

鄂尔多斯地块周缘及陕西地区地震 活动的灰色预测*

李炳乾

(陕西省地震局)

摘 要

本文应用灰色系统理论GM(1, 1)模型研究了鄂尔多斯地块周缘及陕西地区地震的集发现象, 分别建立了地震集发段的灰色预测模型, 得出鄂尔多斯地块周缘 $M_s \geq 5.5$ 级地震的下一集发段为1987年至1994年, 陕西地区 $M_s \geq 4.0$ 级地震的下一集发段为1990年至1995年。经内测检验, 所建模型具有较高的预测精度。

一、引 言

纵观我国的地震历史, 可以发现地震在时间上的分布是不均匀的, 无论是在强度上还是在频次上都是强弱相间地出现, 表现出地震的集发现象。这种现象对于不同的空间和时间尺度具有不同特征震级和规模。对于较大的区域, 可以划分为地震活跃期和平静期, 其特征时间一般为几百年, 在较小的时间尺度上, 又可划分为地震活跃幕和平静幕, 其特征时间为几十年。在较小的区域内, 中强地震也可以分为集发时段和“无震”时段(“无震”是指无特征震级以上的地震), 其特征时间一般为几年或十几年。

地震预测是地震科学领域的重要研究课题, 也是最引人注目的课题。目前, 尚无行之有效的方法能对地震将在什么时间发生作出较为准确的预测。就目前常用的概率统计而言, 它需要大量的数据样本, 并要求数据样本具有某种典型的概率分布和平稳的随机过程, 而地震事件的时间分布往往不具备这些条件, 利用灰色理论进行研究则可不受上述限制。近几年来, 已有不少地震工作者将灰色理论用于地震预测、预报及地震区划研究中。作为尝试, 本文将应用灰色理论GM(1, 1)模型探讨鄂尔多斯地块周缘及陕西地区地震活动的预测问题。

二、GM(1, 1)模型简介

GM模型是灰色系统理论的核心, 而GM(1, 1)模型是用于灰色预测的主要模型。综合前人的工作^[1-4], 将GM(1, 1)模型的建模过程简述如下。

* 本文由地震科学联合基金会资助。

设 $X^{(0)}$ 为原始序列, $X^{(0)}(0)$ 为初值,

$$X^{(0)} = [X^{(0)}(0), X^{(0)}(1), \dots, X^{(0)}(M)].$$

$X^{(1)}$ 是 $X^{(0)}$ 的 1-AGO, 其生成关系为:

$$X^{(1)}(K) = \sum_{i=0}^K X^{(0)}(i), \quad \forall K \in \{0, 1, 2, \dots, M\}.$$

$Z^{(1)}$ 是 $X^{(1)}$ 的 MEAN, 生成关系为:

$$Z^{(1)}(K) = \frac{1}{2} (X^{(1)}(K) + X^{(1)}(K-1)), \quad \forall K \in \{1, 2, \dots, M\}.$$

若 $X^{(0)}$ 满足光滑条件, 即对于给定的 ε , 当 K 足够大时,

$$\frac{X^{(0)}(K)}{\sum_{i=0}^{K-1} X^{(0)}(i)} \leq \varepsilon.$$

则称方程

$$X^{(0)}(K) + aZ^{(1)}(K) = b$$

为 $GM(1, 1)$ 的灰微分方程, 称方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$$

为灰微分方程的白化方程或影子方程。系数列 $\hat{a}$ 表示为:

$$\hat{a} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_M.$$

其中

$$B = \begin{pmatrix} -Z^{(1)}(1), & 1 \\ -Z^{(1)}(2), & 1 \\ \vdots & \\ -Z^{(1)}(M), & 1 \end{pmatrix}, \quad Y_M = \begin{pmatrix} X^{(0)}(1) \\ X^{(0)}(2) \\ \vdots \\ X^{(0)}(M) \end{pmatrix}.$$

或者写成:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i) \sum_{i=1}^M X^{(0)}(i) - M \sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i) X^{(0)}(i)}{M \sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i)^2 - \left(\sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i) \right)^2},$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^M X^{(0)}(i) \sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i)^2 - \sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i) \sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i) X^{(0)}(i)}{M \sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i)^2 - \left(\sum_{i=1}^M Z^{(1)}(i) \right)^2}.$$

影子方程的解为:

$$\hat{X}^{(1)}(K) = \left(X^{(0)}(0) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a}.$$

累减还原后得原始序列的模型计算值:

$$\hat{X}^{(0)}(K) = \left(X^{(0)}(0) - \frac{b}{a} \right) (e^{-ak} - e^{-a(k-1)}) + \frac{b}{a}.$$

三、鄂尔多斯地块周缘地震活动预测模型

我们的研究区域是鄂尔多斯地块及其周缘地区(图1)。自1850年至1989年7月,发生在该区域内震级 $M \geq 5.5$ 级地震的时间分布如图2所示。这些地震在空间上绝大部分发生在鄂尔多斯地块的四周,尤其是东缘和西缘。在时间上集中于四个时段(简称集发段),即1879年—1898年;1920年—1936年;1952年—1965年;1974年—1982年。在强度上每一集发段内的最大地震的震级呈衰减趋势。我们所关心的是下一地震集发段于何时开始,于何时终止。从资料上看,1987年的5.8级地震预示着下一集发段已经开始,为了慎重起见,我们可以根据前四集发段的起止时间来预测下一集发段的起始时间,对比两者是否一致,并预测下一集发段的持续时间。

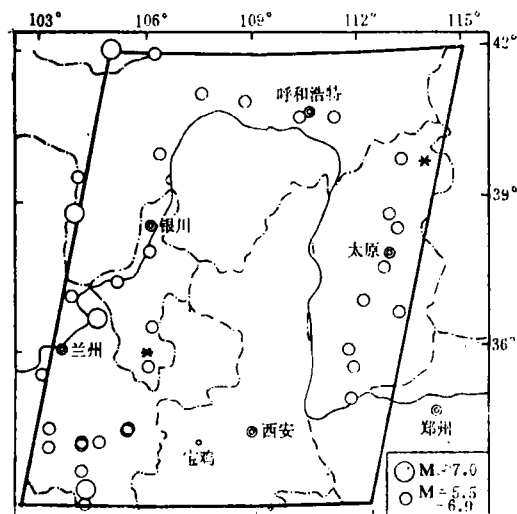


图1 鄂尔多斯地块周缘 $M \geq 5.5$ 地震震中分布图(1850—1989.7)

Fig.1 Distribution of epicenters ($M \geq 5.5$) in surroundings of Ordos Block

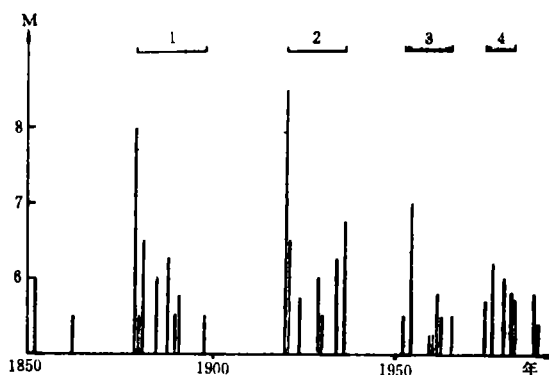


图2 鄂尔多斯地块周缘 $M \geq 5.5$ 地震时间分布图

Fig.2 M-t diagram of earthquakes with $M \geq 5.5$ in surroundings of Ordos Block

分别取相邻两集发段之间的间隔时间(无震时间)和每一集发段的持续时间为原始数据,记为: $X_1^{(0)}$ 和 $X_2^{(0)}$,则有:

$$X_1^{(0)}(1) = 22, X_1^{(0)}(2) = 16, X_1^{(0)}(3) = 9,$$

$$X_2^{(0)}(1) = 19, X_2^{(0)}(2) = 16,$$

$$X_2^{(0)}(3) = 13, X_2^{(0)}(4) = 8.$$

由于模型计算值与原始序列的初值 $X^{(0)}(0)$ 无关^[5], $X^{(0)}(0)$ 可以任意取值,令 $X^{(0)}(0) = X_1^{(0)}(0) = 0$,则两组数据构成的两个序列分别为:

$$X_1^{(0)} = (0, 22, 16, 9);$$

$$X_2^{(0)} = (0, 19, 16, 13, 8).$$

分别对 $X_i^{(0)}$ 作累加生成得:

$$X_1^{(1)} = (0, 22, 38, 47);$$

$$X_2^{(1)} = (0, 19, 35, 48, 56).$$

对 $X_1^{(1)}$ 作均值生成得:

$$Z_1^{(1)} = \{Z_1^{(1)}(K) | K = 1, 2, 3\} = (11, 38, 42.5);$$

$$Z_2^{(1)} = \{ Z_2^{(1)}(K) \mid K=1; 2; 3; 4 \} = (9.5, 27, 41.5, 52).$$

分别求出参数列 $\hat{a}_1$ 和 $\hat{a}_2$, 得:

$$\hat{a}_1 = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.404769791 \\ 26.93275919 \end{bmatrix},$$

$$\hat{a}_2 = \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.246937775 \\ 22.02547771 \end{bmatrix}.$$

则建立的 GM(1, 1) 模型分别为:

$$\hat{X}_1^{(1)}(K) = 66.53846153 (1 - e^{-0.404769791K}),$$

$$\hat{X}_2^{(1)}(K) = 89.19444466 (1 - e^{-0.246937775K}).$$

分别作累减还 $\hat{X}_i^{(0)}(K) = \hat{X}_i^{(1)}(K) - \hat{X}_i^{(1)}(K-1)$, 得:

$$\hat{X}_1^{(0)}(K) = 66.53846153 (e^{-0.404769791(K-1)} - e^{-0.404769791K}),$$

$$\hat{X}_2^{(0)}(K) = 89.19444466 (e^{-0.246937775(K-1)} - e^{-0.246937775K}).$$

求出的原始序列对应的模型计算值如表 1。

表 1

K	$X_1^{(0)}(K)$	$\hat{X}_1^{(0)}(K)$	$\varepsilon_1(K)$	$X_2^{(0)}(K)$	$\bar{X}_2^{(0)}(K)$	$\varepsilon_2(K)$
1	22	22.1486	-0.1486	19	19.5167	-0.5167
2	16	14.7760	1.2240	16	15.2462	0.7538
3	9	9.8575	-0.8575	13	11.9102	1.0898
4		6.5763		8	9.3041	-1.3041
5					7.2683	

两模型对应的最大残差分别为 $|\varepsilon_1|_{\max} = 1.224$ 和 $|\varepsilon_2|_{\max} = 1.3041$, 为确定模型的预测精度, 先求出原始数列和残差序列的均方差 S:

$$S = \left[\frac{1}{M} \sum_{K=1}^M (X(K) - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

则得:

$$S_{11} = 5.3125, S_{12} = 0.8640;$$

$$S_{21} = 4.0620, S_{22} = 0.9648.$$

再求出方差比 C_1 和 C_2 , 得:

$$C_1 = \frac{S_{12}}{S_{11}} = 0.1626, \quad C_2 = \frac{S_{21}}{S_{22}} = 0.2375.$$

求小误差概率 $P_i = P_i \{ |\varepsilon_i(K)| < 0.6745 S_{i1} \}$, 得

$$P_1 = P_1 \{ |\varepsilon_1(K)| < 3.5833 \} = 1;$$

$$P_2 = P_2 \{ |\varepsilon_2(K)| < 2.7398 \} = 1.$$

根据文献[6]划分的精度等级标准, 前述两模型均属于最高精度等级——“GOOD”级。由表 1 可以看出, 由模型计算出第四集发段和第五集发段之间的无震时间约为 6 年, 即预测的第五集发段的起始时间大致为 1988 年, 与实际资料中的 1987 年比较一致, 误差约为 1 年, 属小误差范围。因此, 认为第五集发段已于 1987 年开始是比较合适的。

四、陕西地区地震活动预测模型

自1950年至1989年7月,陕西省内已发生的震级 $M \geq 4.0$ 级地震的时间分布如图3所示。从图3可以看出,这些地震在时间上大体可分为三个集发段:(1)1957年—1959年;(2)1964年—1967年;(3)1978—1982年。在强度上每一集发段的最大震级呈衰减趋势,而频次基本一致。若分别以每一集发段的起始时间和持续时间为原始数据,记为 $X_3^{(0)}$ 和 $X_4^{(0)}$, 则有:

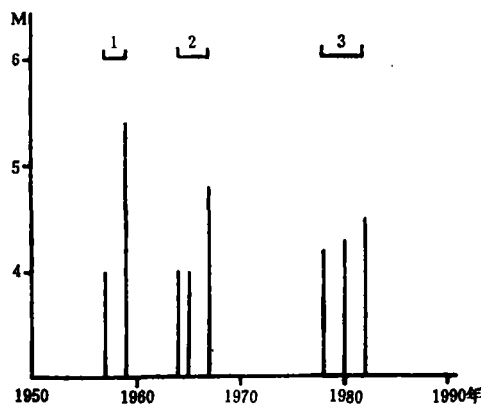


图3 陕西地区 $M \geq 4.0$ 地震时间分布图
Fig. 3 M-t diagram of earthquakes with $M \geq 4.0$ in Shaanxi Province

$$X_3^{(0)}(1) = 57, X_3^{(0)}(2) = 64, X_3^{(0)}(3) = 78;$$

$$X_4^{(0)}(1) = 2, X_4^{(0)}(2) = 3, X_4^{(0)}(3) = 4。$$

同样,根据文献[5],可取 $X_3^{(0)}(0) = X_4^{(0)}(0) = 0$ 。于是有:

$$X_3^{(0)} = (0, 57, 64, 78);$$

$$X_4^{(0)} = (0, 2, 3, 4)。$$

作累加生成和累加后的均值生成可得:

$$Z_3^{(1)} = \{Z_3^{(1)}(K) | K=1,2,3\} = (28.5, 89, 160);$$

$$Z_4^{(1)} = \{Z_4^{(1)}(K) | K=1,2,3\} = (1, 3.5, 7)。$$

求得:

$$\hat{a}_3 = \begin{bmatrix} a_3 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.16077096 \\ 51.46201935 \end{bmatrix};$$

$$\hat{a}_4 = \begin{bmatrix} a_4 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.33027522 \\ 1.733944954 \end{bmatrix}。$$

则预测模型分别为:

$$\hat{X}_3^{(1)}(K) = 320.095242(e^{0.16077096K} - 1);$$

$$\hat{X}_4^{(1)}(K) = 5.250000148(e^{0.33027522K} - 1)。$$

累减还原后求得原始序列对应的模型计算值如表2。

表2

K	$X_3^{(0)}(K)$	$\hat{X}_3^{(0)}(K)$	$\varepsilon_3(K)$	$X_4^{(0)}(K)$	$\hat{X}_4^{(0)}(K)$	$\varepsilon_4(K)$
1	57	55.8297	1.1703	2	2.0546	-0.0546
2	64	65.5673	-1.5673	3	2.8587	0.1413
3	78	77.0033	0.9967	4	3.9774	0.0226
4		90.4339			5.5340	

1) 陕西省地震局资料室, 陕西省台网地震报告。

同样可求得方差比

$$C_3 = 0.1434, C_4 = 0.0987$$

及小误差概率

$$P_3 \{ |e_3| < 0.6745S_{3.1} \} = 1, P_4 \{ |e_4| < 0.6745S_{4.1} \} = 1.$$

因此, 上述两模型预测精度均为GOOD级, 最大误差分别为: $|e_3|_{max} = 1.5673$, $|e_4|_{max} = 0.1413$.

五、预测和讨论

根据上述建立的灰色预测模型, 可以分别对鄂尔多斯地块周缘和陕西地区地震活动进行预测, 其结果如下:

1. 鄂尔多斯地块周缘下一地震集发段已于1987年开始, 其持续时间约为7年, 即下一地震集发段为1987年—1994年。

2. 陕西地区震级 $M \geq 4.0$ 级地震的下一集发段的起始时间约为1990年, 大约持续5年, 即于1990年开始至1995年结束。

根据全国地震趋势和本文所研究的区域的地震集发段的最大震级变化趋势, 估计下一地震集发段的最大震级不会超过最新的地震集发段的最大震级, 对于鄂尔多斯地块周缘来说, 下一地震集发段的最大震级可能不会大于6.2级, 陕西地区下一集发段的最大震级可能不会大于4.5级。

本文中所用资料1970年以前来源于文献[7], 1970年以后的资料来源于文献[1]。1900年以前的震级是根据烈度和震级的关系换算出来的, 相当于能量震级, 对中小地震来说它与面波震级 M_s 一致; 1900年—1962年的震级是古登堡给出的震级, 对震源深度不大于40公里的浅源地震来说, 它是面波震级 M_s ; 1963年以后的震级均为面波震级 M_s 。因此, 可以认为本文所用资料的震级是面波震级 M_s 。

综上所述, 鄂尔多斯地块周缘 $M_s \geq 5.5$ 级的地震的下一集发段大致为1987年—1994年, 最大震级在6.2级左右; 陕西地区 $M_s \geq 4.0$ 级地震的下一集发段约为1990年—1995年, 最大震级在4.5级左右。

无论建立任何预测模型都存在不可避免的误差, 灰色预测模型也不例外。由灰色预测模型计算出来的结果只是灰数的白化值, 存在误差是不足为奇的。尽管如此, 本文给出的预测结果仍对中长期地震预报有一定的参考价值。

(本文1989年12月20日收到)

参 考 文 献

- [1] 邓聚龙, 灰色系统(社会经济), 国防工业出版社, 1985.
- [2] 邓聚龙, 灰色系统理论的GM模型, 模糊数学, No. 2, 1985.
- [3] 邓聚龙, 五种灰色预测, 模糊数学, No. 2, 1985.
- [4] 邓聚龙, 灰色控制系统, 华中理工大学出版社, 1985.
- [5] 李炳乾, 论灰色理论的三数据建模, 高等学校应用数学学报, 待刊.
- [6] 王学前、罗建军, 灰色系统预测决策建模程序集, 科学普及出版社, 1986.
- [7] 顾功叙, 中国地震目录, 科学出版社, 1983.

GREY FORECASTING OF THE SEISMIC ACTIVITIES IN THE REGION SURROUNDING ORDOS BLOCK AND SHAANXI PROVINCE

Li Bingqian

(Seismological Bureau of Shaanxi Province Xi'an, China)

Abstract

In this paper, the clustering phenomenon of earthquakes in the region surrounding Ordos Block and Shaanxi Province has been researched using grey system theory. The grey forecasting models GM(1, 1) for the clustering time-section in the two areas have been built respectively. The forecasting results show that the next clustering time-section of $M_s \geq 5.5$ event is from 1987 to 1994 for the region surrounding Ordos Block and that of $M_s \geq 4.0$ event is from 1990 to 1995 for Shaanxi Province. The testing results also show the models have higher precision.

Q_p 显著高于 Q_s 原因初探

根据吴大铭、王培德、陈运泰对怀柔—北京、剑川—洱源一带 Q_p 和 Q_s 的研究,发现 Q_p 比 Q_s 要高出很多。北京地区 Q_p 比 Q_s 高出45%, 即 Q_p 为800, Q_s 为550, 二者差达250。而剑川地区 Q_p 比 Q_s 高出1.25倍, 即 Q_p 为900, Q_s 仅为400, 二者差值达500。 $Q_p \gg Q_s$, 其原因是什么呢? 该文作者未进行讨论。本短文在此作简要讨论。

从 Q_p 测值较高来看, 北京和剑川地区的介质条件相对来说是比较完整的, 介质中的裂隙比较小。从 Q_s 测值较低来看, 上述两地区介质的裂隙中水比较丰富, 其中剑川地区裂隙中的水比北京更为丰富。由于水难以传递剪切应变, 因而对S波起很大的衰减作用。因此 $Q_p \ll Q_s$ 是地震波传播路径上水丰富程度的重要指标。如所周知, 水是地壳中最易运移的部分。在临近地震前, 震源区及其外围虽然固体介质部分有变形, 但变化最剧烈的部分是固体介质中的水、汽或其它液体。当应力的增大或减小, 应力性质(压应力或拉应力)变化时, 固体介质的变形会导致水的重新分布, 甚至有一部分水逸出地表。这种情况对P波的影响小而对S波影响则非常的大。如介质中的水被挤出, Q_p 将急剧增加, S波振幅则急剧增大。反之, 则相反。推而广之, 大震前与S波有关的地震参数或S波和P波某些参数的比值均可作为研究震源孕育、发展过程的重要预报指标。在 $Q_p \gg Q_s$ 的地区, S波的前兆意义则更大, 因而是今后地震预报攻关的重要课题。

(国家地震局兰州地震研究所 康保燕)