

扬铜地震构造带中强地震灰色预测

张绍治

(江苏省地震局, 南京 210014)

摘要 本文用灰色灾变预测方法, 以两次中强地震的间隔时间或历次中强地震发生时间作为原始建模数列, 分别建立扬铜地震构造带 $M_s \geq 4.0$ 和 $M_s \geq 5.0$ 地震灰色预测模型。通过近年对该带中强地震发生时间预测实践, 证明该模型的预测精度和效果均令人满意, 说明灰色预测方法可以作为地震预报综合研究的内容之一。

关键词: 灰色预测; 中强震; 扬铜地震构造带

1 前言

扬子断块区内的扬州—铜陵地震构造带包括江苏省的大部分陆地和南黄海海域的一部份。该地震构造带呈北东向展布, 具有发震频率稍低, 地震强度中等的特点。历史地震记录表明江苏省和南黄海海域都是中国东部沿海地震最活跃的地区之一。自二十世纪有地震仪器记录以来, 该地区累计发生 24 次 $M_s > 4.7$ 级地震, 平均频度为每 3—4 年发生一次。尤其是从七十年代开始, 频度增高, 共发生 15 次 $M_s > 4.7$ 级地震, 这表明扬铜地震构造带的地震活动已从平静转向活跃, 因此近年已被划为地震危险性重点监视区。近几年笔者运用灰色系统理论和方法对该带中强震活动进行了预测, 取得了良好的效果。本文介绍了用灰色灾变预测方法建立的该带 $M_s \geq 4.0$ 和 $M_s \geq 5.0$ 地震的灰色预测模型及用该模型的预测结果, 并进行了检验。

2 地震灰色预测模型建模方法

根据灰色系统理论^{〔1〕}, 将地震发生之随机量当作在一定范围内变化的灰色量, 将地震发生的随机过程当作在一定范围、一定时区内变化的灰色过程。为此在扬铜地震构造带上选取一定强度水平的地震, 以两次中强震的间隔时间或历次中强震的发生时间作为灰色预测模型建模的原始数列。设扬铜地震构造带内中强震发生时间(或间隔时间)为 $T_i^{(0)}(k)$, 其原始数列为:

$$(T_i^{(0)} = (T_i^{(0)}(1), T_i^{(0)}(2), T_i^{(0)}(3), \dots, T_i^{(0)}(n)) \quad (1)$$

或中 n 为地震的次数, 若取两次中强震的间隔时间则为地震的次数减 1; i 为预测地震强度的阈值, 本文 $i=1$ 表示 $M_s \geq 5$, $i=2$ 表示 $M_s \geq 4$ 。对 $T_i^{(0)}$ 作一次累加生成, 使离散数据集变成有规律的数据集。

$$T_i^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k T_i^{(0)}(m) \quad (2)$$

有

$$\begin{aligned} T_i^{(1)} &= (T_i^{(1)}(1), T_i^{(1)}(2), \dots, T_i^{(1)}(n)) \\ &= (T_i^{(0)}(1), T_i^{(1)}(1) + T_i^{(0)}(2), \dots, T_i^{(1)}(n-1) + T_i^{(0)}(n)) \end{aligned} \quad (3)$$

$T_i^{(1)}$ 可以建立下述白化微分方程。

$$\frac{dT_i^{(1)}}{dt_i} + a_i T_i^{(1)} = u_i \quad (4)$$

记方程的参数列为

$$\hat{a}_i = \begin{bmatrix} a_i \\ u_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

按最小二乘法求解 \hat{a}_i :

$$\hat{a}_i = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T Y_{N_i} \quad (6)$$

$$\text{其中 } Y_{N_i} = [T_i^{(0)}(2), T_i^{(0)}(3), \dots, T_i^{(0)}(n)]^T \quad (7)$$

$$B_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(T_i^{(1)}(1) + T_i^{(0)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(T_i^{(1)}(2) + T_i^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(T_i^{(1)}(n-1) + T_i^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(4)式的解为:

$$T_i^{(1)}(k+1) = (T_i^{(0)}(1) - \frac{u_i}{a_i})e^{-a_i k} + \frac{u_i}{a_i} \quad (9)$$

累减还原后得到原始数列模型为:

$$T_i^{(0)}(k+1) = T_i^{(1)}(k+1) - T_i^{(1)}(k) \quad (10)$$

利用(9)和(10)式即可预测本构造带内下一次 $M_s \geq 5.0$ 或 $M_s \geq 4.0$ 地震的发生时间。

3 扬铜地震构造带中强地震灰色预测模型

为了预测扬铜地震构造带内 $M_s \geq 4$ 和 $M_s \geq 5$ 地震发生的时间,分别取用1970年以来 $M_s \geq 4$ 和 $M_s \geq 5$ 地震发生的时间或两次中强震的间隔时间作为原始数列(表1),依照上节所述方法建立地震灰色预测模型。

3.1 扬铜地震构造带 $M_s \geq 5.0$ 地震灰色预测模型

该模型建模原始数列为: $T_1^{(0)} = \{0.497, 1.405, 1.776, 1.002\}$

一次累加生成: $T_1^{(1)} = \{0.497, 1.902, 3.678, 4.680\}$

按(4)~(9)式计算得到预测模型为(图1):

$$T_1^{(1)}(k+1) = -13.256794e^{-0.1264k} + 13.753794$$

累减还原后得到原始数列模型为:

$$T_1^{(0)}(k+1) = -13.256794e^{-0.1264k} + 9.073794$$

当 $k=4$ 时, $T_1^{(0)}(5) = 1.078 \times 10^3$ (天)

表1 扬州地震构造带中强震目录(1970—1991)

序	发震时间			发震地点			震级 M _s	i		十进制化 发震时间	两中强震 间隔时间 (千天)
	年	月	日	φ°	λ°	地名		1	2		
1	1970	10	29	32.9	119.1	金湖冈桥	4.1		V	70.833	0.426
2	1971	12	30	31.6	122.2	启东以东海中	4.9		V	72	0.843
3	1974	4	22	31.4	119.3	溧阳	5.5	V	V	74.333	0.497
4	1975	9	2	32.9	121.8	南黄海朗家沙	5.3	V	V	75.75	0.426
5	1976	11	2	33.2	119.8	兴化	4.5		V	76.917	0.191
6	1977	5	10	31.6	119.1	溧水	4.1		V	77.417	0.790
7	1979	7	9	31.5	119.3	溧阳	6.0	V	V	79.583	1.011
8	1982	4	22	32.8	121.1	东台琼港	4.6		V	82.333	0.765
9	1984	5	21	32.6	121.6	南黄海	6.2	V	V	84.417	0.064
10	1984	7	24	32.5	121.6	南黄海	4.9		V	84.583	0.668
11	1986	5	23	32.5	121.6	南黄海	4.7		V	86.417	0.27
12	1987	2	17	33.6	120.5	射阳	5.1	V	V	87.167	1.088
13	1990	2	10	31.73	121	常熟	5.1	V	V	90.167	0.633
14	1991	11	5	33.68	120.02	射阳	4.7		V		

预测结果表明,在1987年2月17日射阳地震之后,扬州地震构造带下一次发生 $M_s \geq 5.0$ 地震的可能时间是与该次地震相隔约1078天。实际情况是1990年2月10日常熟发生 M_s 5.1级地震,与射阳地震相隔1088天。这说明模型预测与实际观测结果仅差10天,预测效果是令人满意的。

为了评价该模型的预测精度,分别作了残差检验及后验差检验。

(1)残差检验:模型计算值 $T_i^{(1)}(k)$ 与实际值 $T_i^{(1)}(k)$ 的残差 $\epsilon(k)$

$$\epsilon(k) = \frac{T_i^{(1)}(k) - \hat{T}_i^{(1)}(k)}{T_i^{(1)}(k)} \cdot 100\% \quad (11)$$

还原数列残差由下式给出:

$$\delta_i(k) = T_i^{(0)}(k) - \hat{T}_i^{(0)}(k) \quad (12)$$

式中 $\hat{T}_i^{(0)}(k) = \hat{T}_i^{(1)}(k) - \hat{T}_i^{(1)}(k-1)$

残差检验结果列于表2

(2)后验差检验:是残差分布统计特征的检验,根据下列各式求得

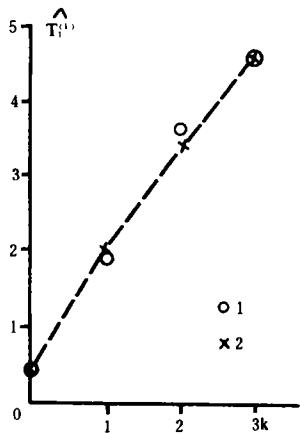


图1 扬州地震构造带 $M_s \geq 5$ 级地震灰色预测模型
1. 观测值; 2. 预测值

Fig.1 Grey prediction model of $M_s \geq 5$ earthquake in Yang-Tong seismic-tectonic belt.

表2 扬铜地震构造带 $M_s \geq 5.0$ 地震灰色预测模型残差检验结果

$T_1^{(1)}(k)$	0.497	1.902	3.678	4.681
$\hat{T}_1^{(1)}(k)$	0.497	2.071	3.458	4.680
$\epsilon(k)$	0	8.89%	5.47%	0.017%
$T_1^{(0)}(K)$	0.497	1.405	1.776	1.002
$\hat{T}_1^{(0)}(k)$	0.497	1.574	1.556	1.002776
$\delta_1(k)$	0	-0.169	0.22	-0.00078

$$S_{1i} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T_i^{(0)}(k) - \bar{T}_i^{(0)})^2} \quad (13)$$

式中 S_{1i} 为观测数据均方差, n 为数据的个数, $T_i^{(0)}(k)$ 为观测数据, $\bar{T}_i^{(0)}$ 为观测数据均值。

$$S_{2i} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=2}^n (\delta_i(k) - \bar{\delta}_i)^2} \quad (14)$$

式中 S_{2i} 为残差均方差, n 为残差数据个数, $\delta_i(k)$ 为残差, $\bar{\delta}_i$ 为残差均值。

后验差比值: $C_i = S_{2i}/S_{1i}$ (15)

小误差概率: $P_i = P_i\{|\delta_i(k) - \bar{\delta}_i| < 0.6745S_{1i}\}$ (16)

按 P 和 C 的大小将模型预测精度分为 4 个等级, 即 $P > 0.95, C < 0.35$ 为“好”; $P > 0.8, C < 0.5$ 为“合格”; $P > 0.7, C < 0.65$ 为“勉强”和 $P \leq 0.7, C \geq 0.65$ 为“不合格”。后验差检验结果: $S_{11} = 0.4753, S_{21} = 0.1592, C = 0.33496, P = 1$, 表明该模型精度属最高等级——“好”级。

3.2 扬铜地震构造带 $M_s \geq 4.0$ 地震灰色预测模型

用两次中强震的间隔时间建模。以表 1 的最末一列数据作为建模的原始数列, 得到的地震灰色预测模型(图 2):

$$T_2^{(1)}(k+1) = 44.25458e^{0.01266k} - 43.82858$$

$$T_2^{(0)}(k+1) = 44.25458e^{0.01266k} - 50.86858$$

$$k=12 \text{ 时, } T_2^{(0)}(13) = 0.647 \times 10^3 (\text{天})$$

预测结果表明, 扬铜地震构造带自发生 1990 年 2 月 10 日常熟地震后, 下一次 $M_s \geq 4.0$ 地震的可能时间应与该次地震相隔约 647 天。实际情况是 1991 年 11 月 5 日射阳发生 4.7 级地震, 与常熟地震相隔 633 天。模型预测结果与实际观测结果仅差 14 天, 预测效果是好的。模型的残差检验结果列于表 3。后验差检验结果较差 $S_{12} = 0.3118, S_{22} = 0.2582, C = 0.828, P = 0.545$, 而其原点残差 δ_2 仅为 0.00115。

对于 $M_s \geq 4.0$ 地震, 作者还用地震发生时间建模, 进行预测尝试。以表 1 的地震发生时间的十进制化数据作为建模的原始数列, 得到的地震灰色预测模型为(图 3):

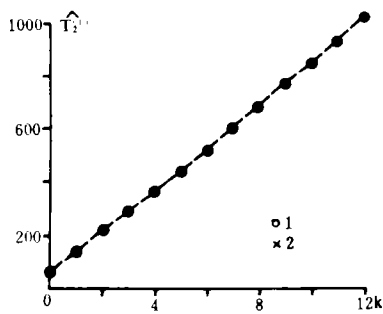


图2 扬铜地震构造带 $M_s \geq 4$ 地震灰色预测模型(方法1)

1. 观测值; 2. 预测值

Fig.2 Grey prediction model of $M_s \geq 4$ earthquake in Yang-Tong Seismotectonic belt (method 1).

表 3 扬铜地震构造带 $M_s \geq 4.0$ 地震灰色预测模型残差检验结果

$T_2^{(1)}(k)$	0.424	1.269	1.766	2.192	2.383	3.173	4.184	4.949	5.013	5.681	5.951	7.039
$T_2^{(1)}(k)$	0.426	0.99	1.56	2.138	2.724	3.317	3.917	4.526	5.142	5.765	6.398	7.038
$\epsilon(k)$	0	22.02%	11.65%	2.44%	14.31%	4.54%	6.37%	8.55%	2.57%	1.49%	7.51%	0.016%
$T_2^{(0)}(k)$	0.426	0.843	0.497	0.426	0.191	0.79	1.011	0.765	0.064	0.668	0.27	1.088
$T_2^{(0)}(k)$	0.426	0.564	0.291	0.372	0.532	0.934	0.745	0.342	0.193	0.753	0.717	1.087
$\delta_2(k)$	0	0.279	0.206	0.054	0.341	0.144	0.266	0.423	0.129	0.085	0.447	0.00115

$$T_2^{(1)}(k+1) = 3678.221e^{0.019524k} - 3607.388$$

$$T_2^{(0)}(k+1) = 3678.221e^{0.019524k} - 4649.305$$

当 $k=13$ 时, $T_2^{(0)}(14) = 91.635$ 。

将十进制转化为年和月,即继 1990 年 2 月 10 日常熟 5.1 级地震后,下一次 $M_s \geq 4.0$ 地震发生时间为 1991 年 8 月份。对该模型预测精度的残差检验结果列于表 4。后验差检验结果 $S_{12} = 5.9235, S_{22} = 0.6074, C = 0.1025, P = 1$,说明该模型精度属最高等级—“好”级。虽然如此,但其预测效果并不佳。前一种方法的后验差检验结果虽不好,但预测效果较好。由表 3 和表 4 可以看出,前一种方法的原点残差为 0.00115,远小于后一种方法的原点残差(0.0276),说明决定预测效果的主要因素,可能是原点残差的大小。

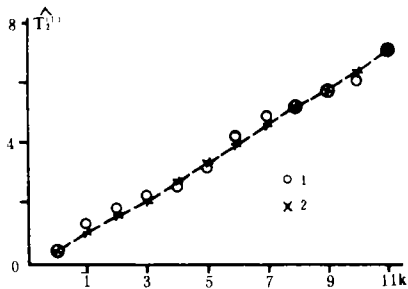


图 3 扬铜地震构造带 $M_s \geq 4$ 级地震灰色预测模型(方法 2)
1. 观测值; 2. 预测值

Fig. 3 Grey prediction model of $M_s \geq 4$ earthquake in Yang-Tong seismotectonic belt (method 2).

表 4 扬铜地震构造带 $M_s \geq 4.0$ 地震灰色预测模型残差检验结果

$T_2^{(1)}(k)$	70.833	142.833	217.166	292.916	369.833	447.25	526.833	609.166	693.583	778.166	864.583	951.75	1041.91
$T_2^{(1)}(k)$	70.833	143.351	217.298	292.703	369.595	448.002	527.956	609.486	692.623	777.4	863.847	951.999	1041.889
$\epsilon(k)$	0	0.3625%	0.0607%	0.0728%	0.0644%	0.1682%	0.2131%	0.0525%	0.1384%	0.0985%	0.085%	0.0262%	0.0026%
$T_2^{(0)}(k)$	70.833	72	74.333	75.75	76.917	77.417	79.583	82.333	84.417	84.583	86.417	87.167	90.167
$T_2^{(0)}(k)$	70.833	72.518	74.465	75.537	76.679	78.169	80.706	82.653	83.457	83.817	85.681	87.416	90.139
$\delta_2(k)$	0	-0.5178	-0.1318	0.2131	0.238	-0.7522	-1.1228	-0.3196	0.9602	0.7663	0.7356	-0.2493	0.0276

1991 年 11 月 5 日射阳 $M_s \geq 4.7$ 级地震发生前,作者用两次中强地震的间隔时间作为连续的原始数列,建立了扬铜地震构造带 $M_s \geq 4.0$ 地震灰色预测模型,并在该年 6 月份编写的下半年地震趋势预测报告中就提出:“下半年江苏省内发生 $M_s > 4$ 级地震的可能性是很大的,发震时间在 11 月份”。以后又在 1991 年 10 月提交的地震趋势预测报告中再次指

出：“11月份在江苏省内有发生 $M_s 4-5$ 级地震的可能。”另外，在7—10月份召开的多次例行震情会商会上亦发表上述意见。因此可以说对这次地震的发生时间有较好的中短期预测。

4 结语

(1)地震活动具有周期性的特点，但后一次地震绝不是前一次活动的简单重现，在活动进程中每一个高潮期和低潮期都各有其表现特征。然而对于地震活动内在规律的认识仍然是灰色的，因此用灰色系统理论和方法来研究地震发生的某些规律是合适的，并已在实际应用中取得了可喜的进展。

(2)地震活动在空间上具有一定的条带性，其分布往往与断裂构造展布方向相一致，因此按单一地震构造带建立起来的地震灰色预测模型，其预测效果可能比跨越不同地震构造带建立起来的地震灰色预测模型要好些。

(3)本文建立的扬铜地震构造带中强地震灰色预测模型主要用来预测该带内发生 $M_s \geq 4.0$ 或 $M_s \geq 5.0$ 级地震可能发生的时间，由于所用方法是下灾变预测方法，故预测的地震震级只能表示其下限值；而预测发震地点也只能泛指扬铜地震构造带，因此在地震预报分析工作中，要准确预报地震三要素，尚需结合其他前兆手段，才能获得更加令人满意的结果

(本文1992年6月29日收到)

参考文献

- 1 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988.

THE GREY PREDICTION OF MODERATELY STRONG EARTHQUAKE IN YANGZHOU—TONGLING SEISMOTECTONIC BELT

Zhang Shaizhi

(*Seismological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210014*)

Abstract

In this paper, by the method of grey catastrophic prediction, the seismic grey prediction models of Yangzhou—Tongling seismotectonic belt $M_s \geq 5.0$ and $M_s \geq 4.0$ are built respectively, according to the time intervals between two moderately strong earthquakes or the origin times of all previous moderately strong earthquakes. It shows that the prediction accuracy and result are pleasing, by the prediction practice in recent years; and the method of grey prediction can be one of comprehensive earthquake prediction.

Key Words: Grey prediction; Moderately strong earthquake; Prediction model;
Yangzhou—Tongling seismotectonic belt