

地震活动加速模型在西北地区的应用

马禾青, 赵卫明, 张文孝, 金春华
(宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要 对地震活动加速模型进行了更加深入的讨论, 提出了一种该模型的时间—破裂方程的直接解法. 应用地震活动加速模型对1970年以来发生在中国西北甘、宁、青、新、蒙五省(区)的中强地震进行了回顾性预测检验并进行了地震预测.

关键词 地震活动加速模型; 西北地区; 预测检验

中图分类号 P315.75 **文献标识码** A **文章编号** 1000-0844(2003)04-0344-04

0 引言

地震工作者在地震预报的长期探索中时常会选取合适的数学或物理模型来进行研究. 如马文静等利用均生函数数学建模方法拟合地震的震级和能量序列, 进而进行了地震的中期趋势预测^[1]. 通常在某一地震活动区域, 在各地震活动期或强震之间地震活动存在平静—增强—发震的特点, 反映出该区域地壳能量的积累和释放过程. 不同的地震活动区域能量的积累和释放过程是有差异的. 王伟研究过地震活动增强方式及其复杂性^[2]. 对区域地震活动性的研究, 就是要了解当前处于地震活动过程的位置, 对该区域未来地震危险性进行评估, 并对该区域未来的中短期地震进行预测. 目前在这些方面已经进行过一些研究, 其中地震活动加速模型不仅具有比较明确的物理意义, 应用效果也较好. 本文对地震活动加速模型进行了一些讨论, 对其所蕴涵的物理意义有了更加透彻的理解. 同时应用地震活动加速模型, 对西北地区一些中强地震进行了回顾性预测检验, 得到了很好的结果, 并进行了地震预测.

1 地震活动加速模型

1.1 理论简介

对某一地震活动区, 在一次地震活动期的区间内, 定义剩余时间 t_f 为某一次地震事件距本次地震活动期的结束时间(即下一次强震的发生时间). Varnes指出前震序列的能量和剩余时间的关系为^[3]

$$d\Omega/dt = c/(t_f - t)^j \quad (1)$$

式中 t 为某一次前震的发生时间, t_f 为强震发生时间, Ω 为能够描述应力状态的可测量, c, j 为常数. 对式(1)积分可得

$$\sum \Omega = A + B(t_f - t)^m \quad (2)$$

式中 $m = 1 - j$. Ω 可取应变释放或地震矩. 当取应变释放时, 式(2)为

$$\sum \sqrt{E} = A + B(t_f - t)^m \quad (3)$$

式(3)即为最初应用于地震预测的时间—破裂法模型的时间—破裂方程. A, B, m 和 t_f 为描述方程的4个参数, 与区域某一时段地震活动过程有关. 其中 A 为区域该活动期内总应变释放, $A - \sum \sqrt{E}$ 即为未来强震的应变释放, 可由震级和能量关系转换为震级, t_f 为强震的破裂或发震时间.

Atkinson^[4~6]和 Charles^[7]从岩石断裂力学研究及玻璃、岩石等实验研究中,也得到了形式类似式(3)的、物理意义明确的裂纹在亚临界状态下生长过程中释放的能量与时间的关系。

1.2 时间预测法基本要求

(1) 研究区域的选取 地震活动加速模型是从对单一材料的破裂研究中得到的,所以选取的地震活动区其基本条件为地质构造相同,地震活动特征单一,范围尽可能小的区域。对于数年尺度的中强以上地震预测,区域范围为某一亚板块内的地震活跃区。当地震活动水平高时,范围小一些,为1°~2°左右,地震活动水平较低时则可大一些。

(2) 地震目录的选取 对于所选取的研究时段和区域,其地震目录比主震事件至少小2个震级单位以上,应基本完整,不存在遗漏;应删除各次事件的余震。在此应用 Keilis—Borok 和 Knopoff^[8]给出的条件(K—K 准则)删除余震(表1)。

(3) 地震事件数 对于所研究的区域某一地震活动期内删除余震后的事件数,一般应有至少30个以上才能得到好的拟合效果。

1.3 时间—破裂方程的拟合计算

对于选取好的某一研究区域在某一地震活跃期内的地震事件,根据震级 M_s 与 E 能量的转换关系式

$$\log(E) = 1.5M_s + 4.8 \text{ (焦耳)} \tag{4}$$

式(3)可写为

表 1 K—K 准则

主震震级/ M	空间距离/km	时间范围/d
4.0~4.5	40	46
4.5~5.0	40	92
5.0~5.5	50	183
5.5~6.5	50	365
6.5~7.0	100	548
7.0~7.5	100	730
7.5~8.0	150	913

$$y_i = \sum_{k=1}^i 10^{0.75m_k+2.4} = A + B(t_f - t_i)^m \quad i = 1, \dots, l \tag{5}$$

式中 l 为地震事件数。上式为一非线性方程组,需采用求解或拟合非线性方程组的方法求解4个参数。一般在进行非线性拟合时,需首先给定参数的初值,进行迭代计算函数极小点参数值。本文提出了一个对式(5)的拟合方法,非常方便快捷。其步骤如下。

1.3.1 参数值域分析

Atkinson 在玻璃、工程材料和岩石矿物实验中得到的亚临界扩展下的任意形式的二维的应力强度因子的表达式为^[4,5]

$$k = Y\delta_r(\pi X)^{1/2} \tag{6}$$

式中 δ_r 为远场应力; Y 为系数; X 为裂纹长度或半径。

Charles 利用在玻璃的静疲劳环境中的化学反应对应力的不同依赖得到裂纹扩展的表达式^[7]

$$X = \nu_0 A \exp(-H/RT) k^n \tag{7}$$

式中 ν_0 为常数,表示零时刻破裂速度;常数 $n > 2$; $A \exp(-H/RT)$ 为反应平衡常数。

由式(6)和式(7),可得

$$\dot{X} = \nu_0 [(X/X_0)^{1/2}]^n \tag{8}$$

最终当出现亚临界扩展时,有

$$\dot{X} = \nu_0 \left(\frac{t_f}{t_f - t} \right)^{-n(2-n)} \tag{9}$$

结合式(5),得到 $m = (n - 4)/(n - 2)$ 。由于 $n > 2$,因此 $0 < m < 1$,意味着式(5)中的 y_i 永远为呈凹形上翘的增函数,也意味着在实际应用当中所选取的地震序列必须满足 $0 < m < 1$ 的条件,即真正满足地震加速的条件。

1.3.2 算法

欲使 $Q(A, B) = \sum_{i=1}^l (y_i - A + B(t_f - t_i)^m)^2 = \min$, 令 $(t_f - t_i)^m = f(t_i)$, 则有

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial A} = -2 \sum_{i=1}^l (y_i - A + Bf(t_i)) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial B} = 2 \sum_{i=1}^l (y_i - A + Bf(t_i))f(t_i) = 0 \\ \begin{cases} lA - B \sum_{i=1}^l f(t_i) = \sum_{i=1}^l y_i \\ A \sum_{i=1}^l f(t_i) - B \sum_{i=1}^l f^2(t_i) = \sum_{i=1}^l f(t_i)y_i \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)式为 A 、 B 的线性方程,可在 m 、 t_f 给定时直接求解 A 、 B ,而不必先给 A 、 B 的初值,故 A 、 B 的初值直接由 m 、 t_f 的初值决定. 计算中可以采用两种计算方法:即可使 $\sum_{i=1}^l \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^l (y_i - A + Bf(t_i))^2 = \min$, 简称为方法 1;也可使 $\sum_{i=1}^l \Delta t_i^2 = \sum_{i=1}^l (t_i - t_f + (\frac{A - y_i}{B})^{1/m})^2 = \min$, 简称为方法 2.

实际计算时,先选择适当的资料时间段和估计的参数在应变释放图上绘出初步拟合曲线,在拟合曲线上确定地震序列的大体符合凹形上翘的范围,再进行计算,一般即可得到满意的拟合效果. 在进行初值和最终拟合时,都应用 Matlab 语言工具箱中求解最小二乘意义上的非线性曲线拟合函数 lsqcurvefit.

2 模型在西北地区的具体应用

2.1 预测检验

杨文政和马丽给出了地震活动加速模型在中国的应用,将中国板内的 3 个地震块体分为 7 个研究区域,分别对每个区域进行了地震活动加速模型分析,还进行了预测^[9]. 本文对 1970 年以来发生在中国西北甘、宁、青、新、蒙五省(区),并满足地震活动加速模型所要求的计算条件(即一般应有至少 30 个以上删除余震后的事件数)的中强地震,分别用地震活动加速模型进行了预测检验. 所用地震目录为中国地震局汇编的中国大陆 1970 年以来的弱地震目录. 结果见表 2 和表 3.

表 2 利用地震活动加速模型拟合的西北地区中强地震

日期	地点	纬度、经度	震级/ M	目录范围	搜索范围	预测时间	预测震级/ M	预测时间	预测震级/ M
						(方法 1)		(方法 2)	
1976-09-23	阿拉善左旗	39.90° 106.40°	6.2	1974-01 ~ 1976-08	3° × 3°	1976-06-18	6.4	1976-09-26	6.4
1977-01-19	霍布逊湖	37.10° 95.80°	6.3	1973-01 ~ 1976-2	2° × 2°	1977-01-08	6.1	1977-03-23	6.1
1979-08-25	五原	41.20° 108.10°	6.0	1978-01 ~ 1979-06	3° × 3°	1979-08-10	6.4	1979-11-21	6.4
1980-11-06	玛纳斯	43.81° 86.14°	5.7	1970-01 ~ 1980-10	2° × 2°	1983-06-21	6.2	1980-10-09	6.2
1982-04-14	海原	36.71° 105.63°	5.5	1980-01 ~ 1981-12	2.1° × 2.5°	1982-04-25	5.5	1982-06-19	5.5
1984-11-23	灵武	38.05° 106.30°	5.3	1982-11 ~ 1981-12	2° × 2°	1984-10-26	5.4	1984-11-30	5.4
1985-08-23	乌恰	39.53° 75.32°	7.1	1970-06 ~ 1985-07	2° × 2°	1986-05-07	7.4	1984-07-05	7.4
1987-08-10	灵武	38.11° 106.42°	5.2	1987-01 ~ 1987-07	2° × 2°	1987-07-07	5.6	1987-07-06	5.6
1987-09-19	富蕴	47.31° 89.64°	5.6	1979-01 ~ 1987-12	2° × 2°	1988-02-16	5.3	1989-09-12	5.2
1988-11-05	格尔木	34.27° 91.87°	6.8	1980-01 ~ 1988-10	2° × 2°	1989-02-10	6.3	1988-03-17	6.2
1988-11-22	肃南	38.57° 99.60°	5.2	1983-07 ~ 1988-10	2° × 2°	1988-12-13	5.5	1988-07-07	5.5
1990-04-26	共和	36.06° 100.33°	7.0	1975-01 ~ 1990-03	2° × 2°	1988-06-30	7.0	1989-07-21	7.0
1990-10-20	天祝—景泰	37.11° 103.72°	6.2	1975-01 ~ 1988-12	1° × 1°	1991-03-28	6.0	1990-11-24	6.1
1991-02-25	柯坪	40.40° 79.40°	6.5	1980-01 ~ 1991-01	2° × 2°	1991-11-19	6.0	1992-03-14	6.0
1993-10-02	若羌	38.20° 88.90°	6.6	1980-01 ~ 1993-09	2° × 2°	1993-04-25	6.5	1992-09-01	6.5
1993-10-26	祁连	38.60° 98.70°	6.0	1989-01 ~ 1993-09	2° × 2°	1992-10-07	5.9	1992-08-28	5.9
1994-06-30	唐古拉山	32.60° 93.80°	6.3	1987-01 ~ 1992-01	2° × 2°	1994-11-11	6.1	1994-04-18	6.0
1995-07-22	永登	36.50° 103.00°	5.8	1992-01 ~ 1994-10	2° × 2°	1996-11-18	5.8	1995-01-25	5.7
1996-03-19	阿图什	39.90° 76.80°	6.9	1991-03 ~ 1996-02	2° × 2°	1996-10-30	6.6	1996-01-19	6.6

在表 2 中本文进行预测检验的 19 个震例中,以方法 1 拟合的结果,震级误差在 0.5 级之内同时发震时间误差在 6 个月之内的结果占 63 % ;震级误差在 0.5 级之内的结果占 100 % ;发震时间误差在 6 个月之内的结果占 63 % .以方法 2 拟合的结果,震级误差在 0.5 级之内同时发震时间误差在 6 个月之内的结果占 63 % ,震级误差在 0.5 级之内的结果占 89 % ;发震时间误差在 6 个月之内的结果占 63 % .方法 1 所得结果总体优于方法 2. 虽然对于不同的地震方法 1 或方法 2 所得结果优劣不同,但总体预测效果均很好. 值得一提的是,笔者在进行预测检验时所计算的地震要比表 2 中列出的多,但由于一些地震不符合地震活动加速模型所要求的加速条件,即地震活动未出现加速,因而得不出好的结果. 这部分地震列于表 3 中,占所有参加预测检验地震的 30 % .

2.2 预测

对表 2 中进行地震预测检验时所选取的 19 个地震活动区分别进行了地震预测,只有玛纳斯地震区得到了有意义的结果,见表 4.

表 4 预测结果

地震活动区	空间扫描范围	目录范围	预测时间	预测震级/ <i>M</i>	预测时间	预测震级/ <i>M</i>
			(方法 1)		(方法 2)	
玛纳斯	42.8°~44.8°N	1996-01~2002-06	2004-01-08	5.3	2003-10-26	5.3
	85.2°~87.2°E					

3 结论

在利用地震活动加速模型进行地震预测时,地震序列所要求满足的条件事实上表征了一种地震孕育的过程. 本文的工作表明地震活动加速模型在西北地区是有一定的预报效能的,对于满足地震活动加速模型所要求的计算条件的中强地震中的 70% ,进行预测检验时均得到了很好的结果. 进行预测时所得到的结果表明,目前除玛纳斯地震活动区外,表 2 中所列的其它地震活动区均不满足地震活动加速模型所要求的地震孕育条件. 因此未来 1~3 年内除玛纳斯地震活动区有发生中等强度地震的可能外,表 2 中所列的其它 18 个地震活动区发生中强以上地震的可能性不大.

[参考文献]

[1] 马文静,张晓清,张晓东. 基于均生函数的数学预测模型在地震中期预报中的应用[J]. 西北地震学报, 2000, 22(1): 62—67.
[2] 王伟. 地震活动增强方式及其复杂性[J]. 西北地震学报, 2000, 22(4): 376—381.
[3] Varnes D J. Predicting earthquake by analyzing accelerating precursory seismic activity[J]. Puar. Appl. Geophys., 1989, 130: 661—686.
[4] Atkinson B K 主编. 尹祥础,修济刚,尹灿,等译. 岩石断裂力学[M]. 北京:地震出版社, 1992. 120—175.
[5] Atkinson B K. Subcritical crack propagation in rocks: theory, experimental results and application[J]. J. Struct. Geol., 1982, 4: 41—56.
[6] Atkinson B K. Subcritical crack growth in geological material[J]. J. Geophys. Res., 1984, 89: 4077—4144.
[7] Charles R J. Static fatigue of glass[J]. J. Appl. Phys., 1958, 29: 1549—1560.
[8] Keilis-Borok V I, Knopoff L, Rotvain I M, et al.. Bursts of seismicity as long-term precursors of strong earthquakes[J]. J. Geophys. Res., 1980, 85: 803—811.
[9] 杨文政,马丽. 地震活动加速模型及其在中国的应用[J]. 地震学报, 1999, 21(1): 32—41.

INFORMATION MANAGEMENT AND ASSISTANT DECISION-MAKING SYSTEM IN COMPUTER BASED ON GIS FOR EARTHQUAKE PRECAUTION AND DECREASING DISASTER

ZHOUBin^{1,2}

(1. The Petroleum University of China Shandong Dongying 257000 China ;

2. Seismic Station of Shengli Oil Field (Shandong Dongying 257000, China)

Abstract The settlement scheme of information management and assistant decision-making system in computer for earthquake precaution and decreasing disaster is introduced from its construction goal , system function , devising principles , software structure design , etc. . By using the technology of GIS ,the system fulfills the function of administrating basic information in GIS. Through further exploitation on the GIS platform ,programming with other types of program language and integrating its analytical functions in space and net with mathematics models in other subjects ,the quick earthquake disaster prospect and assistant decision-making functions of the system are realized.

Key words Earthquake precaution and decreasing disaster ; GIS ; Information management

(上接 347 页)

APPLICATION OF SEISMICITY ACCELERATION MODEL IN NORTHWEST REGION OF CHINA

MA He-qing , ZHAO Wei-ming , ZHANG Wen-xiao , JIN Chun-hua

(*Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Ningxia Yingchuan 750001, China*)

Abstract :Deeper discussion on the seismicity acceleration model is made in this paper. A direct solution to the time-crack equation of the model is given. Using the model , the prediction tests for moderate-strong earthquakes occurred in Gansu , Ningxia , Qinghai , Xinjiang and Inner Monglia provinces and autonomous regions in north-west of China from 1970 are made and earthquake predication in future 1 ~ 3 years for this rigion is given.

Key words : Seismicity acceleration model ; Northwest region of China ; Prediction test