第11卷　第4期　　西 北 地 震 学 报　　Vol.11, No.4
1989年12月　NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL　Dec., 1989

利用模糊关系方程预报大华北地区的最大震级范围

陈大业　王秀文
（山西省地震局）

摘　　要

本文选取了判别每年可能发生的地震的最大震级范围的16项指标，对大华北地区1960年至1986年$M_s \geqslant 4.0$级的地震（余震除外）序列进行了处理，给出了判别三种震级范围即$M_s \leqslant 6.0$、$6.0 < M_s < 7.0$、$M_s \geqslant 7.0$的模糊关系方程。对此方程通过7个震例进行了预报检验，结果均与实际符合较好。本文还对1987年大华北地区可能发生的地震的最大震级范围进行了估计，结果为$M_s \leqslant 6.0$。

一、引　言

震级作为一个预报量，从数学的角度讲它是多一个元函数。而预报的复杂性在于，迄今为止人们还很难找出不同的震级受哪些“元”的控制，在这些“元”中哪些“元”起着主导的作用。也就是说，预报量与预报因子之间以及各预报因子之间存在着模糊关系。基于此，本文以大华北地区发生的地震为例，对不同震级确定出响应的预报因子，解出模糊关系方程，再进行预报检验，试图探索模糊关系方程在预报最大震级范围中的应用。

二、预报方程的建立

1.资料及预报因子的选取与处理

大华北地区的范围为：北纬31°—43°，东经105°—115°。时间区域取1960年至1986年10月。文中资料选自《中国东部地震目录》，选取$M_s \geqslant 4.0$级的地震共800多个。计算时不考虑5.0级以上地震的余震。对主震震级为$5.0 \leqslant M_s < 6.0$的震群序列，其余震的范围确定为距主震20km以内，活动时间为主震后半年内。对主震震级为$6.0 \leqslant M_s < 7.0$的震群序列，其余震的范围确定为距主震30km以内，活动时间为主震后2年。对4次主震震级$M_s \geqslant 7.0$的震群序列，所确定的余震活动范围及时间段见表1。

本文试图用前4年4.0级以上地震的活动指标来预测下一年6.0级以上地震发生的可能性。选取4个活动特征指标（震级的判别指标），即x'_1、x'_2、x'_3、x'_4。x'_1为每年$M_s \geqslant 4$

表 1　大华北地区4次7级以上地震的余震活动范围及时间

主震 \ 余震范围	北纬	东经	活动时间
1966年3月22日邢台7.2	37°00′～38°00′	114°26′～115°40′	1966～1984
1969年7月18日渤海7.4	30°00′～38°24′	119°30′～119°54′	1969～1986年10月
1976年7月28日唐山7.8	39°00′～40°10′	117°30′～119°00′	1976～1986年10月
1975年2月4日海城7.3	40°30′～40°50′	122°20′～123°00′	1975～1986年10月

地震的次数；x'_2为每年的最大震级；x'_3为每年$M_s\geqslant4.0$级地震的次数与前一年相应次数的差的绝对值；x'_4为每年的最大震级与前一年相应的震级的差的绝对值。1960—1986年4个指标的取值情况见表2。

表 2

指标 \ 年	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
x'_1	4	7	19	6	13	19	24	19	9	38	12	25	8	14	9	9
x'_2	5.0	5.8	5.5	5.4	4.9	5.5	7.2	6.3	4.7	7.4	5.1	5.1	4.8	5.3	5.5	7.3
x'_3		3	12	13	7	6	5	5	10	29	26	13	17	6	5	0
x'_4		0.8	0.3	0.1	0.5	0.6	1.7	0.9	1.6	2.7	2.3	0	0.3	0.5	0.2	1.8

指标 \ 年	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
x'_1	15	10	10	11	6	10	5	9	10	13	12
x'_2	7.8	4.5	4.4	6.0	4.6	5.6	5.5	5.8	6.3	5.9	5.1
x'_3	6	5	0	1	5	4	5	4	1	3	1
x'_4	0.5	3.3	0.1	1.6	1.4	1.0	0.1	0.3	0.5	0.4	0.8

建模时，对于$M_s\leqslant6.0$的地震且在$M_s\in[5.5,\ 6.0]$区间的6个地震中选5个样本，再在1960年—1986年发生的6次$M_s>6.0$级地震中选5个样本，用这10个样本作为建立模糊关系方程的子样（所取子样见表3）。

为了便于分析比较，首先将这10个样本按下式进行正规化，以去掉量纲。

$$x_{ij}=\frac{x'_{ij}-x'_{(min)i}}{x'_{(max)i}-x'_{(min)i}}。$$

式中x'_{ij}为原始数据，$x'_{(min)i}$为各样本第i个指标中的最小值，$x'_{(max)i}$为各样本第i个指标中的最大值。然后按$M_s\leqslant6.0$，$6.0<M_s<7.0$，$7.0\leqslant M_s<8.0$进行“硬性分类”，用每一类的平均样本作为典型样本，这样便得到三个典型样本Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ。对于每个典型样本，以其每个相同指标的平均值作为衡量这一典型样本的水平指标，结果见表3。

2.方程的建立与解算结果

令y代表震级，y对$\underset{\sim}{y}$的隶属函数为

表 3 **分类结果及建模数据**

类别	地震	x_1				x_2				x_3				x_4			
Ⅰ $M_S \leqslant 6.0$	1965.1.13 垣曲5.5	0.05	0.70	0.07	0.39	1	0.39	0.48	0.11	0.12	0.71	0.75	0.70	0.24	0.18	0	0.19
	1974.4.22 溧阳5.5	0.36	1	0.21	0.44	0.50	0.25	0.12	0.26	1	0.76	1	0.60	0.70	0	0.13	0.19
	1981.8.13 丰镇5.6	0.21	0.25	0.43	0	0.07	0	0.82	0	0.19	0	0	0.50	1	0.06	1	0.75
	1982.4.14 海原5.5	0.21	0.30	0.07	0.22	0	0.57	0	0.37	0	0.06	0.25	0.40	0.03	0.94	0.87	0.50
	1985.11.30 隆尧5.5	0.21	0	0.29	0.22	0.86	0.39	0.71	0.63	0.15	0.29	0.19	0.10	0.30	0.06	0.13	0.19
	平均震级5.5	0.280				0.376				0.389				0.373			
Ⅱ $M_S \in (6.0, 7.0)$	1967.8.27 河涧6.3	0	0.40	1	1	0.71	0.18	0.53	0.96	0.5	0.41	0.31	0.50	0.03	0.29	0.33	0.94
	1984.5.21 荷泽6.3	0	0.25	0	0.17	0.14	0.43	0.53	0.44	0.19	0.24	0.25	0.40	0.42	0.59	0	0.06
	平均震级6.3	0.350				0.491				0.350				0.334			
Ⅲ $M_S \in (7.0, 8.0)$	1969.7.18 渤海7.4	0.68	0.95	1	0.17	0.79	1	1	0.04	0.23	0.29	0.25	1	0.18	1	0.53	0.88
	1975.2.4 海城7.3	1	0.15	0.64	0.17	0.50	0.14	0.41	0.33	0.50	1	0.32	0.5	0	0.18	0.28	0
	1976.7.28 唐山7.8	0.11	0.45	0.29	0.17	0.29	0.32	0.53	1	0.65	0.35	0.25	0	0.09	0.29	0.07	1
	平均震级7.5	0.481				0.529				0.445				0.374			

$$\mu_{\underset{\sim}{y}}(y)=\begin{cases}0.4, & y\leqslant 6.0;\\ \dfrac{y-1}{10}, & 6.0<y<8.0。\end{cases}$$

则得 $y_{\mathrm{I}}=0.4$，$y_{\mathrm{II}}=0.5$，$y_{\mathrm{III}}=0.6$。

判别指标x对$\underset{\sim}{x}$的隶属函数为

$$\begin{cases}\mu_{\underset{\sim}{x}}(x_1)=x_1+0.1, & \mu_{\underset{\sim}{x}}(x_2)=x_2+0.1,\\ \mu_{\underset{\sim}{x}}(x_3)=x_3+0.2, & \mu_{\underset{\sim}{x}}(x_4)=x_4+0.3。\end{cases}$$

代入数值得

$$\begin{array}{lll} x_{1\mathrm{I}}=0.4 & x_{1\mathrm{II}}=0.5 & x_{1\mathrm{III}}=0.6\\ x_{2\mathrm{I}}=0.5 & x_{2\mathrm{II}}=0.6 & x_{2\mathrm{III}}=0.6\\ x_{3\mathrm{I}}=0.6 & x_{3\mathrm{II}}=0.6 & x_{3\mathrm{III}}=0.6\\ x_{4\mathrm{I}}=0.7 & x_{4\mathrm{II}}=0.6 & x_{4\mathrm{III}}=0.7 \end{array}$$

令 $y=A\circ X$，即

$$(y_{\mathrm{I}},\ y_{\mathrm{II}},\ y_{\mathrm{III}})=(a_1,\ a_2,\ a_3,\ a_4)\circ\begin{pmatrix}x_{1\mathrm{I}} & x_{1\mathrm{II}} & x_{1\mathrm{III}}\\ x_{2\mathrm{I}} & x_{2\mathrm{II}} & x_{2\mathrm{III}}\\ x_{3\mathrm{I}} & x_{3\mathrm{II}} & x_{3\mathrm{III}}\\ x_{4\mathrm{I}} & x_{4\mathrm{II}} & x_{4\mathrm{III}}\end{pmatrix}。$$

代入数值得

$$(0.4,\ 0.5,\ 0.6)=(a_1,\ a_2,\ a_3,\ a_4)\circ\begin{pmatrix}0.4 & 0.5 & 0.6\\ 0.5 & 0.6 & 0.6\\ 0.6 & 0.6 & 0.6\\ 0.7 & 0.6 & 0.7\end{pmatrix}.$$

按y值由大到小的顺序，将x矩阵重新排列：

$$\begin{matrix} 0.6> & 0.5> & 0.4 \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.6 & 0.6 & 0.5 \\ 0.6 & 0.6 & 0.6 \\ 0.7 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}。 \quad (1)$$

对矩阵（1）中的元素，凡大于同一列y值的，记为y值，凡小于或等于同一列y值的不记，于是构成了一个新的矩阵：

$$\begin{pmatrix} & 0.5 & 0.4 \\ & 0.5 & 0.4 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 \end{pmatrix}。 \quad (2)$$

在矩阵（2）上求每行元素的"∧"即为最大解：$\wedge\phi=1$；$0.5\wedge0.4=0.4$；$0.5\wedge0.4=0.4$；$0.6\wedge0.5\wedge0.4=0.4$。则最大解为（1，0.4，0.4，0.4），也可称为上界数。

对矩阵（1）中的每一列元素，凡大于或等于其所对应的y值的，均记为y值，凡小于同一列的y值的，空下原位置不记，于是又重新组成一个新矩阵：

$$\begin{pmatrix} 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 \end{pmatrix}。 \quad (3)$$

对矩阵（3）中的元素，去掉每行中大于该行上界数的元素得

$$\begin{array}{cc} & \text{上界数} \\ \begin{pmatrix} 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ & & 0.4 \\ & & 0.4 \\ & & 0.4 \end{pmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 0.4 \\ 0.4 \\ 0.4 \end{matrix} \end{array} \quad (4)$$

矩阵（4）中各列均有非空元素，据此判定本方程有解。

对矩阵（4）的每列仅选一个非空元素，便可得四个矩阵，并对其每行取"∨"，即可得四组极小解，即（0.6，0，0，0）；（0.6，0.4，0，0）；（0.6，0，0.4，0）；（0.6，0，0，0.4）。

最大解与最小解组合即可得模糊关系方程的4组解为：

[0.6，1]，[0，0.4]，[0，0.4]，[0，0.4]；
[0.6，1]，0.4，[0，0.4]，[0，0.4]；
[0.6，1]，[0，0.4]，0.4，[0，0.4]；
[0.6，1]，[0，0.4]，[0，0.4]，0.4。

三、预报效果检验

我们选取作为预报效果检验的地震样本见表4。按照上述隶属函数的设计，显然$y_A \sim y_F$对$\underset{\sim}{y}$的隶属函数值均为0.4。y_G对$\underset{\sim}{y}$的隶属函数值为0.6。$x_1 \sim x_4$在$\underset{\sim}{x}$上的隶属函数值是：

$$\begin{matrix} x_{1A}=0.4 & x_{2A}=0.6 & x_{3A}=0.4 & x_{4A}=0.9 \\ x_{1B}=0.3 & x_{2B}=0.6 & x_{3B}=0.5 & x_{4B}=0.8 \\ x_{1C}=0.3 & x_{2C}=0.8 & x_{3C}=0.4 & x_{4C}=0.5 \end{matrix}$$

$x_{1D}=0.4$ $x_{2D}=0.5$ $x_{3D}=0.4$ $x_{4D}=0.8$

$x_{1E}=0.4$ $x_{2E}=0.7$ $x_{3E}=0.4$ $x_{4E}=0.9$

$x_{1F}=0.4$ $x_{2F}=0.9$ $x_{3F}=0.5$ $x_{4F}=0.7$

$x_{1G}=0.6$ $x_{2G}=0.5$ $x_{3G}=0.8$ $x_{4G}=0.5$

表 4

地震样本	x_1				x_2				x_3				x_4			
1979.7.9溧阳 $y_A=6.0$	0.16	0.50	0.36	0.22	1	1	0	0	0	0.35	0.25	0	0.54	0.88	1	0
1983.11.7荷泽 $y_B=5.8$	0.26	0	0.36	0	1	0.07	0.59	0.33	0.04	0.29	0.19	0.50	0.48	0.82	0.53	0
1971.6.28吴忠 $y_C=5.1$	0	0.20	0.36	0.39	0.79	0.50	1	0.48	0.19	0.24	0	0.30	0.03	0.18	0.27	0.12
1980.8.9平遥 $y_D=4.6$	0.47	0.25	0.31	0.28	1	0.04	0	0.52	0.23	0.29	0	0.10	0.15	1	0	0.88
1978.6.14西吉西南 $y_E=4.4$	0.16	0.20	0.71	0.22	0.29	1	1	0	0.19	0	0.31	0.50	0.06	1	0.27	1
1977.1.1晋源 $y_F=4.5$	0.42	0.20	0.23	0.44	0.64	0.39	1	1	0.23	0.29	0	0.56	0.15	0.12	1	0.19
1966.3.22邢台 $y_G=7.2$	0.68	0.05	0.57	0.72	0.79	0.36	0.18	0.33	0.46	0.76	0.38	0.60	0.09	0.06	[illegible]	0.25

用建模数据进行验证，4组解中的任一组解均可用于预报。我们仅用第二组解分别对各地震样本进行预报检验。

对于邢台7.2级地震（$Y_G=7.2$）：

$$(y_{\mathrm{I}},\ y_{\mathrm{II}},\ y_{\mathrm{III}})=([0.6,\ 1],\ 0.4,\ [0,\ 0.4],\ [0,\ 0.4])\circ\begin{pmatrix}0.6\\0.5\\0.8\\0.5\end{pmatrix}=[0.6,\ 1]。$$

判为Ⅲ类，即$7.0<M_s<8.0$，与$Y_G=7.2$符合较好。

对于溧阳6.0级地震（$Y_A=6.0$）：

$$(y_{\mathrm{I}},\ y_{\mathrm{II}},\ y_{\mathrm{III}})=([0.6,\ 1],\ 0.4,\ [0,\ 0.4],\ [0,\ 0.4])\circ\begin{pmatrix}0.4\\0.6\\0.4\\0.9\end{pmatrix}=[0.4,\ 1]。$$

判为Ⅰ类，即$M_s\leqslant 6.0$，与$Y_A=6.0$符合较好。

对于荷泽5.8级地震（$Y_B=5.8$）：

$$(y_{\mathrm{I}},\ y_{\mathrm{II}},\ y_{\mathrm{III}})=([0.6,\ 1],\ 0.4,\ [0,\ 0.4],\ [0,\ 0.4])\circ\begin{pmatrix}0.3\\0.6\\0.5\\0.8\end{pmatrix}=[0.4,\ 1]。$$

判为Ⅰ类，即$Ms\leqslant 6.0$，与$Y_B=5.8$符合较好。

同样可检验$Y_C\sim Y_F$，均判为Ⅰ类，与实际基本相符。

我们还利用所给定的模糊关系方程，对1987年华北地区可能发震的最大震级进行了预测，其数据见表5。

将数据代入预报方程，得

$$([0.6,\ 1],\ 0.4,\ [0,\ 0.4],\ [0,\ 0.4])\circ\begin{pmatrix}0.4\\0.8\\0.3\\0.5\end{pmatrix}=[0.4,\ 1]。$$

判为第Ⅰ类，即$M_s \leqslant 6.0$。也就是说，在1987年华北地区发生$M_s > 6.0$级地震的可能性很小。

表 5　预报华北地区1987年最大震级的指标值

项目	x_1				x_2				x_3				x_4			
1987年	0.16	0.25	0.57	0.33	1	0.68	0.77	0.18	0.15	0.06	0.12	0.10	0.09	0.29	0.20	0.38
均值	0.328				0.657				0.109				0.240			
隶属函数值	0.4				0.8				0.3				0.5			

四、结论与讨论

1. 为满足模糊关系方程的解，所预报量的隶属函数值至少不小于一个预报因子的隶属函数值。太大或太小都会造成无解。

2. 在解模糊关系方程中，判别指标x_1起着主导作用，且随$M_s > 6.0$级地震的增加而增加，此因子是否为有效因子有待进一步研究。

3. 我们认为，模糊关系方程在模式识别中有其特殊的优越性，即模糊关系方程一旦建立并检验通过，在外推预报时便不存在人为性。

（本文1987年 6 月11日收到）

参　考　文　献

〔1〕 陈荣华、冯德益，模糊聚类分析及其在地震研究中的应用，地震研究，Vol. 8，No. 5，1985.
〔2〕 贺仲雄，模糊数学及其应用，天津科学技术出版社，1983.
〔3〕 冯德益、楼世博，模糊数学方法与应用，地震出版社，1985.
〔4〕 Chen Daye, A Trial of Fuzzy Relation Equation in the Building of Magnitude Prediction Model, Fuzzy Mathematics in Earthquake Researches (continued volume), Seismological Press, 1986.

APPLICATION OF FUZZY—RELATION EQUATION IN PREDICTING MAXIMUM MAGNITUDE RANGE IN NORTH CHINA

Chen Daye, Wang Xiuwen
(*Seismological Bureau of Shanxi Province*)

Abstract

In this paper, 16 items of 4 factors used in distinguishing magnitude interval related to maximum event that might happen every year are chosen, and the earthquake sequences of $M_S \geqslant 4.0$ (in exception of aftershock) occurred in North China from 1960 to 1986 are dealt with. Fuzzy relation equation of magnitude decision containing 3 magnitude intervals, $M_s \leqslant 6.0$, $6.0 < M_s < 7.0$ and $M_s \geqslant 7.0$ are given. Seven event examples are used to inspect the prediction result of this equation. The result indicates that all of them passed through prediction inspection. This paper also made a estimate that maximum event of which magnitude would be $M_s \leqslant 6.0$ might occur in North China in 1987.

本 刊 启 事

本刊今年第2期刊登的有关纪念兰州地球物理研究所成立三十周年的文章中，当论及1970年成立国家地震局兰州地震大队时的有关组成单位时漏写了兰州地质研究所，这是我们的工作疏忽，特此说明。

《西北地震学报》编辑部