

薛 丁, 高立新, 丁风和, 等. 三角级数建模对台湾地震区单步预测检验及地震趋势探讨[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 17-21. [XUE Ding, GAO Lixin, DING Fenghe, et al. The Test of One-step Sliding Earthquake Prediction and the Discussion of Earthquake Trend for the Taiwan Seismic Zone Based on Modeling of Trigonometric Series Fitting[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 17-21.]

## 三角级数建模对台湾地震区单步预测检验 及地震趋势探讨

薛 丁, 高立新, 丁风和, 戴 勇  
(内蒙古自治区地震局, 呼和浩特市 010010)

**摘要:** 应用活动地块和地震区带划分的研究成果, 以台湾地震区为研究单元, 用区间极值法选取 1960~2015 年的半年极大值地震。把地震构造及其极值地震相结合, 选取的地震资料具有统计单元一致的特征, 也代表研究单元地震趋势水平的变化。从周期迭加的角度考虑地震活动的变化过程, 通过最佳平方逼近, 建立三角级数模型, 在 2015 年上、下半年地震单步递推预测检验的基础上, 对未来地震趋势进行了探讨。

**关键词:** 台湾地震区; 区间极值法; 最佳平方逼近; 三角级数建模; 递推预测检验; 趋势探讨

**中图分类号:** P315.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662 (2017) 01-0017-05

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2017.01.003

## The Test of One-step Sliding Earthquake Prediction and the Discussion of Earthquake Trend for the Taiwan Seismic Zone Based on Modeling of Trigonometric Series Fitting

XUE Ding, GAO Lixin, DING Fenghe, DAI Yong

(Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China)

**Abstract:** According to research results of the active blocks and seismic region and zone division, the paper extracted extreme earthquakes occurring in each semi-year of 1960-2015 by using BMM (Block Maximum Method) in the study unit of the Taiwan seismic region. Combing the seismic structure with its extreme earthquakes, these data had the consistent feature of statistical membership, and acted on the behalf of earthquake trend changes of the study unit. From the view of cyclic superposition, the paper considered the changing process of earthquake activity, and fitted the data by using trigonometric series model of the best least-square. On the bases of 1-step sliding recursive prediction test of earthquakes of semi-year in 2015, the earthquake trend tendency had been discussed

**收稿日期:** 2016-05-23

**作者简介:** 薛 丁(1963-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事综合地震预报、地震活动性、构造地质等工作。

**E-mail:** xueding0642@sina.com.

**Keywords:** Taiwan seismic region; BBM (Block Maximum Method); Best least-square fitting; model of trigonometric series; Test of one-step sliding earthquake prediction; Tendency discussion

## 0 引言

活动地块理论和地震区的划分已由许多专家研究的较为成熟<sup>[1-7]</sup>,其地震活动的强弱交替或起伏变化也应该有某种规律性。对于一个较完整的地震活动区,能否用数学建模的方法来计算未来的变化规律,是有实际意义的。数学建模技术将会有助于提高地震趋势预测水平,这比起建立在经验预测上的推论有科学依据和定量成分;反过来,现实中有很多过程,其准确的函数解析表达式从物理机制上是很难知道的,只能通过监测或观测得到一系列节点上的值,而且,一般来说,我们测定的准确度不一定高,有的点甚至有很大的偏差,必然引入噪声。在这样的情况下,人们可使用科学的方法去寻求近似函数来逼近拟合这些点,可帮助我们定量判定动态趋势。但是,数学模型不能随意,要尽量增加其物理意义,一定要针对研究的实际问题选择好模型<sup>[8-12]</sup>。由于影响地震孕育发生的因素复杂,地震预报科学还处于探索阶段,预报模型需要客观检验和深入研究,用建模方法定量地预测研究单元的地震值得探讨。自然界中存在种种复杂函数关系的振动现象,它由许多不同频率、不同振幅的波叠加而成<sup>[13-14]</sup>。用三角函数作为基函数来表示任意函数关系始于 18 世纪 50 年代,到 19 世纪逐步建立了一套有效的分析方法,称为傅里叶变换。1965 年以后快速傅里叶变换(FFT)得到广泛应用<sup>[15]</sup>。例如在工程地震学领域利用三角级数叠加进行地震动的合成,可以获得人造地震动时程,方法主要对地震动的三要素(振幅、频谱、持时)进行模拟<sup>[16-17]</sup>。

## 1 理论概述

若有  $n$  个观测到的数据点  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 其  $m$  阶三角级数逼近模型为

$$\hat{y}=f(x)=\sum_{k=1}^m a_k \sin(b_k x+c_k) \quad (1)$$

模型中的参数使用最小二乘法求取,即对数据点  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 求取上述逼近模型函数,使得

$$\min \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \min \sum_{i=1}^n [\hat{y}_i - y_i]^2 \quad (2)$$

为最小。模型中  $a_k$ 、 $b_k$ 、 $c_k$  为任意实数,代表各地震活动周期的振幅、频率和相位成分。使用最小二乘法求取最佳逼近近似函数的方法称为最佳平方逼近, $f_m(x_i)$ 称为数据点的最小二乘近似函数。最佳阶数  $m$  通过反复多次计算,对比多次逼近拟合的参差来确定。计算过程中,阶数较大时,常会出现运算溢出等问题,为防止运算溢出,将数据做标准化预处理<sup>[18,11,12]</sup>:  $x=(x-\min(x))/(\max(x)-\min(x))$ 。

在计算中,由近似函数求得的近似值与已知数据之差称为残差。提取逼近拟合的相关系数  $R$  和标准误差  $RMSE$  这 2 个判定指标,以衡量最佳逼近效果,用来说明趋势探讨结果的可能偏离程度。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

最佳平方逼近是求近似函数的一类数值方法,它不要求函数在观测点处与观测值相同,只要求它尽可能反映数据点的基本趋势。它的理论通俗易懂,计算简便易行,是实际中常用的一种科学研究方法。

## 2 台湾地震区地震单点预测检验及趋势探讨

### 2.1 资料选取

地震区是地震活动性和地震构造环境均相类似的地区,是具有相对统一运动方式的地质单元<sup>[16,1,19]</sup>。地震区常常作为评价大范围内地震活动总体水平的范围,也作为分析地震活动特点(时间、空间和强度分布)的单元。

不同的边界决定了地震样本的不同归属,如何选取资料会得到不同的研究结果,应采用研究成熟的地震区、带划分方案。本文采用活动地块的划分方案<sup>[1]</sup>和国家标准 GB17741-2005《工程场地地震安全性评价》的地震区、带划分方案<sup>[19-20]</sup>。上述的划分方案已实现了 Mapsis 软件化<sup>[21]</sup>。

研究单元地震资料自 1960 年以来记录完整可靠<sup>[22]</sup>。为了探讨地震趋势,按照极值统计推理的区间极值法 BMM(Block Maximum Method)构建极大

值地震时间过程，其做法是将观测数据按时间顺序等分为一些时段区间，在每个区间上选取观测

的最大值<sup>[23-24]</sup>。以半年尺度为一个区组时间单位进行滑动，用 Mapsis 软件选取 1960 年以来极大值地

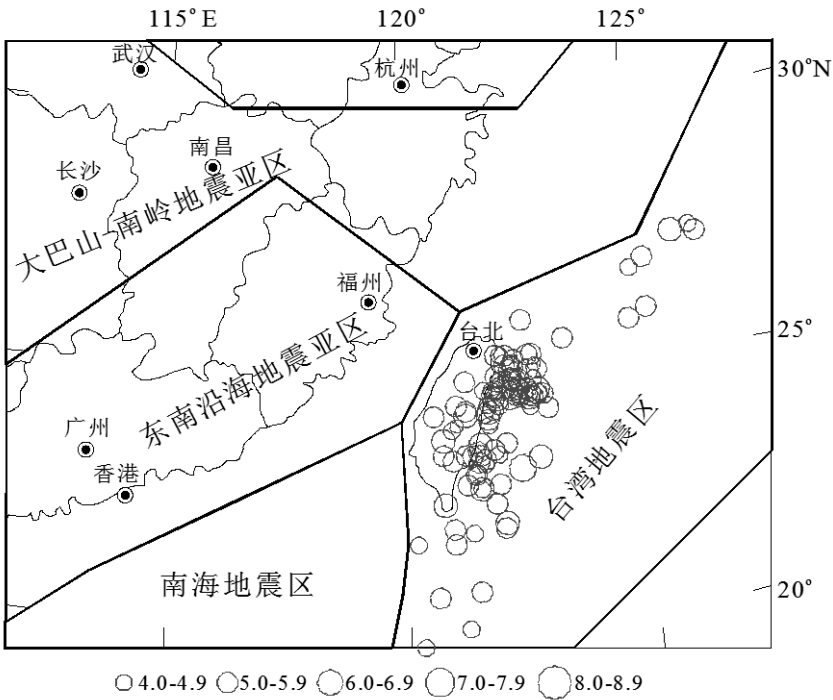


图 1 基于地震区划分和 BMM 法的半年极大值地震资料选取图

Fig.1 The data selection structure map based on seismic region division and BMM

震。这样的地震活动序列资料应具有地质单元和孕震系统的统一性。共选取 112 次半年尺度极值地震，其中  $4.0 \leq M_s \leq 4.9$  级地震 2 次， $5.0 \leq M_s \leq 5.9$  级地震 35 次， $6.0 \leq M_s \leq 6.9$  级地震 60 次， $7.0 \leq M_s \leq 7.9$  级地震 14 次， $8.0 \leq M_s \leq 8.9$  级地震 1 次(图1)。

2.2 结果及分析

台湾地震区是一个强地震活动区，每半年尺度内会发生数次中强以上地震，选择其极大值地震的时间过程来用三角级数模型进行地震单点预测检验并探讨趋势演化，对突发地震事件的极端情况具有较强的代表性。

使用最佳三角级数逼近模型(1)式和 2.1 选取的实际地震活动资料，多次反复计算，对比逼近

的 2 个判定指标进行优选，选择  $m=9$ 。9 阶三角级数逼近模型建立为

$$\hat{y}=f(x)=\sum_{k=1}^9[a_k\sin(b_kx+c_k)] \tag{5}$$

不难看出，借助上述数学模型结果可进行计算来探讨地震趋势。通过(5)式，我们不再完全凭经验或靠定性分析预测变化趋势，而是实现基于历史资料的数学模型预测。把历史和未来紧密结合，通过数据计算来回答问题，而且给出逼近优度和误差水平参数。

本文给出了过去最近 2 个半年的单步预测检验和未来 1 个半年时段的趋势探讨，即，1960—2014 下半年数据建模，单步预测检验 2015 年上半年地震；1960—2015 上半年数据建模，单步预测检验 2015 年下半年地震；1960—2015 下半年数据

表 1 建模对单步预测检验与趋势探讨递推统计表

Table 1 Statistics table of single-step prediction test and trend discussion

建模时段	检验与探讨时段	<i>R</i>	<i>RMSE</i>	实际地震 <i>M<sub>s</sub></i>	预测地震 <i>M<sub>s</sub></i>
1960~2014 下半年	2015 上半年	0.656 2	0.548 7	6.4	5.693
1960~2015 上半年	2015 下半年	0.633 2	0.559 6	5.7	6.257
1960~2015 下半年	2016 上半年	0.645 7	0.550 6		5.440

表 2 台湾地震区 2016 年上半年地震趋势探讨模型  
参数取值表

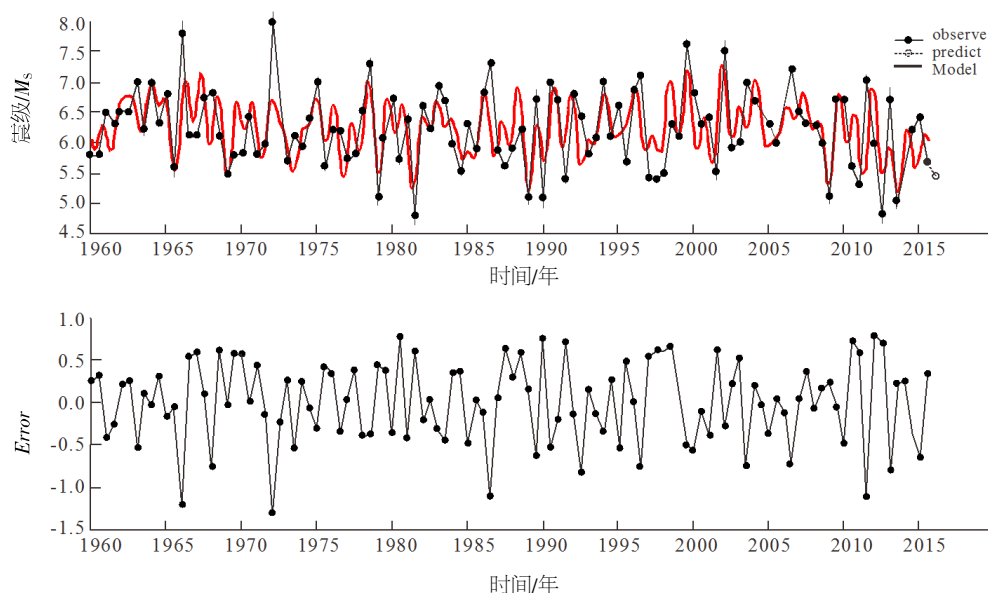
Table 2 The modeling parameter values of earthquake  
trend tendency discussion, over first half year of 2016,  
for TAIWAN seismic zone

$a$	$b$	$c$
$a_1=-11.13$	$b_1=-0.951$	$c_1=1.519$
$a_2=-6.283$	$b_2=1.77$	$c_2=-1.688$
$a_3=40.7$	$b_3=3.319$	$c_3=1.112$
$a_4=-39.43$	$b_4=-3.343$	$c_4=-2.036$
$a_5=0.2844$	$b_5=91.65$	$c_5=-2.597$
$a_6=0.2269$	$b_6=25.59$	$c_6=2.522$
$a_7=-0.2241$	$b_7=-38.31$	$c_7=-0.02988$
$a_8=0.2352$	$b_8=-51.5$	$c_8=0.2877$
$a_9=0.2109$	$b_9=82.27$	$c_9=-1.532$

建模, 单步预测探讨 2016 年上半年地震趋势。表 1 是 2 个单点预测检验和 1 个单步预测趋势探讨的递推统计。

由于篇幅, 仅用表 2 和图 2 展示了台湾地震区 1960~2015 下半年地震序列模型参数、未来 1 个半年时段(2016 年上半年) 地震趋势的探讨及其误差结果。

通过分析图 2 可探讨地震趋势, 把地震构造和极值理相结合, 预测检验模型单步外推一个区间时间间隔的地震, 也代表研究单元地震趋势水平, 连续单步外推二、三个等区间时间间隔的预测误差是逐渐增大的。因此, 我们不做多步预测检验, 而是根据实际资料随时间的不断增加, 适



(建模时段: 1960—2015 下半年数据, 趋势探讨时段: 2016 年上半年)

图 2 9 阶最佳三角级数逼近模型趋势探讨及误差结果

Fig.2 The earthquake tendency discussion and its error by nine degree modeling of trigonometric series fitting

合于动态单步跟踪预测, 即实际资料每增加一个区间值就进行一次动态单步外推, 能较好应用于中期尺度预测探讨。如使用 1960—2015 上半年实际资料建模, 单步预测检验 2015 下半年地震水平为  $M_s$  6.257, 实际已发生最大地震水平为  $M_s$  5.7 (2015 年 9 月 16 日, 台湾宜兰县附近海域), 差为 0.557, 未超出 2 倍标准误。

同时模型给出参考拟合优度相关水平  $R$  和标准误差水平  $RMSE$  来说明可能围绕趋势上下波动的误差范围, 也可评估模型的优劣程度。建模探讨显示, 台湾地震区目前总体地震趋势水平走向处于由低谷值向上升的转折时段。但震级水平有围绕趋势上下波动的可能, 波动范围在图 2 所

示的误差之内。

### 3 结语

现实中, 应用数学语言刻画实际问题就是一个模型。建模时要深入认识实际问题的本质和规律, 找到正确模型, 得到其相关参数, 使建立的模型能科学地反映实际问题的重要特征, 具有可靠性, 并在实践中不断探索与完善 [8-12, 25-27]。数学建模需将综合知识运用于所研究的领域中, 是分析、解决实际问题的重要手段之一, 是值得推广的“数值预测”方法, 有助于提高地震趋势分析水平。

本文合理地考虑地震活动的构造统计单元,依据半年极大值地震的波动数据,建立最佳三角级数逼近模型,在最佳拟合优度和误差水平下,探讨了台湾地震区地震趋势应处于多种地震活动周期叠加合成的低水平变化阶段。

对极大值地震时间过程的最佳平方三角级数逼近能给出地震极端情况的发展趋势,极大地地震应围绕趋势线上下波动,波动幅度在历史数据建立模型参差的2倍标准误之内。模型评估预测不可预测时间太长,时间步长越长,误差越大(即预测边界的发散效应),应不断加入实际区间数据做动态单步追踪为好。

采用三角级数方法寻找几个主要周期,三角级数模型中用最佳平方逼近方法处理而舍弃的残差余波序列,给出了最终预测误差指标,今后,有待于对最终残差余波的信息挖掘利用,提高预测<sup>[25-27]</sup>。

由于地震观测资料有限,地震预测处于探索阶段,科学上还不成熟,本文对台湾地震区地震趋势的结果只是探讨性预测检验,不对未来做预报。方法仅供学习,结果仅供参考,与实际地震预报无关。

## 参考文献:

- [1] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33 (S1): 12-20.
- [2] 薛 丁. 基于活动地块边界带的加卸载响应比参数对海城地震中短期预测的应用[J]. 防灾减灾学报, 2005, 30 (4): 10-14.
- [3] 薛 丁. 基于活动地块的测震学参数对西南地区强震中期预测应用 [C]/中国地震学会地震预报专业委员会. 地震海啸与地震预报实验场学术研讨会摘要集. 北京: 中国地震学会地震预报专业委员会, 2005.
- [4] 薛 丁, 曹井泉. 基于活动地块的测震学参数中期地震预测应用[J]. 西北地震学报, 2005, 27 (S1): 77-82.
- [5] 薛 丁. 基于活动地块边界带的测震学参数  $C$  值对丽江地震的预测应用[J]. 高原地震, 2007, 19 (4): 16-19.
- [6] 薛 丁. 基于活动地块边界带的测震学参数  $M_i$  值对丽江地震的预测应用[J]. 地震, 2008, 28 (2): 74-78.
- [7] 薛 丁, 张建业, 王立巍. 基于活动地块边界带的汶川强余震迁移分析[J]. 高原地震, 2009, 21 (2): 1-3.
- [8] 薛 丁. 全球大地震活动趋势的数学建模分析[J]. 国际地震动态, 2008, 38 (11): :61-61.
- [9] 薛丁. 东北地震区地震活动趋势数学建模分析[J]. 防灾减灾学报, 2008, 23 (3): 17-20.
- [10] 薛 丁. 全球大地震活动趋势的数学建模分析[C]/中国地震学会、中国地震局地球物理研究所. 国际地震动态. 中国地震学会第十二次学术大会论文摘要专集. 北京: 中国地震学会、中国地震局地球物理研究所, 2008.
- [11] 薛 丁, 王亮. 中国大陆地震趋势数学建模分析[J]. 高原地震, 2008, 20 (2): 1-3.
- [12] 薛 丁, 王立巍, 赵蒙生. 汾渭地震带地震趋势数学建模分析[J]. 地震, 2010, 30 (1): 147-151.
- [13] Bochner S, Chandrasekharan K. Fourier Transforms[M]. Princeton, New Jersey: Princeton Univ. Press, 1949.
- [14] Zygmund A. Trigonometric Series[M]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1968.
- [15] Cooley J W, Tukey J W. An algorithm for the machine computation of complex Fourier series[J]. Mathematics of Computation, 1965, 19: 297-301.
- [16] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [17] 王 济, 胡 晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2006.
- [18] 徐士良. C 常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [19] 卢寿德. 国家标准 GB17741-2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB17741-2005 工程场地地震安全性评价[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005. .
- [21] 陆远忠, 李胜乐, 邓志辉, 等. 基于 GIS 的地震分析预报系统[M]. 成都: 成都地图出版社, 2002.
- [22] 国家地震局分析预报中心(编). 中国东部地震目录(1970—1979,  $M \geq 1$ )[M]. 北京: 地震出版社, 1980.
- [23] Pickands J. Statistical inference using extreme order statistics[J]. The Annals of Statistics, 1975, 32: 256-259.
- [24] Longin F M. From value at risk to stress testing: The extreme value approach [J]. Journal of Banking and Finance, 2000, 24: 1 097-1 130.
- [25] 柯龙生. 地震活动周期的谱分析[J]. 华南地震, 1989, 9 (1): 17-22.
- [26] 邓 韞. 地震周期的存在及形成机制讨论[J]. 华南地震, 2003, 23 (1): 51-56.
- [27] 徐清华, 杨林根, 张明哲. 方差分析叠加周期外推法在地震预测中的应用[J]. 华南地震, 2015, 35 (1): 74-83.