

马禾青, 杨明芝. 地震活动的随机场特征[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3): 542-548. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.542
MA Heqing, YANG Mingzhi. Random Field Features of Seismic Activity[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 542-548. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.542

地震活动的随机场特征

马禾青, 杨明芝

(宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要: 地震活动是一种随机自然现象, 将其基本要素变量看作是空间和时间的函数, 它们具有随机场的基本特征, 由此得到地震活动的随机场描述。重点讨论在一定条件下地震活动能量场和频次场的统计特征及地震活动场的平稳性问题, 说明应用随机场方法研究地震活动的合理性。

关键词: 地震活动; 基本要素; 随机场; 统计特征

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)03-0542-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.542

Random Field Features of Seismic Activity

MA Heqing, YANG Mingzhi

(Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: Seismic activity is a random natural phenomenon. When variables of basic elements of seismic activity are taken as temporal and spatial functions they are found to have basic random field features. This paper discusses the statistical features of energy and frequency fields of seismic activity under certain conditions, in addition to stationary problems found within the seismic activity field. Results show that it is rational to use the random field method to study seismic activity. Through a discussion of the energy distribution of seismic activity and statistical characteristics of the time distribution of earthquakes, the following conclusions are drawn: (1) Seismic activity has random field distribution characteristics and can be seen as a type of random field; therefore, it is possible to conduct quantitative mathematical studies of seismic activity using the random field method. (2) The logarithmic values of energy released by seismic activity obey the distribution law of the exponential function expressed in the paper; however, the distribution laws differ in different regions due to influence of the b value. (3) Under the condition of stationary activity, the temporal distribution of small earthquake activity in a certain region obeys the poisson distribution. (4) In most cases, the statistical characteristics of seismic activity can be basically maintained, as long as the regional stress distribution has not subversively changed, and seismic activity in this region can be considered to be in a stable state.

Key words: seismic activity; basic element; random field; statistic feature

0 引言

众所周知,地震活动是一种随机自然现象,其随空间坐标和时间的变化具有十分复杂的情形。将地震活动的要素变量看作空间和时间的函数^[1],采用随机场的理论和方法研究地震活动性问题,应该是解决地震活动问题的最佳途径。

笔者曾应用随机场理论和方法研究了 2008 年四川汶川 8.0 级大地震能量场异常^[2-3],继而又对我国大陆 30 余次 6 级以上地震的能量场进行了研究^[4],还开展过其他工作^[5-6]。其他学者也曾开展过相应工作^[7-8]。几十次地震震例证明,随机场方法是一种提取地震活动异常的有效方法,采用该方法在地震活动的定量数学化研究中具有重要的理论和实际意义。

本文主要讨论地震活动基本的随机场特征,以便深入探讨随机场方法描述地震活动的理论意义。

1 地震活动变量与地震随机场

概率论中将随机取值的变量称为随机变量,若其是一个自变量或几个自变量的某种函数,则称作随机场。地震的发生是随机事件,所谓地震活动性就是指地震发生的随机性及其统计特性。

地震目录中列出了地震发生时间 t 、震中经纬度 $r(\lambda, \varphi)$ 、震源深度 h 和震级 M 等地震观测量。如果把地震发生看作是随机试验,从统计学的观点来看,这些量在地震之前是不能预知的,只决定于地震发生的结果。从这些基本观测量中可以衍生出一系列描述地震活动的变量,如地震频次、地震释放能量、地震应变和地震序列参数等,它们都是具有随机变量意义的地震活动变量。

地震活动变量分为定性和定量两类变量。所谓定性变量是以地震活动的某种特征表示的一类变量,例如地震活动的增强和平静、地震空区(段)、地震条带、地震迁移和地震重复等;而定量变量是指可以用数值表示的变量,如地震释放能量、地震发生频度(发生率)和地震应变等。

在地震活动分析中,定性变量过于概略而含糊,不能准确全面地反映地震活动性的时空特征,因此主要采用定量变量进行地震活动描述。

在各种变量中,表征地震活动的物理状态和物理性质最基本的要素变量有两个:

(1) 区域单位时间内所释放的地震能量 E ;

(2) 区域单位时间内所发生的大于一定震级的地震次数 N 或地震发生率 ν 。

有意思的是,地震频次更多地突出小震级地震的作用,侧重于地震活动的统计性一面;而地震释放能量则突出了大震级地震的作用,侧重于反映地震活动的物理性一面。

在地震学中更多地使用震级参数,但其仅仅表征发生地震的大小,而不具备描述地震活动物理本质特性的意义。实际上能量的转化与交换是所有物理运动的本质特性,地壳也是一个物理系统,因此它满足基本的能量、质量及动量平衡方程,而地震活动在其中扮演了地壳能量转化过程的一个重要参与者角色。地震活动能量释放恰好反映了一个区域、一个构造块体甚至地壳大系统能量平衡过程的一部分。因此其是地震活动的本质特征,也是地震活动最基本的要素变量。

地震发生率或地震活动频次是另一个反映地震活动本质特征的要素变量。一个地区发生的地震主要与两个因素有关,一是区域的应力水平,二是区域构造的强度。如果一个地区地震活动频繁,说明这个地区应力水平比较高,或者区域地壳介质中存在的各种尺度地震构造的破裂强度比较低,反之亦然。因此小地震的活动在一定程度上反映了区域地震构造的力学状态,反映了区域形变能量积累和释放微动态转化的频繁程度。地震频次从另一个侧面反映了地震活动的物理本质特征。

将具有定量特点的地震活动基本要素变量看作是空间、时间或其他自变量的函数,便可得到地震活动的随机场描述。

将具有定量特点的、描述地震活动某种特征的变量或要素看作是空间和时间的函数,其具有随机变量的特征,称为地震活动场(要素场)。例如在讨论某一较大区域地震释放能量或地震发生率的时空特征和相互联系时,地震能量(或发生率)就可看做一个地震活动的要素场,它是依赖于空间和时间的函数 $f(x, y, z, t)$,其中 x, y, z, t 分别表示震中位置、震源深度和发震时间。如果不考虑震源深度变量 z ,那么地震要素场就是一个二维平面分布场,可表示为地理坐标经度、纬度和时间的函数 $f(\lambda, \varphi, t)$ 。

地震活动场是表示地震活动的状态函数。将地震活动变量看做随机场,用随机场方法研究地震活

动,更能够充分考虑地震活动在空间、时间上的差异和联系,以此寻求小地震活动异常与大地震的关系,可能是解决问题的重要思路和途径。

其实自然界中许多物理运动或现象,例如分子的运动、固体中的热缺陷、波噪声甚至量子运动在某种意义上都可看成随机场。

由于地震的发生是不连续事件,地震活动一般由离散型随机变量来描述。地震活动场函数不可能表达为一个通常意义上的连续函数形式,只能得到离散型的数据,通过对原始数据进行整理后,以矩阵函数的形式表示。

为此,根据地震观测的具体特点进行空间网格化和时间离散化处理。先将研究区域进行网格化,把区域等间隔地划分成 n 个网格,每一个网格相当于一个观测点,认为网格内的地震能量(或频次)观测值为这个观测点值。例如,在时间 $t_1 \sim t_2$ 期间,选取一个时间间隔元 Δt ,统计各网格内各时段的地震能量观测值,得到 n 个能量时间序列,以矩阵形式表示为:

$$f = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{m1} & E_{m2} & \cdots & E_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: F_{ij} 表示第 j 网格($j=1,2,\dots,n$)、第 i ($i=1,2,\dots,m$) 时段能量释放值; E 为能量矩阵,是一个 $m \times n$ 的矩阵。

式(1)是能量场的函数表示,反映了地震活动能量的时、空分布基本特征。网格化的方法类似于建立一种描述地震活动的相空间。在进行区域网格化时,一般面积元 ΔS 和时间步长 Δt 要根据区域地震活动性的水平进行选择,大小要适中。

2 地震随机场的分布特征

随机场的特征主要由场的分布函数给出。只要已知随机变量的概率分布函数,其统计特征量可由分布函数完全确定,以下重点研究地震能量场和频次场相应的分布规律及特征。

2.1 地震能量的统计分布

从著名的古登堡-里克特的震级-频度关系(简称 G-R 关系式):

$$\lg n(M) = a - bM \quad (2)$$

和地震能量-震级统计关系式:

$$\lg E = 4.8 + 1.5M_s \quad (3)$$

得到地震释放能量分布,可以表示为:

$$N(E) = N_0 \cdot 10^{-b(\lg E - 4.8)/1.5} \quad (4)$$

式(4)表示地震能量对数值的分布密度。由此,区域能量分布曲线如图 1 所示。

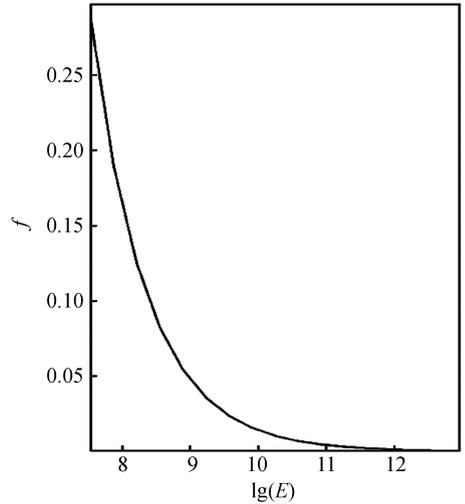


图 1 能量对数值分布曲线

Fig.1 Distribution curve of logarithmic values of energy

设统计区域内发生地震能量的对数 $\lg E$ 到 $\lg E + d \lg E$ 的地震次数为 n ,其中 $d \lg E$ 表示能量的对数增量。设地震总数为 N_0 , $x = \lg E$,则 x 出现的频率可表示为:

$$f(x) = \frac{n}{N_0} \quad (5)$$

利用式(5)可以研究某一区域地震活动能量的实际分布情况。作为例子,表 1 列出了 4 个不同地区的统计范围和时间段,图 2 给出这 4 个地区地震活动能量的分布曲线。可以看出,这 4 个地区能量的分布曲线基本类似,并与理论曲线拟合较好。

实际上,由于式(4)来源于 G-R 式,故一个地区地震活动的能量分布取决于 b 值, b 值不同则能量分布有所差异,但不同地区地震活动能量的频次分布形式符合式(4)给出的规律。

2.2 地震发生的时间分布

地震发生的时间分布常常被用来推断地震的发生过程和进行预测研究,但其有关分布模式并没有得到确定结果。事实上,若适当地选取时间分段,在各分段以内地震活动是平稳的,则地震活动时间间隔在很多情况下符合泊松分布。若符合泊松分布,则意味着可将地震发生看作是相互独立的,且发生一次地震后地震场的状态不受影响,这在物理上有充分依据。例如地震与一个极大的能量储存源相连

接,在地震发生后就立即恢复到其原状,或者说相对于能量的储存量,大多数地震的能量都很小,由此产生的扰动不足以使下次地震的易发性增加。另外,若发生地震的地点相距较远,则彼此间互不影响也

是很可能的。因此某一区域某一时间段内的地震活动若是平稳的,则地震的发生可以近似看做是相互独立事件,那么可以用平稳泊松过程来表示地震发生在时间方面的分布特征。

表 1 统计区域及时段

Table 1 Statistical regions and periods

地区	区域范围/(N,E)	时间段/(年-月)	b 值
宁夏及周围地区	35.5°~39.5°,103.0°~107.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	0.792 4
华北地区	38.0°~41.0°,110.0°~120.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	0.823 9
2008 年汶川 8.0 级地震周围地区	30.0°~33.5°,101.5°~106.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	0.785 7
云南东部地区	23.0°~27.0°,101.0°~104.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	0.671 5

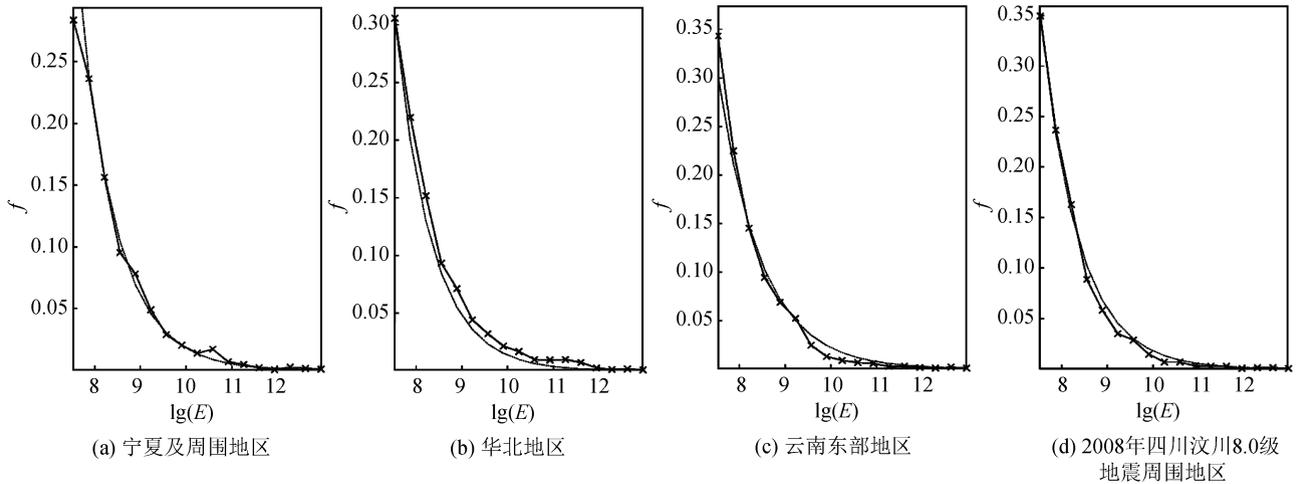


图 2 地震能量对数值的分布曲线

Fig.2 Distribution curves of logarithmic values of seismic energy

泊松分布表示为:

$$p(x) = \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} \quad (6)$$

当研究地震发生的时间过程时引入时间变量 t , 令 $\mu = \lambda_0 t$ (λ_0 为地震发生率), 则平稳泊松过程的概率函数为:

$$p(n, t) = \frac{(\lambda_0 t)^n}{n!} e^{-\lambda_0 t} \quad (7)$$

根据式(7), 在时间间隔 $(0, t)$ 中平稳泊松过程的地震累计发生次数 N 的期望值为:

$$E[N(t)] = \sum_{n=0}^{\infty} n p(n, t) = \lambda_0 t \quad (8)$$

于是,地震累计发生次数 N 随时间 t 线性增加。由此,可直接得到地震发生率为:

$$\lambda_0 = \frac{E[N(t)]}{t} = \frac{N}{t} \quad (9)$$

同时,若地震发生服从泊松分布,则意味着地震发生的时间间隔服从指数分布:

$$f(t) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} \quad (10)$$

造成地震活动时间偏离泊松分布可能有以下原因:一是震群和余震的影响;二是地震场受到某种不明原因的较大影响,如区域孕育较强地震;三是空间上不同构造的活动差异影响。

下面取表2所列的5个多地震地区来讨论地震

表 2 统计区域及时段

Table 2 Statistical regions and periods

地区	区域范围/(N,E)	时间段/(年-月)	1/λ	N ₀ /(次)
宁夏及周围地区	35.5°~39.5°,103.0°~107.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	7.894 5	1 850
华北地区	38.0°~41.0°,110.0°~120.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	6.296 6	2 321
2008 年汶川 8.0 级地震周围地区	30.0°~33.5°,101.5°~106.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	6.646 9	2 196
云南东部地区	23.0°~27.0°,101.0°~104.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	5.769 4	2 525
新疆喀什周围地区	38.0°~42.0°,75.0°~80.0°	1970 年 1 月—2009 年 12 月	3.083 6	4 737

发生的时间分布问题。各地区的统计范围和研究时间段如表2所列。资料取 $2.5 \leq M_L \leq 5.5$ 地震并剔除余震,统计地震发生的时间间隔 $T_k = t_{k+1} - t_k$ ($k = 1, 2, \dots, n$)。设地震总数为 N_0 , 时间间隔 $\Delta T = t$, 地震从时间 t 到 $t + dt$ 的地震次数 n , 则 t 的频率可表示为:

$$f(t) = \frac{n}{N_0} \quad (11)$$

利用式(11),按时间差 $dt = 1$ 天进行分档,计算各时间间隔分档的频率 $f(t)$ 。图3是表2所列的5个区域1970年1月至2009年12月40年期间区域地震发生的时间间隔归一化频率分布曲线、地震发生累计次数和指数分布的Q-Q检验图。

图中各地区的地震时间间隔频次曲线,如果用指数分布函数来拟合,除了时间低端点(间隔1、2天)外,整体上拟合很好(图中红色虚线表示拟合曲线)。若将时间间隔数据与已知指数分布的理论数值进行Q-Q图检验,则图形接近直线,说明地震时间间隔频次分布近似服从指数分布。

各图中的第(II)图是相应地震发生累计次数曲线(以3个月为时间单位),其基本上呈直线变化趋势。其中宁夏地区和汶川8.0级地震震中周围地区的小地震累计发生次数曲线基本为直线,其他3个地区地震发生累计次数曲线虽然有短期偏离直线情况,但整体上没有改变曲线的变化趋势。累计次数曲线的短期偏离可能是一种正常起伏现象,这种短期起伏可能是由于某种不清楚的原因或发生较大地震的干扰造成的。干扰会造成分布参数的改变,干扰过后便会恢复正常变化。从图中可以看到,2008年四川汶川发生8.0级地震后,分布曲线依然没有发生明显的改变。在时间间隔的频次曲线上,5个地区地震活动的时间间隔分布曲线基本符合指数分布类型。

地震发生累计次数的线性增长说明,除了余震或震群事件外,地震发生基本上是一种独立事件,前一个地震的发生不会影响后续地震发生,因此地震发生可以看做是泊松分布类型。只要区域应力分布的基本格局没有发生根本改变,则区域地震发生的分布类型就能够基本维持。

以上列举的5个地区地震活动的发生时间间隔符合指数分布,因此可以将这几个区域地震的发生近似看做泊松分布类型。但各地区的分布参数差别很大,分布参数 $\frac{1}{\lambda}$ 反映了地震活动活跃程度。同样面积的区域,分布参数 $\frac{1}{\lambda}$ 越小,则区域地震发生率就

越大,地震就越活跃;反之,地震活动相对较弱。

综上所述,从前面讨论的地震活动的能量分布、地震发生时间分布的统计特性,可以得到以下认识:

(1) 地震活动释放能量的对数值服从式(4)表示的指数函数分布规律,但各地分布规律主要受 b 值的影响而存在差异;

(2) 在平稳活动情况下,剔除余震后区域小地震活动的时间分布服从泊松分布规律。

3 地震活动场的平稳性

场的平稳性可以理解为场的统计性质不随时间而变化。作为随机场的现实是采用不同时刻进行的观测,并认为这些观测是在某种意义上相似的时间区间中取得,并可用于联合统计整理的观测资料。也就是说,这些资料必须具备统计的平稳性条件。因此,分析与实际问题有关的地震活动场问题,首先要从它是否可以看成是平稳函数这个角度来加以考虑。

平稳性更准确的概念由分布律确定。对于一个随机过程 $x(t)$,若满足以下两个条件:

(1) $x(t)$ 的数学期望是常数,即:

$$E[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \text{常数} \quad (12)$$

(2) 自相关函数与选择自变量 t 的计算起点无关:

$$R_x(t_1, t_2) = R_x(t_2 - t_1) = R_x(\tau) \quad (13)$$

则称为各态经历过程,它们是平稳性的必要条件。

以汶川8.0级地震震中周围地区1970—2000年地震活动能量和频次序列的自相关函数情况为例,图4是该地区地震能量和频次相关函数及拟合曲线(其中虚线为拟合曲线)。当取最大后延时间为2.5年时,地震相关函数可用下面的函数来逼近。

(1) 地震能量自相关函数

$$R(\tau) = 698.2e^{-0.7\tau^2} \cos(1.33\tau) \quad (14)$$

(2) 地震频次自相关函数

$$R(\tau) = 14.1540e^{-0.90\tau} \cos(0.79\tau) \quad (15)$$

可见,汶川8.0级地震震中周围地区地震活动能量和频次随机序列的自相关函数可以表示为只与时间差 τ 有关的函数。实际上,多数情况下区域地震活动的自相关函数大体满足式(12)和(13)给出的条件,可以认为地震活动是平稳的。当然各地区地震活动自相关函数的具体形式有很大差别,不太可能都能够找到一个简单的函数形式来逼近和描述。

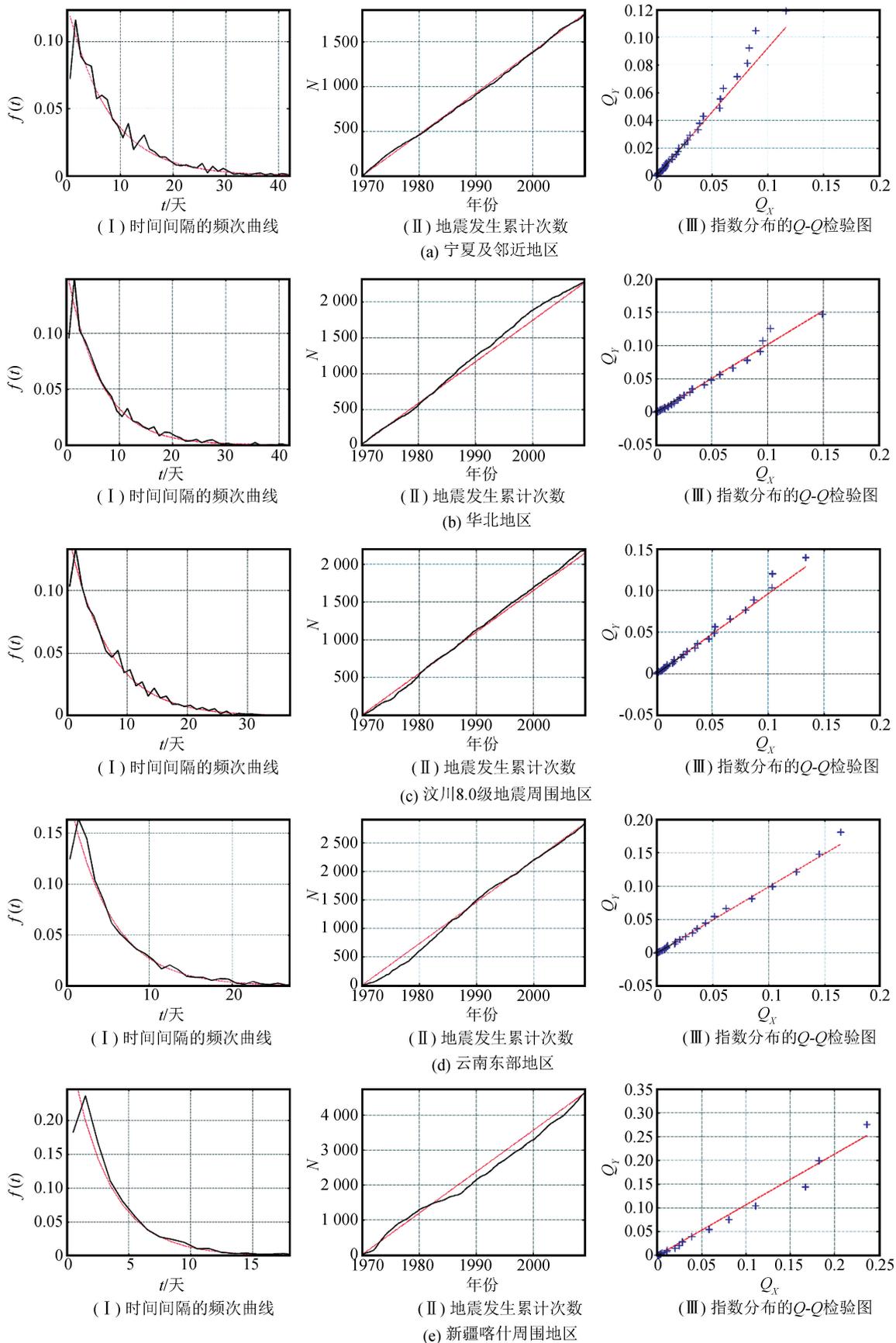


图 3 5 个区域 1970 年 1 月至 2009 年 12 月地震发生的时间分布统计特性

Fig.3 Statistical characteristics of temporal distribution of earthquakes in five regions from January 1970 to December 2009

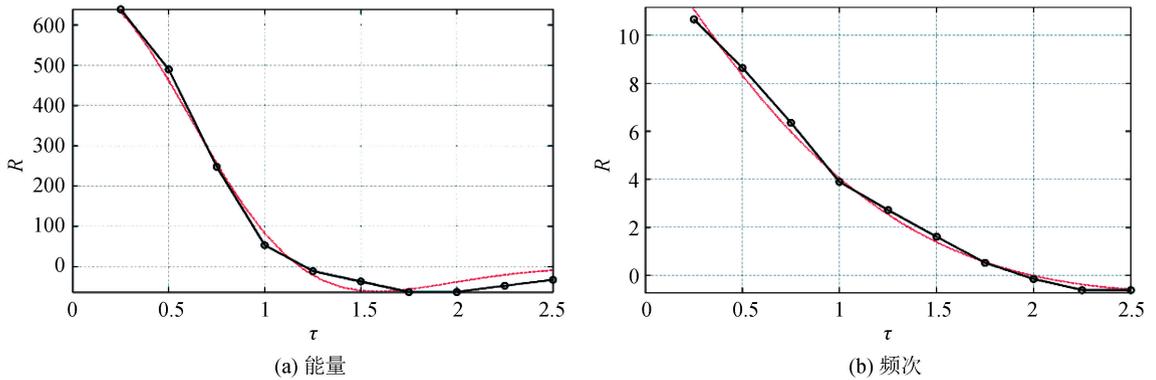


图4 1970—2000年汶川地区地震能量和频次自相关函数及拟合曲线($2.5 \leq M_L \leq 5.5$)

Fig.4 The auto-correlation function and fitting curves of earthquake energy and frequency in Wenchuan area from 1970 to 2000 ($2.5 \leq M_L \leq 5.5$)

而与平稳过程相反的是非平稳过程,例如区域发生大地震,地震活动的统计特征可能会发生很大变化,平稳性遭到破坏,这就是所谓地震活动“异常”的发生。但实际情况表明,这种变化通常是暂时的,只要区域应力分布格局没有发生颠覆性变化,一个地区地震活动的统计特征基本可以得到维持。

4 结语

综上所述,我们实际讨论了在平稳活动情况下(一般剔除余震),地震活动的能量分布和地震发生时间分布的统计特性。对地震活动得到以下认识:

(1) 地震活动具有随机场的分布特征,可以看作是一种随机场,采用随机场方法对地震活动进行定量数学化研究是合理的;

(2) 地震活动释放能量的对数值服从式(4)所示的指数函数分布规律,但各地分布规律主要受 b 值的影响而存在差异;

(3) 在平稳活动情况下区域小地震活动的时间分布服从泊松分布规律;

(4) 多数情况下,只要区域应力分布格局没有发生颠覆性变化,地震活动的统计特征基本可以得到维持,区域内地震活动便可认为是平稳的。

参考文献(References)

[1] 马开玉,丁裕国,屠其璞,等.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社,2002.
MA Kaiyu, DING Yuguo, TU Qipu, et al. Principle and Method about Climatic Statistics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.

[2] 杨明芝,马禾青.汶川8.0级地震前沿龙门山断裂带能量场变化[J].中国地震,2011,27(3):260-267.
YANG Mingzhi, MA Heqing. Variation of Energy Field of Longmenshan Fault Zone Before the Wenchuan $M_S 8.0$ Earth-

quake [J]. Earthquake Research in China, 2011, 27(3): 260-267.

[3] 杨明芝,马禾青.汶川8.0级地震区域地震能量场分析[J].地球物理学进展,2012,27(3):872-877.
YANG Mingzhi, MA Heqing. Analysis of Regional Seismic Energy Field Before Wenchuan $M_S 8.0$ Earthquake [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 872-877.

[4] 杨明芝,马禾青.大地震前区域能量场的时间因子异常特征[J].地震,2013,33(3):107-115.
YANG Mingzhi, MA Heqing. Features of Time Factor Anomalies of Regional Energy Field Before Large Earthquakes [J]. Earthquake, 2013, 33(3): 107-115.

[5] 杨明芝,赵卫明.宁夏及邻近地区地震活动能量场的统计分析[J].地震学报,2004,26(5):516-522,567.
YANG Mingzhi, ZHAO Weiming. The Statistical Analysis about the Seismic Activity Energy Field on Ningxia and Its Neighbouring Region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(5): 516-522, 567.

[6] 马禾青,杨明芝.2010年青海玉树7.1级地震能量场研究[J].地震研究,2012,35(4):485-490.
MA Heqing, YANG Mingzhi. Study on the Energy Field about Yushu $M=7.1$ Earthquake, Qinghai, 2010 [J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(4): 485-490.

[7] 罗国富,屠泓为,马禾青,等.甘东南至陕甘宁交界中强震危险区地震活动能量场时空特征[J].西北地震学报,2012,34(2):132-137.
LUO Guofu, TU Hongwei, MA Heqing, et al. Space-time Distribution Characteristics of Energy Field of Seismic Activity for the Southeastern Part of Gansu Province to Shaanxi—Gansu—Ningxia Boundary Region Moderate-Strong Earthquake Hazard Area [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 132-137.

[8] 罗国富,曾宪伟,马禾青,等.岷县漳县6.6级地震前地震活动能量场分析[J].地震工程学报,2014,36(2):314-319.
LUO Guofu, ZENG Xianwei, MA Heqing, et al. Analysis of Energy Field of Seismic Activity before the Minxian—Zhangxian $M_S 6.6$ Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 314-319.