

华东地区地震活动的加速模型分析

李 强

(江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 地震活动加速模型是在岩石断裂理论和实验的基础上建立起来的, 具有坚实的物理基础. 运用地震活动加速模型对地震活动进行分析和预测具有很强的实用性. 运用地震活动加速模型对华东地区及长南带地震活动进行的分析和预测结果表明, 该地区本次地震活动期将在 2016 年左右结束, 现在至 2016 年还将发生总能量相当于 7.7 级的地震, 加速模型中表征区域地震活动特征参数 α 取 0.4 能适合于华东地区和长南带.

主题词: 地震预报; 岩石破裂; 地震活动性; 加速模型; 华东地区

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)04-0419-05

0 引言

人们在用历史地震资料研究地震活动图像时可以发现, 在某一区域强震发生之前, 发震区域的地震活动往往表现为由平静到增强的过程. 该过程在能量释放上表现为随时间呈加速的趋势, 直到强震发生. 强震之后该区域的地震活动图像类似地又呈现由平静到增强的过程. 地震活动加速模型就是按照这样的地震活动图像而建立起来的地震预测模型. 由于地震活动加速模型的理论依据是岩石断裂理论和对岩石破裂的实验, 因而具有坚实的物理基础. Bufe 和 Varnes(1993)用地震活动加速模型对美国旧金山地区的 2 个地震活动期(分别以 1906 年旧金山 $M_L7.9$ 和 1989 年洛玛普瑞特 $M_L6.7$ 地震作为活动期的结束)进行分析, 用强震发生前的该区域地震进行拟合, 较准确地拟合出这 2 次强震发生的时间和震级^[1]. 杨文政和马丽(1999)对中国几个亚板块内的 7 个区域用模型的修正公式进行了分析, 结果表明地震活动加速模型同样能适用于板内的地震活动^[2]. 运用地震活动加速模型对某一区域的地震活动进行研究有助于了解该区域目前正处于本次活动期的什么阶段和预测下一次强震的地震要素, 从而对预测未来地震灾害和评估该区域的地震危险性具有重要的现实意义.

1 地震活动加速模型的建立及模拟方法

把某一地震活动区域内相邻 2 次强震发生的间隔时间称为一个地震活动期. 定义剩余时间为活动期结束时间(即下一次强震发生时间)与某一次地震事件之时差(图 1), 记为($t_f - t$).

为了建立一定的区域地震活动与时间关系的模型, 把区域地震活动看成区域构造块体在

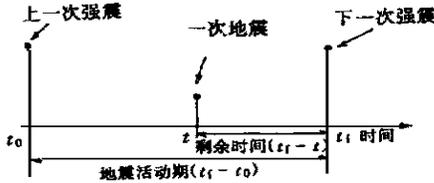


图1 地震活动期和剩余时间的定义

Fig. 1 Definition of period of seismic activity and surplus time.

长期应力作用下内部裂纹不断生长所导致的能量释放,当裂纹生长到某一极限程度时将导致该构造块体的最终破裂. Das 和 Scholz (1981) 在建立裂纹生长随时间变化的物理模型时, 得出岩石的破裂速度 dx/dt 满足如下表达式^[3]

$$dx/dt = v_0 (C \Delta \sigma (x^{1/2}) / F_0)^p \quad (1)$$

其中: x 为裂纹半径, v_0 为初始破裂速度, F_0 为初始裂纹尖端应力强度因子, $\Delta \sigma$ 为应力降, C 为几何常数, p 为超应力腐蚀指数 ($p > 2$). 当裂纹半径 x 趋势于无穷大时, 破裂时间 t_f 为

$$t_f = 2(x_0 / v_0) / (p - 2) \quad (2)$$

其中: x_0 为初始破裂半径. Varnes (1989) 对式(1)作了进一步推演^[4], 即破裂速度可表示为

$$dx/dt = v_0 [t_f / (t_f - t)]^n \quad (3)$$

其中: n 为常数, 并且 $n \neq 1$. 简化式(3)可得

$$d\Omega/dt = k / (t_f - t)^n \quad (4)$$

式中: Ω 为应变或能够描述应力状态的可测量, k 为常数.

可将式(4)改写为如下形式

$$\sum \Omega = A + B(t_f - t)^m \quad (5)$$

其中: A, B 为常数, $m = 1 - n$, Ω 的值可由如下关系式求得

$$\lg \Omega = cM + d \quad (6)$$

当 M 为震级时, $c = 1.5$, Ω 为地震矩, d 为常数; 当 M 为贝尼奥夫带能量释放或地震矩平方根时, $c = 0.75$, d 为常数; 当 M 为事件次数时, $c = 0$, $d = 0$. 在实际对地震目录资料的处理时, 可用地震矩 M_0 作为描述应力状态的 Ω 值, 并配以 $0 \sim 1$ 之间的 α 次幂, 即

$$\sum M_0^\alpha = A + B(t_f - t)^m \quad (7)$$

Sornette 和 Sammis (1995) 引入了重整化群概念对式(7)进行了修正, 使其具有离散层次结构^[5]

$$\sum M_0^\alpha = A + B(t_f - t)^m \{1 + h \cos[2\pi \lg(t_f - t) / \lg \lambda + \varphi]\} \quad (8)$$

其中: h, λ, φ 为待定系数, 用式(8)对实际数据的处理结果将优于式(7). 可以看出, 用式(7)和式(8)对实际数据进行的拟合方法是一种非线性最小二乘拟合方法.

地震矩 M_0 通常可由与 M_s 震级的转换公式算得

$$\lg M_0 = 1.5 M_s + 9.14 \quad (9)$$

在实际资料的拟合过程中可先选用不同的参数组合进行拟合, 通过 χ^2 检验的方法可确定出拟合效果最好、最能与实际情况相符的那一组参数.

2 华东地区及长南带加速模型的模拟

2.1 华东地区

华东地区 ($29^\circ \sim 36^\circ \text{N}$, $116^\circ \sim 124^\circ \text{E}$, 即图2中点划线所包围的地区) 以北东向的盱眙-响水口断裂为分界线, 分属2个不同的大地构造单元, 西北侧谓华北准地台, 东南侧称下扬子准地

台. 该地区第四系覆盖面积在 90% 以上, 境内展布方向和切割深度不同的断裂及其由它们控制的断陷和隆起相互交织, 地质构造较为复杂. 新构造和现代构造运动比较活跃, 形式也多种多样, 以大面积的块断升降运动为主, 具有较好的整体性和渐变性, 从而决定了该区域的地震活动水平, 无论是强度还是频度, 在全国均处于中等水平.

本研究选用《中国强地震目录》^①, 在计算之前先将余震删除, 并取起始震级为 $M_s 4 \frac{3}{4}$. 根据傅征祥(1997)对中国大陆地震目录完全性分析的结果^[6], 华东地区及长南带 $M_s 4 \frac{3}{4}$ 地震资料完全记录的起始年份为 1484 年, 故本文选用地震目录的起始年份为 1484 年.

自有记录以来, 华东地区共发生 7 级以上强震 2 次, 它们分别是 1668 年 7 月 25 日的山东郯城的 $M_s 8.5$ 地震和 1846 年 8 月 4 日的黄海 $M_s 7.0$ 地震. 分别以这 2 次强震作为 2 次活动期的结束, 使用每次活动期中强震前的地震事件来拟合, 并且目前华东地区自上次黄海 7.0 级强震以来, 已经有 153 年没有发生过强震, 目前是否处于本次活动期的结束期? 使用 1847 ~ 1997 年的地震事件 ($M_s \geq 4 \frac{3}{4}$) 拟合出这 2 次强震发生的时间和震级及未来强震的发震时间. 拟合图形和结果见图 3 和表 1.

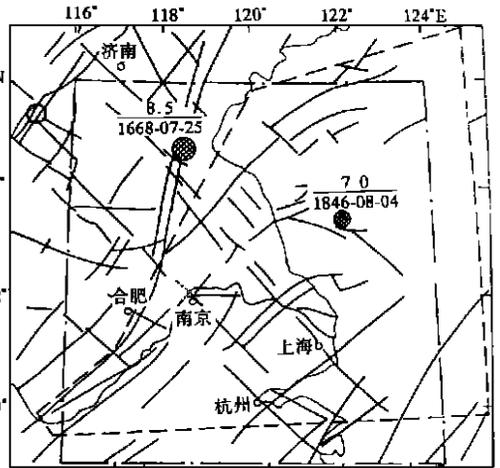
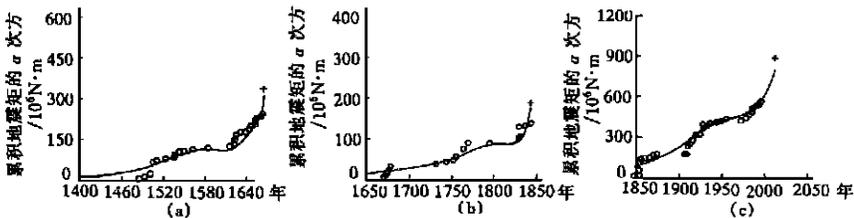


图 2 华东地区及长南带分区示意图

Fig. 2 The East China region and seismic zone from Changjiang mid-downstream reach to south Yellow Sea.



(a) 为 1668 年 7 月 25 日山东郯城 8.5 级地震以前地震事件的拟合曲线;
 (b) 为 1846 年 8 月 4 日黄海 7.0 级地震以前, 山东郯城 8.5 级地震以后地震事件的拟合曲线;
 (c) 为 1846 年 8 月 4 日黄海 7.0 级地震以后地震事件的拟合曲线; 小圆圈表示拟合时间段内发生在该区域的地震事件, 十字表示拟合时间段后发生在该区域的地震事件; 细线为拟合曲线

图 3 华东地区地震活动加速模型拟合曲线 (取 $\alpha = 0.4$)

Fig. 3 The fitting curves of model of accelerating seismic activity in East China region.

表 1 华东地区地震活动加速模型拟合结果

实际地震 时间 地点 M_s	预测发 震时间	预测发震 震级 M_s	目录时间范围	拟合参数			χ^2
				h	λ	φ	
1668 年 郯城 8.5	1668	7.8	1485 ~ 1662	0.014	5	0.043	0.56
1846 年 黄海 7.0	1849	6.7	1670 ~ 1844	0.023	10	1.52	0.41
?	2016	7.7	1847 ~ 1997	0.013	4.3	0.532	0.37

从图 3 可以看出, 无论是拟合曲线, 还是累积地震矩的 α 次方, 在结束阶段均呈加速上升趋势, 这说明这 3 个时段的地震事件均适合于地震活动加速模型. 从表 1 中预测的 2 次地震发

① 中国地震局监测预报司预报管理处, 中国强地震目录, 1999, 104—106.

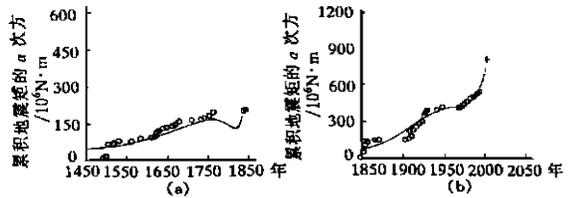
生时间和震级来看, 预测结果和实际结果比较接近. 说明预测效果较好. 图 3(c)中的拟合曲线和地震矩的 α 次方在后面阶段的加速上升趋势还说明了目前华东地区正处于能量加速释放阶段, 预示着华东地区的地震活动已进入了本次活动期(始于 1846 年黄海 7.0 级地震)的结束期. 由于本次活动期预测结束时间为 2016 年, 现在至 2016 年不可能仅发生 7.7 级地震, 表中给出的实际上是现在到 2016 年间华东地区将要释放的总能量.

2.2 长江中下游—南黄海地震带

长南带(长江中下游—南黄海地震带的简称, 即图 2 中虚线所包围的地区)位于下扬子准地台的东部, 其西北侧是北东向的盱眙-响水口断裂, 并以此为分界线而与华北准地台接壤. 由于其 85% 以上部分位于上述的华东地区之内, 因此对长南带的分析有助于进一步了解华东地区的地震活动.

自有记录以来, 长南带仅发生 7 级以上强震 1 次, 即 1846 年 8 月 4 日的黄海 M_S 7.0 地震. 该强震前的地震事件是否适合于地震活动加速模型? 长南带目前是否处于本次活动期的结束期? 为解决这些问题, 分别使用 1491 ~ 1844 年和 1847 ~ 1997 年的地震事件($M_S \geq 4 \frac{3}{4}$) 进行拟合. 拟合图形如图 4 所示, 拟合结果如表 2 所示.

从图 4(a)可看出, 拟合曲线在接近结束的阶段出现了负增长, 且其累积地震矩的 α 次方在结束阶段并没有呈加速上升趋势, 其原因是长南带在 1765 ~ 1838 年期间无 $M_S \geq 4 \frac{3}{4}$ 地震发生, 使得地震活动在能量释放上并没有表现为随时间呈加速的趋势, 因而长南带在该时段的资料不适合于地震活动加速模型. 从图 4(b) 可看出, 拟合曲线及累积地震矩的 α 次方在结束阶段均呈加速上升趋势, 这说明长南带在 1847 ~ 1997 年的地震活动适合于地震活动加速模型. 从表 2 中预测的地震发生时间(2018 年)和震级(7.4 级)来看, 与华东地区预测的地震发生时间(2016 年)和震级(7.7 级)相接近, 由华东地区和长南带的 $M-t$ 图(图 5 和图 6)可见, 1846 年以前华东地区的地震活动与长南带的地震活动有较大差别, 但在 1846 年以后其差别不大, 从拟合图(图 3c 和图 4b) 上也可看出, 它们的拟合曲线和累积地震矩的 α 次方差别不大. 由于华东地区 1846 年以后的地震高发地区的主体部分位于长南带, 二者拟合结果相差不大是可以理解的.



(a) 为 1846 年 8 月 4 日黄海 7.0 级地震以前地震事件的拟合曲线; (b) 为 1846 年 8 月 4 日黄海 7.0 级地震以后地震事件的拟合曲线

图 4 长南带地震活动加速模型拟合曲线(取 $\alpha = 0.4$)

Fig. 4 The fitting curves of model of accelerating seismic activity in the seismic zone from Changjiang mid-downstream reach to south Yellow Sea.

表 2 长南带地震活动加速模型拟合结果

实际地震		预测发震	预测发震	目录时间范围	拟合参数			χ^2	
时间	地点	M_S	震时间		震级 M_S	h	λ		φ
1846 年	黄海	7.0	—	—	—	—	—	—	
?			2018	7.4	1491 ~ 1844	0.013	4.5	0.531	0.31

3 讨论与结论

(1) 地震活动加速模型中所定义的活动期与通常我国地震期划分中的活跃期和活跃幕不一样, 活跃期和活跃幕是根据地震时间分布的丛集性来划分的, 而地震活动加速模型中的活动

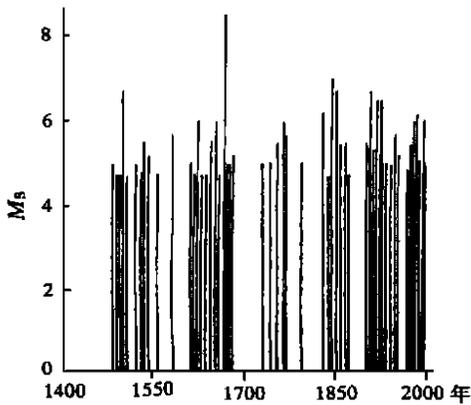


图5 华东地区的 $M-t$ 图 ($M_s \geq 4 \frac{3}{4}$)

Fig.5 The $M-t$ figure in East China region.

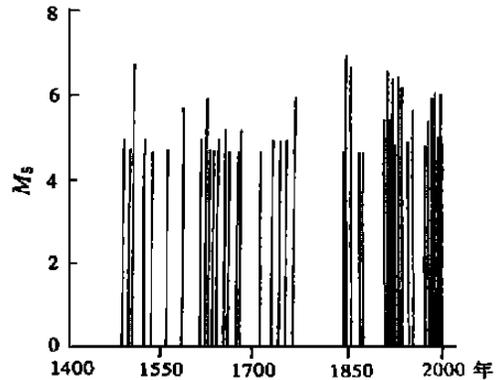


图6 长南带的 $M-t$ 图 ($M_s \geq 4 \frac{3}{4}$)

Fig.6 The $M-t$ figure in the seismic zone from Changjiang mid-downstream reach to south Yellow Sea.

期是根据 2 次强震发生的间隔时间来确定的,它包含有平静时段和活跃时段.通常一个地震活动期在临近结束时段其能量呈加速释放趋势,否则它不适合于地震活动加速模型.

(2) 由拟合结果可知,无论是华东地区还是长南带,目前都处于能量加速释放阶段,说明该地区目前已进入了本次活动期的结束时段.从预测的本次地震活动期的结束时间为 2016 年前后可知,目前已经过了本次地震活动期的约 91% 的时段.若用地震活动分期研究的方法得出的结果比较,2016 年前后活动期的结束时间与 2010 年前后的长南带地震活动的第 2 活跃期第 3 活跃幕的结束时间^[7]相接近,但它们是否相对应还有待于作进一步研究.

(3) 从对华东地区 2 个强震的预测效果来看,发震时间的最大误差为 3a,震级的最大误差为 0.7 级,与其它一些方法相比^①,效果较好.

(4) 加速模型中参数 α 可以用来表征区域地震活动强度,一般 α 在 0 ~ 1 之间,区域的 α 越大说明该区域的地震活动性越强.华东地区地震活动在全国处于中等水平,经拟合证明 α 取 0.4 能适合于华东地区和长南带,说明与杨文政和马丽 (1999) 得出的对于中国大陆 α 一般为 0.4,对局部地震活动性较强的区域 α 可以为 0.5 这一结果相吻合.

[参考文献]

- [1] Bufe C G, Vames D J. Predictive modelling of the seismic cycle of the greater San Francisco Bay region[J]. J Geophys Res, 1993, 98: 9871—9883.
- [2] 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.
- [3] Das S, Scholz C H. Theory of time dependent rupture in the earth[J]. J Geophys Res, 1981, 86: 6039—6051.
- [4] Vames D J. Predicting earthquake by analyzing accelerating precursory seismic activity[J]. Pure Appl Geophys, 1989, 130: 661—686.
- [5] Sornette D, Sammis C G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquake; Implications for earthquake prediction[J]. J phys I France, 1995, 5: 607—619.
- [6] 傅征祥. 中国大陆地震活动性力学研究[M]. 北京: 地震出版社, 1997, 9—14.
- [7] 谢华章, 田建民. 长江中下游-南黄海地震带地震活动趋势分析[J]. 地震学刊, 1998, (3): 1—6.

(下转 435 页)

① 国家地震局分析预报中心. 中长期地震预测研究论文选. 1992. 1—72.

- [8] 夏玉胜, 胡爱真, 唐艳红. 构造机理与地震大形势分析[J]. 高原地震, 1997, 9(4): 1~8.
- [9] 章淮鲁, 郁曙君, 何淑韵, 等. 未来十年(1996~2005年)中国各地震带地震活动强度及发震地点预测[A]. 见: 中国大陆2005年前强震危险区预测研究[C]. 北京: 地震出版社, 1997. 36~46.
- [10] 郭增建, 秦保燕, 郭安宁, 等. 8级大震的构造物理背景与趋势预测[A]. 见: 中国大陆2005年前强震危险区预测研究[C]. 北京: 地震出版社, 1997. 183~189.

THE SPACE-TIME DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKES AND TREND PREDICTION OF STRONG EARTHQUAKES IN CHINA WESTERN CONTINENT AND ITS NEIGHBORING REGIONS

YANG Li-ping¹, XIA Yu-sheng², WANG Xiao-ping², HAN Fu-rong²

(1. Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Seismological Bureau of Qinghai Province, Xining 810001, China)

Abstract: Based on the space-time rhythmical features of seismic activity in West China and its neighboring areas, the authors study in detail the space distribution of the equally spaced strong earthquakes, strong earthquake belts and 23 years solar cycle in the regions and analyse migrating laws of the main active region in active periods. It is considered that the fifth earthquake activity period is over about in 2005, the main active area is Tianshan seismic belt and there may be energy release of a $M_S \approx 8$ earthquake in the future several years.

Key words: Trend prediction; Earthquake distribution; Seismic activity; West China

(上接 423 页)

THE MODEL OF ACCELERATING SEISMIC ACTIVITY AND ITS APPLICATION IN EAST CHINA REGION

LI Qiang

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

Abstract: The model of accelerating seismic activity, which is set up on the basis of fracture theory and experiment of rock, stands on the solid ground of physics. Its use in analyzing and forecasting the future seismic activity is of great significance in practical application. In this paper, we analyzed and forecasted the seismic activity in East China region and seismic zone from Changjiang mid-downstream reach to south Yellow Sea by using the model. It is indicated that the present seismicity period will finish about in 2016, and earthquakes whose whole energy is corresponding to that of an earthquake with $M_S 7.7$ will occur from now to 2016. It is also indicated that the value of characteristic parameter $\alpha = 4$, which characterizes the regional seismic activity in the model of accelerating seismic activity, is suitable to East China region and seismic zone from Changjiang mid-downstream reach to south Yellow Sea.

Key words: Earthquake prediction; Seismic activity; Rock rupture; Accelerating model; East China region