

# 地震活动的灰色预测和地震前兆的灰色判别

张 绍 治

(江苏省地震局)

**摘要** 本文运用灰色系统理论和方法,对地震活动进行灰色预测,表明河北唐山7.8级强震和江苏常熟5.1级中强震建模预测成果良好。对地震前兆数据作新息模型和等维新息模型的异常判别,以及包络模型判别、拓扑模型群判别,可以鉴别出地震前兆异常,实为地震前兆分析的一种新方法。

**关键词** 地震灰色预测 地震前兆灰色判别 新息模型 等维新息模型 包络模型 拓扑模型群

由于地震成因机制的复杂性和人们对地震发生过程认识上的局限性以致于所觉察到的异常现象与地震活动间联系上存在着不确定性,很难找到它们之间明确的映射关系,故此可以认为地震预测是一个本征性灰色系统。本文就地震动和地震前兆行为,特征数据,利用灰色系统理论方法中连续微分方程的建模问题来讨论地震活动的灰色预测和地震前兆的灰色判别。

## 一、地震活动预测和地震前兆判别模型的建立

运用灰色理论可将地震活动和地震前兆视作在一定范围内变化的灰色量,通过将无规律的原始数据作生成后,使其变为较有规律的生成数据,经建立GM灰色模型在一定范围和一定时区内来认识上述两个研究对象的变化过程。将不同的地震区、带内地震发生的间隔期或各别台点上前兆观测数据作原始序列。

$D_i^{(0)} = (D_i^{(0)}(1), D_i^{(0)}(2), \dots, D_i^{(0)}(n_i))$ ,  
 $i$ 表示地震区、带或前兆台站号。作一次累加生成(1-AGO),即

$$D_i^{(1)}(K) = \sum_{m=1}^K D_i^{(0)}(m),$$

$$\begin{aligned} D_i^{(1)} &= (D_i^{(1)}(1), D_i^{(1)}(2), \dots, D_i^{(1)}(n_i)) \\ &= (D_i^{(0)}(1), D_i^{(0)}(1) + D_i^{(0)}(2), \dots \\ &\quad \dots, D_i^{(0)}(n_i - 1) + D_i^{(0)}(n_i)), \end{aligned}$$

可以建立如下微分方程模型(GM(1,D))

$$\frac{d D_i^{(1)}}{dt} + a_i D_i^{(1)} = u_i,$$

方程中的参数列可记为

$$\hat{a}_i = \begin{bmatrix} a_i \\ u_i \end{bmatrix},$$

可按最小二乘法求解 $\hat{a}_i$ ，其矩阵运算式为

$$\hat{a}_i = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T Y_{Ni},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} (D_i^{(1)}(1) + D_i^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2} (D_i^{(1)}(2) + D_i^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ -\frac{1}{2} (D_i^{(1)}(n_i - 1) + D_i^{(1)}(n_i)) & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y_{Ni} = (D_i^{(0)}(2), D_i^{(0)}(3), \dots\dots, D_i^{(0)}(n_i))^T,$$

白化形式微分方程的解为<sup>(1)</sup>

$$\hat{D}_i^{(1)}(K+1) = (D_i^{(0)}(1) - \frac{n_i}{a_i} e^{-a_i K} + \frac{n_i}{a_i}),$$

## 二、地震活动的灰色预测的检验

### 1. 华北地区强震

根据张国民的研究<sup>(2)</sup>，华北地区 $\geq 7$ 级的强震活动自1830年进入第四活动期期间，其强震目录及其大震的时间间隔如表1。

表1 第四活动期内华北地区强震目录

Tab. 1 The schedule of Huabei strong earthquake in the fourth active period.

序 1	发震年月日	地 区	$\varphi$	$\lambda$	震级	时间间隔(年)	
						原始 $D^{(0)}(1)$	生成 $D^{(1)}(1)$
1	1830. 6. 12	河 北 磁 县	36.4	114.2	7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	58	58
	1888. 6. 13	渤 海 湾	38.5	119.0	7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>		
2	1937. 8. 1	山 东 荷 泽	35.2	115.3	7	49	107
3	1966. 3. 22	河 北 宁 晋	37.53	115.05	7.2	29	136
4	1969. 7. 18	渤 海	38.2	119.4	7.4	3	139
5	1975. 2. 4	辽 列 海 城	40.65	112.8	7.3	5	144
6	1976. 7. 28	河 北 唐 山	39.6	118.2	7.8	2	

数据矩阵B

$$B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} (58+107) & 1 \\ -\frac{1}{2} (107+136) & 1 \\ -\frac{1}{2} (136+139) & 1 \\ -\frac{1}{2} (139+144) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -82.5 & 1 \\ -121.5 & 1 \\ -137.5 & 1 \\ -141.5 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y_{N1} = [49, 29, 3, 5]^T,$$

$$\begin{aligned} (B_1^T B_1)^{-1} &= \begin{bmatrix} -82.5 & -121.5 & -137.5 & -141.5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -82.5 & 1 \\ -121.5 & 1 \\ -137.5 & 1 \\ -141.5 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0.0004598 & -0.0555236 \\ -0.0555236 & 6.9544775 \end{bmatrix}, \\ \hat{a}_1 &= \begin{bmatrix} 0.0004598 & -0.0555236 \\ -0.0555236 & 6.544775 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -82.5 & -121.5 & -137.5 & -141.5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} 49 \\ 29 \\ 3 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7810093 \\ 115.8068743 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

微分方程

$$\frac{dD_1^{(1)}}{dt} + 0.7810093 D_1^{(1)} = 115.8068743,$$

时间响应函数

$$\hat{D}_1^{(1)}(K+1) = -90.2784809 e^{-0.7810093K} + 148.2784809,$$

根据上述函数式计算出唐山地震发震时间与海城地震间隔时间为2.46年，与实际相差为0.5年。

## 2. 江苏地区中强震

江苏地区自1974年以来在省填内发生 $\geq 5$ 级的中强震如表2。

表2 1974年以来江苏省境内发生的中强震

Tab. 2 The moderate earthquakes in jingsu Province since 1974.

序 i	发震年月日	发震地点	$\varphi$	$\lambda$	震级	时间间隔(天)	
						原始 $D^{(0)}(i)$	生成 $D^{(1)}(i)$
1	1974. 4. 22	溧 阳	31.4	119.3	5.5	498	498
	1975. 9. 2	南 黄 海	32.9	121.8	5.3	1405	1903
2	1979. 7. 9	溧 阳	31.5	119.3	6.0	1776	3679
3	1984. 5. 21	南 黄 海	32.6	121.6	6.2	1002	4681
4	1987. 2. 17	射 阳	33.6	120.5	5.1	1088	
5	1990. 2. 10	常 熟	31.73	121.0	5.1		

根据前面5次地震活动间隔期建立原始序列来检验常熟地震的发生时间，其数据矩阵为

$$B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(498+1903) & 1 \\ -\frac{1}{2}(1903+3679) & 1 \\ -\frac{1}{2}(3679+4681) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1200.5 & 1 \\ -2791 & 1 \\ -4180 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y_{N_2} = [1405, 1776, 1002]^T,$$

$$(B_2^T B_2)^{-1} = \begin{bmatrix} -1200.5 & -2791 & -4180 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1200.5 & 1 \\ -2791 & 1 \\ -4180 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1.096635 \times 10^{-7} & -0.000367141 \\ -0.000367141 & 1.47914734 \end{bmatrix},$$

$$\hat{a}_2 = \begin{bmatrix} 0.126402 \\ 1738.630781 \end{bmatrix}$$

$$\text{微分方程 } \frac{dD_2^{(1)}}{dt} + 0.126402 D_2^{(1)} = 1738.630781,$$

时间响应函数为

$$\hat{D}_2^{(1)}(K+1) = -13256.79408 e^{-0.1264018K} + 13754.79408,$$

由此得出距离1987年2月17日(发生江苏射阳5.1级地震)时间间隔为1078天将再度发生中强地震。实际上1990年2月10日发生的常熟地震距离射阳地震为1088天。相差仅10天。

### 3. 误差检验

上述两例模型原点误差(残差)检验如下表(表3)。从表内所列数值可以看出通过原

表3 地震活动预测灰色模型的误差检验

Tab. 3 The error check of grey pattern against judgement of seismic precursor.

地震名称	与上个地震发生时间的距离		残 差 检 验	
	模型计算值	实 际 值	量 值	%
辽宁海城	5.3081年	5天	0.3081年	-6.162
江苏射阳	1002.73天	1002天	0.73天	-0.00729

点误差检验模型的精度, 所获结果表明, 是可以满足中期预报的要求的。

## 三、地震前兆的灰色判别

### 1. 灰色模型对前兆趋势的判别

灰色判别的方法是以正常时段或者加上异常先期阶段的前兆观测数据建立灰色模型GM(1, 1), 来预测发展趋势, 鉴别异常。以江苏省南通台短水准测量1988年至1990年高差资料为例说明灰色模型对前兆趋势的判别。南通台短水准N—S<sub>1</sub>测线以大角度斜向跨越区内活动性较强的NWW向断层, N点和S<sub>1</sub>点标石都建在完整的基岩上, 岩石为泥盆系石英

砂岩,平时之观测中误差 $\leq \pm 0.05\text{mm}$ ,1988年12月在测值平稳的背景上产生突变,高差量级为 $0.86\text{mm}$ ,构成常熟5.1级地震的中期形变前兆异常。1989年10月测值产生大幅度下降,12月份曲线又折转上升,构成“U”字形的短期异常,幅度达 $1.26\text{mm}$ ,于震前相对平静10日后发生了5.1级地震。选取5种干扰因子逐步回归分析表明,仅井水位与高差测值有弱相关关系,经改正后不影响曲线异常形态。对于原始数列 $D_3^{(0)}$ 经用新息模型和等维新息模型

表4 南通短水准N—S<sub>1</sub>测线高差新息模型表

Tab. The new message grey pattern of leveling increment (N—S<sub>1</sub>) at Nantang Station

序	K 值	预测日期	预测对象	模 型 表 达 式	模型原点残差	
					绝对值	百分比%
1	11	1988. 12	$D_3^{(1)}(K+1)$	$-1478.864622e^{-0.00460952k} + 1485.899622$		
2	12	1989. 1	"	$-19322.65954e^{-0.000347604k} + 19329.59454$	0.621	8.727
3	13	1989. 2	"	$1718.20465e^{0.00384565k} - 1711.26965$	0.718	9.692
4	14	1989. 3	"	$1062.2444e^{0.00615883k} - 1055.2794$	0.462	6.247
5	15	1989. 4	"	$805.9954382e^{0.008045259k} - 799.0104382$	0.4375	5.799
6	16	1989. 5	"	$692.1516896e^{0.0093075956k} - 685.2166896$	0.3384	4.44
7	17	1989. 6	"	$643.1926628e^{0.009979065k} - 636.2576628$	0.209	2.734
8	18	1989. 7	"	$615.8768364e^{0.010396058k} - 608.9418364$	0.151	1.958
9	19	1989. 8	"	$625.7713074e^{0.010241596k} - 618.8363074$	-0.049	-0.643
10	20	1989. 9	"	$638.2819208e^{0.010053397k} - 631.3469208$	-0.072	-0.939
11	21	1989. 10	"	$652.1521225e^{0.00985335k} - 645.2171225$	-0.087	-1.128
12	22	1989. 11	"	$713.4265388e^{0.00905963k} - 706.4915388$	-0.414	-5.56
13	23	1989. 12	"	$906.9454099e^{0.00722652k} - 900.0104099$	-1.073	-15.84
14	24	1990. 1	"	$1236.751947e^{0.00537657k} - 1229.816947$	-1.202	-18.46
15	25	1990. 2	"	$1559.542164e^{0.004300815k} - 1552.607164$	-0.769	-11.34
16	26	1990. 3	"	$1976.084636e^{0.0034192119k} - 1969.149636$	-0.686	-10.13
17	27	1990. 4	"	$2167.330539e^{0.0031254k} - 2160.395539$	-0.249	-3.49
18	28	1990. 5	"	$2202.406896e^{0.003076959k} - 2195.471996$	-0.046	-0.629
19	29	1990. 6	"	$2112.539627e^{0.003204054k} - 2105.604627$	0.12	1.6

$D_3^{(0)} = (6.935, 6.748, 7.03, 6.646, 6.621, 6.69, 6.6, 6.485, 6.595, 6.621, 6.59, 7.116, 7.408, 7.395, 7.545, 7.621, 7.645, 7.71, 7.621, 7.665, 7.711, 7.443, 6.776, 6.511, 6.78, 6.77, 7.126, 7.315, 7.498)$ ,

两种方法进行前兆判别,均反映出常熟地震前具有明显的前兆异常(图1)(表4、5)。

通过表列的递进模型表达式, 可以看出在进入异常段后, 原点残差一般在百分之几的量级上。在进入短期异常后, 原点残差达到百分之十至二十之间。而在1988年11月以前量级很小, 可用以鉴别出较好的模型精度。

表5 南通短水准N—S<sub>1</sub>测线高差等维新息模型表  
Tab. 5 The equidimensional new message pattern of leveling incement (N—S<sub>1</sub>) at Nantang Station.

序	K 值	预期日期	预测对象	模 型 表 达 式	模型原点残差	
					绝对值	百分比%
1	21	1989. 10	$D_2^{(1)}(K+1)$	$652.1521225e^{0.00985335k} - 645.2171225$	-0.087	-1.128
2	"	1989. 11	"	$674.0398348e^{0.0096049639k} - 667.2918348$	-0.451	-6.059
3	"	1989. 12	"	$772.1225689e^{0.00846895k} - 765.0925689$	-1.173	-17.31
4	"	1990. 1	"	$1093.219355e^{0.00612217k} - 1086.573355$	-1.284	-19.72
5	"	1990. 2	"	$1564.885291e^{0.00435846k} - 1558.204291$	-0.802	-11.83
6	"	1990. 3	"	$2541.334927e^{0.0027299k} - 2534.644927$	-0.674	-9.956
7	"	1990. 4	"	$4396.194235e^{0.001602k} - 4389.594235$	-0.172	-2.414
8	"	1990. 5	"	$14615.04308e^{0.00049011k} - 14608.55808$	0.102	1.394
9	"	1990. 6	"	$34032.78693e^{-0.000123289k} + 34039.38183$	0.329	4.121

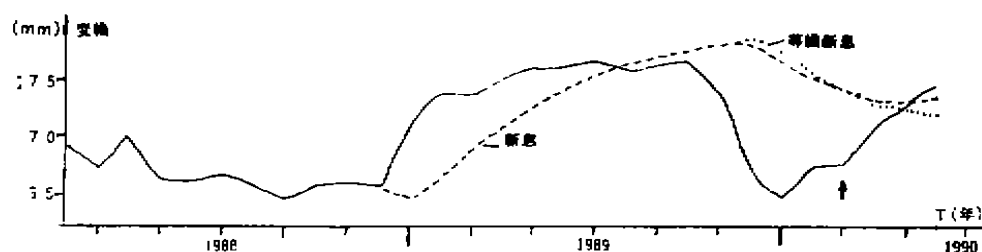


图1. 江苏南通短水准N—S<sub>1</sub>高差灰色新息模型和等维新息模型递进预测曲线  
Fig. 1 The progressive and predicted curve of vertical deformation as new message grey pattern and equidimensional message pattern at Nantang Station, Jiangsu

## 2. 灰色包络模型对数据异常的判别

在地壳变动平稳的期间内, 具有固定的变化周期和稳定变化形态的规测数据, 可以使用灰色包络模型对数据发展趋势作出预测并判别异常。山东安丘钻孔应力观测孔深度30米, 岩性为灰岩。资料观测质量优秀。其测值年变规律较为明显, 每年均有一个测值高峰和低谷, 与大气温差的周年变化相一致。在震情正常的年份内, 其年高低极差波动在一个稳定的区间内。这种情况使我们有可能对系列离散数据建立起包络模型。波动的曲线观测值常态下应

该变化在上包络模型曲线与下包络模型曲线之间，如果突出了这个区间，则认为属于趋势性的异常变化。

用1971年至1990年的资料分两段分别建立包络模型。其中71至73年段的上包络模型为：

$$X_{\text{Sup}}^{(1)}(k+1) = 228980e^{0.004662k} - 227914 ,$$

下包络模型为：

$$X_{\text{inf}}^{(1)}(k+1) = 9.763 \times 10^{11} \times e^{9.7k \times 10^{-10}} - 9.763 \times 10^{11} ,$$

由两条包络线的限约，可以判读出1974至1976年间由于海城地震和唐山地震的孕育所表现出测值的明显异常（图2）。唐山地震结束后的1979年至1981年资料建立的上包络模型为：

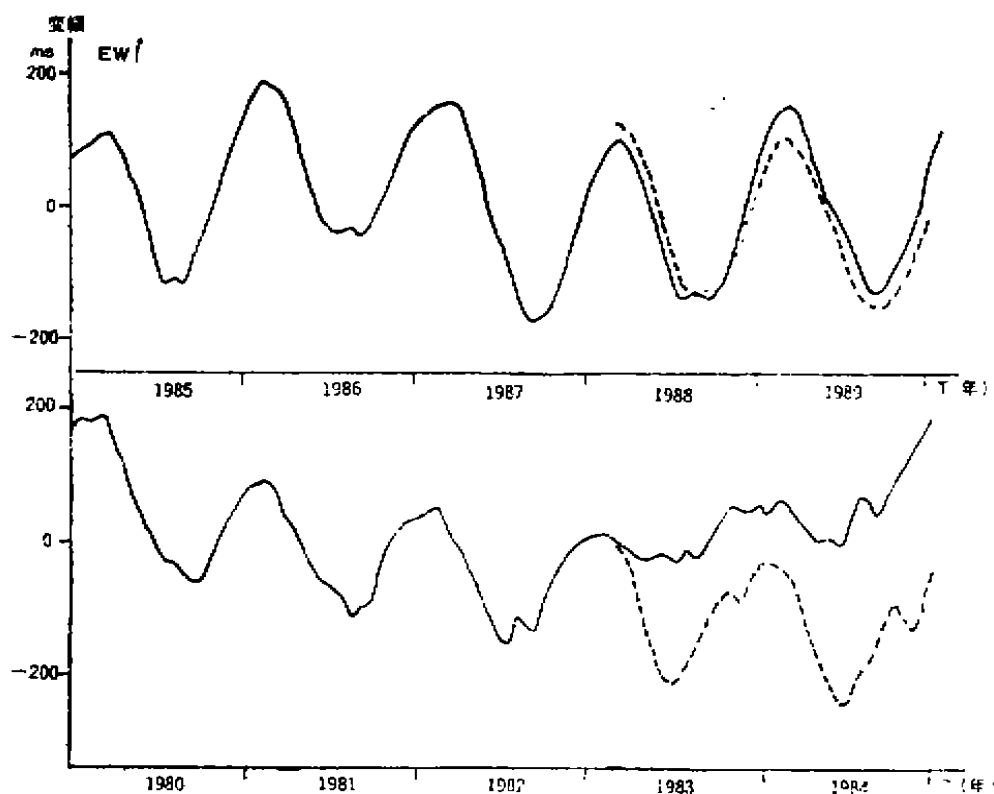


图2 山东安丘钻孔应力测值灰色包络模型副绘出的强震前兆

Fig. 2 Strong earthquake precursor of value of borehole stress measuring value picked by grey envelope pattern at Anqu Station, Shandong

$$X_{\text{Sup}}^{(1)}(k+1) = -398945.6e^{-0.002646k} + 400007.6 ,$$

下包络模型为：

$$X_{\text{inf}}^{(1)}(k+1) = -242292.1e^{-0.003819k} + 243230.1 ,$$

由此判读1982年至1986年本台均无明显的前兆异常。

### 3. 灰色拓扑模型群对异常的判别

对于任意形状的测值波形变化, 可以采用拓扑模型群对数据发展趋势作出预测。以江苏徐州大黄山目视水管仪1980年至1989年的资料为例, 在 $X^{(0)}$ 曲线上, 取一组定值 $\xi_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 然后预测每一阈值 $\xi_i$ 所对应的未来时刻, 将未来时刻所有 $\xi_i$ 按时间顺序联成曲线, 便可得到预测波形。综观大黄山10年资料, 图形具有年变规律, 但在1984年南黄海6.2级地震前后测值图形与基本图形构成反差, 显然系地震孕育所致的前兆反映。故此为检验方法的可行性应将全部数据样本分为两个时段, 即1980—1984年与1985—1989年, 分别以前三年的资料作原始序列, 对后两年的信息进行拓扑预测和检验。

1985年至1989年段, 取2个月作为阈值间隔, 得到离散函数序列为:

$$\hat{X}_1^{(1)}(k+1) = -15870e^{-0.0444k} + 16480,$$

$$\hat{X}_3^{(1)}(k+1) = -17405e^{0.00333k} - 16835,$$

$$\hat{X}_5^{(1)}(k+1) = -21160e^{-0.02198k} + 21570,$$

$$\hat{X}_7^{(1)}(k+1) = -1763.3e^{-0.3k} + 2193.3,$$

$$\hat{X}_9^{(1)}(k+1) = -2160.8e^{-0.2796k} + 2660.8,$$

$$\hat{X}_{11}^{(1)}(k+1) = -3608.2e^{-0.1913k} + 4238.2,$$

预测曲线的形态如图3所示。可见预测的曲线形态与实际的曲线形态两者基本上相符, 表明此时段本区地壳处于平稳的状态, 没有前兆异常的显示。

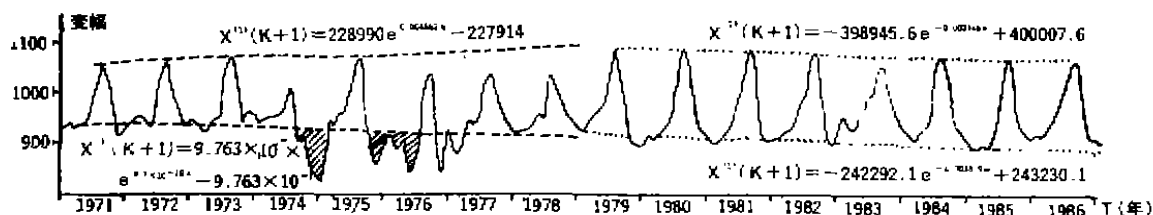


图3 江联徐州大黄山目视水管仪测值灰色拓扑预测

Fig. 3 The grey topological prediction of value of eye observation horizontal instrument at Xuzhou Dahuangshan, Jiangsu

1980年至1984年时间段内, 同样以2个月作为阈值间隔, 其离散函数的系列为:

$$\hat{X}_1^{(1)}(k+1) = -2964.5e^{-0.1389k} + 3434.5,$$

$$\hat{X}_3^{(1)}(k+1) = -2722.5e^{-0.129k} + 3147.5,$$

$$\hat{X}_4^{(1)}(k+1) = -1500e^{-0.222k} + 1875,$$



$$\hat{X}_6^{(1)}(k+1) = -892.9e^{-0.3256k} + 1222.9 ,$$

$$\hat{X}_7^{(1)}(k+1) = -902.5e^{-0.2353k} + 1152.5 ,$$

$$\hat{X}_8^{(1)}(k+1) = -4840e^{-0.04651k} + 5070 ,$$

$$\hat{X}_{11}^{(1)}(k+1) = -3111.4e^{-0.112k} + 3481.4 ,$$

预测曲线形态如图3—b所示。表明了预测值与实际观测值有较大的差异，实际观测体现了南黄海6.2级地震前，始于1983年初的前兆异常。

由于拓扑预测是GM(1, 1)模型群体预测，所以其预测是整体性的全波形预测，用以判估序列未来发展的总趋势是可行的。

## 四、结 束 语

GM灰色模型可以对地震活动进行预测和对异常数据进行前兆判别，根据观测数据的常态变化规律，可以分别采用新息和等维新息模型预测、包络模型预测、拓扑模型群预测等不同灰色系统方法对数据异常进行判别。地震预报这门学科在目前的科学水平下还属于灰色系统，因此，运用灰色理论分析处理问题，其方法是可行的。经过原点误差检验，地震活动的灰色预测和常态下前兆的灰色判别模型精度较好。

## 参 考 文 献

- [1] 邓聚龙，灰色系统基本方法，华中理工大学出版社，1988。
- [2] 张国民，傅征祥，华北强震的时间分布及物理解释，地理物理学报，1985，28(6)。

# GREY PREDICTON OF SEISMICITY AND GREY JUDGEMENT OF SEISMIC PRECURSOR

Zhang Shaozi

( Seismological Bureau of Jiangsu Province )

[Abstract] In this paper, seismicity is predicted by the theory and the method of grey system. The result displays well effect of grey pattern of Tangshan earthquake ( Ms=7.8 ) and Jingsu Changshu earthquake ( Ms=5.1 ). The data of seismic precursor is differentiated by new message pattern, equidimensional new message patter, envelope pattern, lopological pattern swarm. This method can differentiate the anomalism of seismic precursor, which is a real new method for analysing seismic precursor.

[Key words] Grey prediction of seismicity; Grey judgement of seismic precursor; New message pattern; Equidimensional new message pattern; Envelope pattern; Lopological pattern swarm