤*u*<0%, 0%≤*u*<4%, 4%≤*u*<8%); *t* 范围为 1~1 000 天, 等间距分为 5 个子域(0<*t*≤200, 200<*t*≤400, 400<*t*≤600, 600<*t*≤800, 800<*t*<1 000). *C* 组数据中 *m*, *u*, *t* 均为随机均匀分布(刘德贵等, 1993), 故表 4 信息在各节点基本上也是均匀随机分布, 看不出优势分布, 反映了 *C* 组的数据结构. *D* 组数据与 *C* 组不同之处是 *m* 呈负指数分布, 落于 *m*<sub>1</sub>, *m*<sub>2</sub>, *m*<sub>3</sub> 地震次数指数减少. 在 *u*, *t* 随机均匀分布时, 位于 *m*<sub>1</sub>, *m*<sub>2</sub>, *m*<sub>3</sub> 域的 *u*, *t* 信息量自然也呈指数减小. 表 5 充分反映了这一点.

表 4 数据文件 C 的模糊信息分配

<i>t</i>	<i>m</i> <sub>1</sub>				<i>m</i> <sub>2</sub>				<i>m</i> <sub>3</sub>			
	<i>u</i> <sub>1</sub>	<i>u</i> <sub>2</sub>	<i>u</i> <sub>3</sub>	<i>u</i> <sub>4</sub>	<i>u</i> <sub>1</sub>	<i>u</i> <sub>2</sub>	<i>u</i> <sub>3</sub>	<i>u</i> <sub>4</sub>	<i>u</i> <sub>1</sub>	<i>u</i> <sub>2</sub>	<i>u</i> <sub>3</sub>	<i>u</i> <sub>4</sub>
<i>t</i> <sub>1</sub>	0.86	0.77	0.71	0.88	0.68	0.73	1.00	0.77	0.94	0.93	0.65	0.90
<i>t</i> <sub>2</sub>	0.75	0.67	0.76	0.78	0.74	0.99	0.93	0.69	0.94	1.00	0.71	0.91
<i>t</i> <sub>3</sub>	0.86	0.67	0.73	1.00	0.55	0.89	0.87	0.80	0.87	0.80	0.71	0.69
<i>t</i> <sub>4</sub>	0.74	0.61	0.71	0.91	0.83	0.78	0.78	0.87	0.91	0.81	0.71	0.93
<i>t</i> <sub>5</sub>	0.72	0.74	0.80	0.75	0.67	0.85	0.99	0.83	0.84	0.76	0.68	0.72

表 5 数据文件 D 的模糊信息分配

<i>t</i>	<i>m</i> <sub>1</sub>				<i>m</i> <sub>2</sub>				<i>m</i> <sub>3</sub>			
	<i>u</i> <sub>1</sub>	<i>u</i> <sub>2</sub>	<i>u</i> <sub>3</sub>	<i>u</i> <sub>4</sub>	<i>u</i> <sub>1</sub>	<i>u</i> <sub>2</sub>	<i>u</i> <sub>3</sub>	<i>u</i> <sub>4</sub>	<i>u</i> <sub>1</sub>	<i>u</i> <sub>2</sub>	<i>u</i> <sub>3</sub>	<i>u</i> <sub>4</sub>
<i>t</i> <sub>1</sub>	1.00	0.96	0.95	1.00	0.13	0.16	0.14	0.12	0.01	0.01	0.00	0.00
<i>t</i> <sub>2</sub>	0.94	1.00	0.97	0.89	0.13	0.13	0.15	0.11	0.01	0.00	0.01	0.00
<i>t</i> <sub>3</sub>	0.89	0.92	0.98	0.91	0.12	0.10	0.13	0.15	0.00	0.01	0.00	0.00
<i>t</i> <sub>4</sub>	0.97	0.88	0.91	0.99	0.14	0.13	0.16	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>t</i> <sub>5</sub>	0.82	0.89	1.00	0.85	0.15	0.11	0.13	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00

从以上 4 项模拟数据的结果可以清楚地看出, 模糊关系矩阵较准确地反映了模拟前兆异常要素与地震要素之间的关系, 验证了方法的可行性.

由模糊关系矩阵并利用式(7)、(8), 可得到模糊近似推论. 现以 *C*, *D* 三维模糊信息相关为例. 若 *u*=4%, *t*=600 天, 分别得到

$$m = \frac{33.5\%}{m_1} + \frac{32.1\%}{m_2} + \frac{34.4\%}{m_3} \quad (C \text{ 模式})$$

$$m = \frac{84.5\%}{m_1} + \frac{15.1\%}{m_2} + \frac{0.4\%}{m_3} \quad (D \text{ 模式})$$

表明当某前兆异常幅度达 4%, 且异常持续时间为 600 天时, 对于 *C* 模式, 预测发生地震震级 4.0~4.9, 5.0~5.9, 6.0~6.9 的可能性分别为 33.5%, 32.1% 和 34.4%. 然而对于

D 模式，发生上述各档次地震则为 84.5%，15.1% 和 0.4%。这与我们数值模拟的期望是一致的。

3 霍山小震频次与地震关系

安徽霍山地区小震活动频次与周围较大地震发生似乎有某种联系。当小震频发时，周围可能有较大地震发生，人们称之为“霍山窗口效应”(张光华，权义衍，1992)。在数值模拟的基础上，借助于模糊信息处理方法，对霍山窗小震月频次与地震震级之间的关系进行研究。取霍山窗(31°~31°50'N, 115°45'~116°30'E)内  $M_L \geq 1.0$  地震计算，自 1970~1996 年的月频次为  $f$ ， $f$  分为 5 个子域( $0 < f \leq 20$ ， $20 < f \leq 40$ ， $40 < f \leq 60$ ， $60 < f \leq 80$ ， $f > 80$ )。取华东地区(29°~37°N, 113°~124°E)与霍山佛子岭地震台距离  $\Delta < 100$  km， $M_L \geq 4.0$ ； $\Delta < 250$  km， $M_L \geq 4.5$ ； $\Delta < 500$  km， $M_L \geq 5.4$ ； $\Delta \geq 500$  km， $M_L \geq 6.3$  的地震，组成地震震级序列  $M_L$ 。 $M_L$  分为 4 个子域[ $M_L < 4.0$ (无震)， $4.0 \leq M_L < 4.5$ ， $4.5 \leq M_L < 5.4$ ， $5.4 \leq M_L < 6.4$ ]。当月无地震则信息落入  $M_L < 4.0$  子域。当取小震月频次由全部  $f$  和  $M_L$  数据得到的模糊关系矩阵列于表 6a。从模糊矩阵中可见，当  $f \leq 40$ 、 $M_L < 4.0$  时其信息量最大。当  $f > 40$ 、 $M_L \geq 4.0$  时的信息量为 0.034，大于  $f \leq 40$ 、 $M_L \geq 4.0$  的信息量(0.026)，表明此时月频次出现高值后发生地震的可能性大于不发生地震的可能性，所以可用 40 次作为异常出现的界线。霍山 27 年中月频次大于 40 次时段有 9 次，其中 7 次对应地震，虚报两次，另有 8 次地震漏报。以上模糊信息分配矩阵与这一基本事实相吻合。以此矩阵进行外推预测，当某月频次为 55 次时，其出现在 4 个震级论域中的隶属度分别为 29.9%，27.4%，28.2% 和 14.5%，表明有震隶属度(70.1%)大于无震隶属度(29.9%)，发生 4.0~5.4 之间地震的隶属度为 55.6%(27.4%+28.2%)。若某月频次为 35 次，出现在 4 个震级论域中的隶属度分别为 86.3%，4.7%，1.2% 和 7.0%，无震的隶属度高达 86.3%。

表 6a 霍山小震月频次与附近中等地震模糊关系

$M_L$	$f \leq 20$	$20 < f \leq 40$	$40 < f \leq 60$	$60 < f \leq 80$	$f > 80$
$M_L < 4.0$	1.000	0.066	0.009	0.004	0.000
$4.0 \leq M_L < 4.5$	0.007	0.004	0.009	0.000	0.000
$4.5 \leq M_L < 5.4$	0.001	0.001	0.009	0.007	0.003
$5.4 \leq M_L < 6.4$	0.007	0.006	0.005	0.001	0.000

表 6b 是将  $f$  的论域变为 6 个子域( $0 < f \leq 25$ ， $25 < f \leq 40$ ， $40 < f \leq 55$ ， $55 < f \leq 70$ ， $70 < f \leq 85$ ， $f > 85$ )。从表 6a，b 看出，尽管  $f$  论域划分对结果有一定影响，但基本模糊关系特征未改变。表明这种方法是稳定的，其用于实际地震前兆异常要素与地震震级要素分析的关系是可行的。

表 6b 霍山小震月频次与附近中等地震模糊关系

$M_L$	$f \leq 25$	$25 < f \leq 40$	$40 < f \leq 55$	$55 < f \leq 70$	$70 < f \leq 85$	$f > 85$
$M_L < 4.0$	1.000	0.020	0.008	0.005	0.000	0.000
$4.0 \leq M_L < 4.5$	0.007	0.003	0.006	0.002	0.000	0.000
$4.5 \leq M_L < 5.4$	0.002	0.000	0.007	0.004	0.000	0.003
$5.4 \leq M_L < 6.4$	0.010	0.003	0.004	0.002	0.000	0.000

如果使用过去的线性回归方法，取  $M_L \geq 4.0$  地震的震级及有震发生时的月频次，就得

不到能通过数学检验有效的线性回归方程,因而也就不可能进行外推预报.用模糊数学方法给出不同震级档次的隶属度,显然更合乎客观实际,更好地反映了前兆与地震之间的复杂关系.前兆与地震之间的非一一对应关系,可用隶属度作为不同震级的信度,从而改变了目前完全凭经验给出预报信度的状况.

## 4 结语

用模糊信息处理方法研究前兆异常要素与地震要素的模糊关系,与传统上统计相关不同,它带有模糊性.事实上地震孕育过程很复杂,前兆异常与地震不可能一一对应,具有模糊性和不确定性.采用模糊关系研究前兆异常要素和地震要素关系,较好地处理了这些难题;同时可以全面地概括异常与地震要素之间的有异常无震,或有震无异常,以及不同异常量级和预报量级之间的关系.在得到关系矩阵之后,在新的异常出现时,可以推论预报参量在其论域中的权重,得到一个全面的预报隶属度分布.这一分布可定量地表明异常与地震要素不同论域的关系,可以改变目前完全凭人为经验给出预报可信度的状况.同时,随着资料的积累,模糊矩阵在不断地吸收新信息后可不断更新,其反映异常要素与地震要素之间关系的可靠性可不断提高.

## 参 考 文 献

- 梅世蓉,冯德益,张国民,等. 1993. 中国地震预报概论. 北京:地震出版社, 466
- 王家鼎. 1988. 模糊数学在西北地区场地震害预测中的应用. 西北地震学报, 10(1): 24~31
- 王家鼎. 1985. 砂土震动液化势中的模糊数学方法. 西北地震学报, 7(3): 35~47
- 刘德贵,费景高,于泳江,等. 1993. FORTRAN 算法汇编(第二分册). 北京:国防工业出版社, 458~464, 471~473
- 张光华,权义衍. 1992. 安徽霍山地区地震活动特征研究. 地震学刊, (2): 60~62