

运用小波变换方法研究华北地区的地震活动性*

张小涛^{1,2}, 冯向东³, 张跃刚³, 张双凤¹, 杨雅琼³, 韩丽萍¹

(1. 河北省地震局邯郸中心台, 河北 邯郸 056001; 2. 吉林大学 地球探测科技与技术学院, 长春 130026;
3. 河北省地震局, 石家庄 050021)

摘要: 运用小波变换方法, 以不同的小波时间尺度分析了华北地区 1480 ~ 2009 年 $M \geq 5.0$ 和 1970 ~ 2009 年 $M \geq 4.0$ 地震的贝尼奥夫应变数据, 得到了不同时间尺度的地震活跃期和平静期。分析表明: 目前华北地区从 1480 年以来的 $M \geq 5.0$ 地震活动刚过活跃期, 处于应力积累阶段, 而 1970 年以来 $M \geq 4.0$ 地震存在 7 年左右的活动周期, 目前正在进入 4 级以上地震的活跃期。

关键词: 贝尼奥夫应变; 小波变换; 地震活跃期; 地震平静期; 华北地区

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2011)01-0024-06

0 引言

表征地震活动性的各种参数从不同角度对地震活动的特征进行了完整、系统的描述, 成为地震预测预报的重要参考依据, 但是地震活动在时间轴上的分布是否有规律可循, 多年来一直是个有争议的问题。马宗晋等 (1982)、张国民等 (1987, 2000)、张培震等 (2003) 对我国的地震活动作了分析, 发现在不同的时期, 地震活动显示了平静和活跃变化; 同一地震区内的地震活动具有某种程度的自相似性, 在时间分布上具有某种“似周期性”分布特征; 在不同时期地震发生的频度和强度有较明显的不同 (时振梁等, 1997)。Benioff (1951) 曾把 1900 ~ 1950 年全球的地震活动分为 5 个时段, 指出地震活动存在地震活跃期和相对平静期; 马宗晋等 (1982) 指出地震活动强弱随时间分段现象在我国大陆地区是相当普遍的, 而且强弱变化的时间范围长短不一; 张国民和张培震 (2000)、傅征祥等 (2000) 讨论了华北地区 $M \geq 7.0$ 强震的时间分布, 发现在每一个地震活跃期内大地震的积累频度曲线随时间的变化大致呈指数函数形式; 万永革等 (2003) 也分析了中国大陆地区 $M \geq 5.0$ 地震活动的周期性, 得到了不同时间尺度的地震平静期和地震活跃期; 刘虹和苏有锦 (2007) 研究了 1970 年以来云南地

区 $M_s \geq 7.0$ 地震的各种活动参数, 发现震源区地震活动水平在大地震前后有很大的差异; 苏有锦等 (2001) 研究了 20 世纪以来云南地区 $M_s \geq 5.0$ 地震的活跃期与平静期的交替过程。总之, 活跃期和平静期的划分对地震预测预报, 特别是强震的中短期分析预报甚至短临预报工作具有十分重要的意义, 是我国地震预测研究中一个不可缺少的环节 (马宏生等, 2002, 2005)。

华北地区作为中国内陆的地震多发区, 一直备受地震学家的关注。如何从不同尺度上划分活跃期和平静期, 并在大尺度活跃期 (或平静期) 中提取小尺度的活跃期和平静期, 进一步为地震预测预报提供依据? 在传统的 $M-t$ 图上难以找到地震活动演化过程突变点。小波分析方法具有能够根据分析对象不同而自动调整有关参数的“自适应性”和能够根据观测对象不同而自动“调焦”的特性, 因而被广泛应用于地震研究的各个领域 (刘希强等, 1998; 吴忠良, 1999; 邵辉成等, 2000; 徐义贤, 王家映, 2000)。笔者采用小波变换方法, 从不同时间尺度和震级尺度研究了华北地区的地震在时间上的分布规律, 以期对地震预测预报提供参考。

1 小波变换的原理

一个地震时间序列 $f(t)$ 是由不同强度的地震

* 收稿日期: 2010-03-09.

基金项目: 河北省科技厅项目“地震预测与方法研究”(09276904D) 资助。

构成的，在 t 时刻地震的强度可以表示为

$$f(t) \sim t^a. \quad (1)$$

其中 a 为奇异性指数或标度指数。奇异性是指 $t \rightarrow 0$ 时 a 的数值（特别是 $a < 0$ ）决定了 $f(t) \rightarrow 0$ 的速度。标度性是指若变量 t 变成 λt ，则 $f(t)$ 和 $f(\lambda t)$ 是自相似的，即

$$f(\lambda t) = (\lambda t)^a = \lambda^a t^a = \lambda^a f(t). \quad (2)$$

式(2)常称为标度律。自相似的标度律是多种尺度（即无特征尺度）现象的特征。地震资料的时间序列含有多种不同尺度。直观地看 $f(t)$ 是杂乱无章的，但小波变换好比显微镜，调节其中的放大倍数就可以清楚地看出 $f(t)$ 在各个层次上的变化趋势。小波变换 T_g 是将 $f(t)$ 分解成具有局部特性的小波 $g(t)$ ：

$$T_g(a, t_0) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t - t_0}{a}\right) dt. \quad (3)$$

其中， $\frac{1}{a} g\left(\frac{t - t_0}{a}\right)$ 小波是将具有局部特性的小波函数 $g(t)$ 通过平移 t_0 和放大（放大倍数为 $1/a$ ）而构成的。参数 a 具有时间的量纲，也称为小波尺度。

设 $\theta(t)$ 为具有低通性质的平滑函数，以它的一阶、二阶导数作为小波对 $f(t)$ 作小波变换，可以证明 (Logan, 1977)

$$W_{\varphi^1} f(a, \tau) = f(t) * \varphi^1(at) = a \frac{d}{dt} [f(t) * \theta(t)], \quad (4)$$

$$W_{\varphi^2} f(a, \tau) = f(t) * \varphi^2(at) = a \frac{d^2}{dt^2} [f(t) * \theta(t)]. \quad (5)$$

式中， $*$ 表示卷积。也就是说，用 $\varphi^1(t)$ 、 $\varphi^2(t)$ 对 $f(t)$ 作小波变换，分别相当于 $f(t)$ 被 $\theta(t)$ 平滑后对 t 求一阶或二阶导数。因此，对某一固定 a 值， $f(t) * \theta_a(t)$ 的拐点既是 $W_{\varphi^1} f(a, \tau)$ 的极值点，又是 $W_{\varphi^2} f(a, \tau)$ 的过零点，由此可检测地震活动信号的急剧变化之处 (Mallat, 1991; Mallat, Hwang, 1992)。

本研究中采用具有低通滤波性质的平滑高斯函数，根据它的一阶导数、二阶导数作为小波基

函数进行突变点分析。小波函数的表达式为

$$g(t, a) = \begin{cases} \frac{1}{a} e^{-\frac{t^2}{2a^2}} \\ \frac{t}{a} e^{-\frac{t^2}{2a^2}} \\ (1 - \frac{t^2}{a^2}) e^{-\frac{t^2}{2a^2}} \end{cases} \quad (6)$$

选择该函数是因为它对称、可微、可积，时域、频域都是高斯型且呈平方型指数衰减，在时、频两域均具有很好的局域性。运用小波变换可以准确地识别出突变点，运用高斯函数作为小波基的小波变换相当于对原来的信号做平滑处理，而运用高斯函数的一阶导数作为小波基的小波变换可精确地找到信号所对应的突变点：若脉冲向上则表示信号增大，反之表示信号减弱（万永革，2007）。如果使用傅立叶变换，就只能从频率轴来分析该信号是由哪些频率的波组成的，它只是将这些信息铺开到整个频率轴上。但是地震资料 $f(t)$ 组成的序列并不是平稳的，而是随时间不断变化，傅立叶变换并不能提取 $f(t)$ 中的奇异性 and 突变点的信息。

2 地震资料选取

应变与构造应力和地震活动是联系紧密的物理量，在地震分期研究中较为常用（夏浩明，1987）。为了表征某个地区在不同时期的地震活动特征，根据该地区的应变积累和释放变化，可将强震活动划分为若干周期，每一周期包括一个应变能释放高潮和低潮。一个地区的地震能量释放是局部状态的表征，由于地震辐射能量的平方根与地震的应变释放成正比，在研究中常用应变释放来表征地震能量释放。根据历史地震目录可以推算出地震应变释放的大小。

本文采用贝尼奥夫曲线 (Benioff, 1951) 来表征华北地区地震应变能的释放。计算贝尼奥夫应变时采用时振梁等 (1997) 的公式：

$$\varepsilon_{b(t)} = \sum 10^{(4.8+1.5M)/2}. \quad (7)$$

式中， $\varepsilon_{b(t)}$ 为以 t 时刻为中心的 $0.1 a$ 之内的贝尼奥夫应变积累，即某一地区 $0.1 a$ 内所有大于 M 级地震对应应变释放的贡献； M 为震级。地震目录

资料的选取对研究结果有很大的影响。华北地区的地震资料在 1480 年以后是比较完整的（黄玮琼等，1994），因此笔者结合《中国历史强震目录（公元前 23 世纪—公元 1911 年）》（中国地震局震害防御司，1995）和中国地震地震台网中心地震目录选取了 1480 ~ 2009 年华北地区（ $110^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ ， $34^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$ ）1 449 个 $M \geq 4.0$ 的地震进行研究（图 1）。

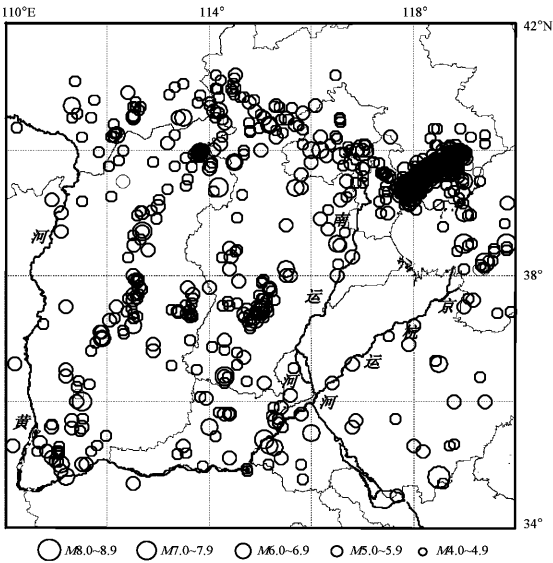


图 1 研究区内 $M \geq 4.0$ 地震震中分布图
Fig. 1 Epicenter distribution of $M \geq 4.0$ earthquakes in North China

3 地震资料的小波分析

贝尼奥夫应变曲线表述了一个地区地震能量积累的特性，通过研究贝尼奥夫应变曲线可以反映该区内地震能量的释放变化过程，但是用贝尼奥夫应变不能明显地划分出不同时间尺度和层次上地震活动的平静期和活跃期。笔者分别对华北地区 1480 ~ 2009 年 $M \geq 5.0$ 的地震和 1970 ~ 2009 年 $M \geq 4.0$ 的地震进行计算，得到了两组贝尼奥夫应变数据，然后分别以高斯函数及其一阶导数为小波基进行小波变换，分析不同尺度的平静期和活跃期。

图 2 为研究区内 1480 ~ 2009 年 $M \geq 5.0$ 地震的贝尼奥夫应变曲线及其相应的小波变换。图 2a 最上端一条是贝尼奥夫应变去均值的原始资料曲线，下边为不同时间尺度以高斯函数为小波基的小波变换曲线；图 2b 是不同时间尺度以高斯函数一阶导数为小波基的小波变换，图中数字是对应的小波时间尺度。从小波变换曲线能够看出，总体上华北地区自 1480 年以来 $M \geq 5.0$ 地震大约呈 300 a 的周期性变化，无论采用哪种小波尺度，这种周期性都较为明显。在过去的 530 多年时间内华北地区大致经历了两个活动期，前一活跃期高峰在 1668 年郟城 8.5 级地震前后，后一活跃期高峰在 1976 年唐山 7.8 级地震前后。从小波变换的曲线

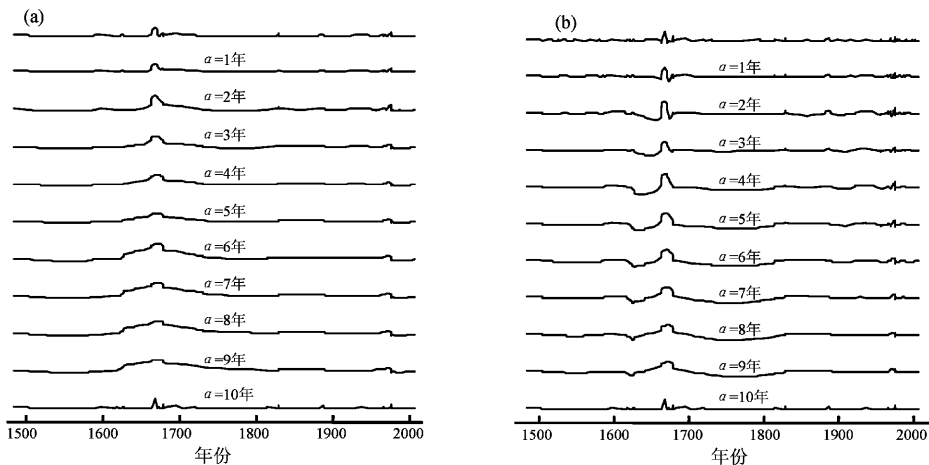


图 2 研究区内 1480 ~ 2009 年 $M \geq 5.0$ 地震的贝尼奥夫应变曲线的小波变换
(a) 以高斯函数为小波基的小波变换曲线；(b) 以高斯函数一阶导数为小波基的小波变换
Fig. 2 Results of seismic data of $M \geq 5.0$ earthquakes in North China from 1480 to 2009 by wavelet analysis
(a) The wavelet transform in various scales of Gauss function as base wavelet. The first upper trace is the original data of deaveraged Benioff strain in the period of 0.1 year in North China. The scales of wavelet are labeled; (b) Wavelet transform in various scales using derivative with Gauss function as base wavelet. The scales of wavelet are labeled

形态来看，目前华北地区处于应变积累阶段，且处于应变较低状态。由于历史地震资料主要都是来源于《中国历史地震目录（公元前 23 世纪—公元 1911 年）》，所以笔者对这些地震资料的分析结果跟张国民和张培震（2000）、马宏生等（2005）结果一致，说明小波变换的分析结果是可信的。华北地区刚刚经历强震活跃期，不会有巨大地震或群集性中强地震发生。从以高斯一阶导数为小波基的分析还能看出，自 1800 年以后，当小波时间尺度小于 5 a 时，有 4 个明显的突变点对应 4 个活跃期，第一个活跃期对应 1830 年 6 月 12 日河北磁县 7.5 级地震，第二个对应 1888 年 6 月 13 日渤海湾 7.5 级地震，第三个对应 1937 年 8 月 1 日山东菏泽 7.0 级地震，第四个对应 1966 年 3 月 8 日河北 7.2 级地震和 1978 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震，当小波时间尺度大于

5 a 时，这两个地震对应的曲线突变点融合为一个突变点。

从小波变换曲线还可以看出：① 随着时间尺度的增加，极值点逐渐变少，且相邻的极值点逐渐融合成较大的极值点；② 各极值点的幅值反映了以同尺度高斯函数为小波基变化对应点局部梯度的大小，极值点的正负反映了滤波后贝尼奥夫曲线的边沿方向特性——正极大值点对应上升沿，负极大值点对应下降沿；③ 极值点随尺度变化的幅值大小反映了曲线边沿变化特性——幅值较大反映滤波后贝尼奥夫曲线较剧烈的变化趋势（较陡的边沿），较小的幅值对应滤波后贝尼奥夫曲线较平缓的变化趋势（较平的边沿），由此可得到地震活跃期的开始年代（地震活跃突变点）；④ 当尺度增大时极值点消失或成对结合成新的极值点，这反映了信号中隐含的某种“嵌套结构”。

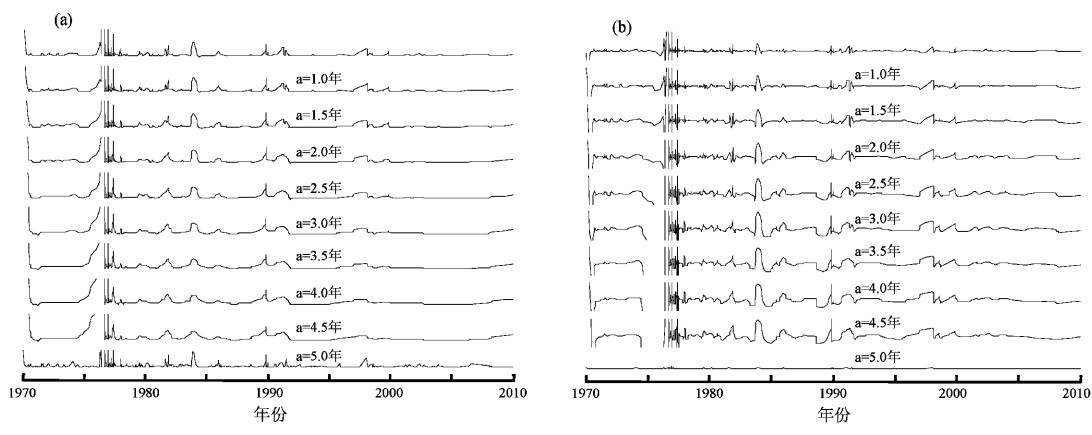


图 3 研究区内 1970 ~ 2009 年 $M \geq 4.0$ 地震的贝尼奥夫应变曲线及其相应的小波变换

(a) 以高斯函数为小波基的小波变换曲线；(b) 以高斯函数一阶导数为小波基的小波变换

Fig. 3 Results of seismic data of $M \geq 4.0$ earthquakes in North China from 1970 to 2009 by wavelet analysis
(a) Wavelet transform in various scales of Gauss function as base wavelet. The first upper trace is the original data of deaveraged Benioff strain in the period of 0.1 year. The scales of wavelet are labeled. (b) Wavelet transform in various scales using derivative with Gauss function as base wavelet. The scales of wavelet are labeled.

运用小波变换能够较好地分离和刻画不同时间尺度的地震活动性，探测序列突变。地震活动性的强弱，是相对于不同时间尺度而言，因此，地震活动的活跃和平静分期的问题只有建立在具体的时间尺度上才有意义。不同时间尺度上的地震活动，可能与地壳块体的整体应力应变、不均匀性，以及与邻区相互作用有密切的关系。笔者选用华北地区 1970 ~ 2009 年的 $M \geq 4.0$ 地震，是因为这个时间段内 $M \geq 4.0$ 的地震已被非常准确、系统、完整地记录下来，且 $M \geq 4.0$ 地震对中强震

的发生有很大的影响，选取这个震级更符合实际的地震能量的释放演化过程。

从图 3 可以看出，自 1970 年以来，在 0.5 ~ 5 a 的时间尺度上华北地区 $M \geq 4.0$ 地震一共有 5 个活跃期，大致呈现出 7 a 左右的周期，而且其强度随时间在变化，随着小波尺度的增加，地震活跃期突跳更加平滑。第一个活跃期对应的是 1976 年河北唐山 7.8 级地震前后，第二个对应 1983 年山东菏泽 5.9 级地震前后，第三个对应 1989 和 1991 年山西省大同 6.1、5.8 级地震前后，

第四个对应 1998 年河北张北 6.2 级地震前后,第五个对应 2004 年河北邢台 5.0 级和 2006 年河北文安 5.1 级地震前后,但是这个活跃期比较弱,当小波时间尺度增加到 4 a 时已经很不明显。根据曲线分析,1998 ~ 2009 年研究区内缺少 4 级以上地震,在 5 a 以下的时间尺度上,研究区内目前应该正在进入 4 级以上地震的活跃期。

从图 3 还可以看出,每个活跃期的出现总是具有双峰特点的,当小波尺度小于 3 a 时,这个特点非常明显,1970 年以来一直很有规律性,且以高斯一阶导数函数为小波基时比以高斯函数为小波基时更加明显,这也说明在分析突变时,小波基的选择对结果有一定的影响,选择合适的小波基函数可以更好地突出地震活动的规律。

4 结论与讨论

(1) 小波分析方法能得出不同时间尺度的地震活动特征,反映地震演化过程。运用该方法不仅可以将隐含在序列中的各种随时间变化的周期显现出来,还能确定地震活动突变点的位置,该位置对应于地震活跃期和平静期的转折处。

(2) 华北地震活动在不同的时间尺度上表现出不同的特征,华北地区 $M \geq 5.0$ 地震活动出现两次高峰期,周期约为 300 a,且刚刚经历了 1 个活跃期,处于应力积累的平静阶段,该地区目前不会有巨大地震或群集性中强地震发生。1970 年以来,研究区 $M \geq 4.0$ 地震活动的周期大约为 7 a 左右,而且其强度随时间在变化,目前正在进入 4 级以上地震的活跃期。因此,对于地震活跃或平静期的讨论,只有建立在具体的时间尺度上才有意义。

对中国地震局地球物理研究所万永革研究员和陈化然研究员给予的指导表示衷心的感谢!

参考文献:

傅征祥,刘杰,刘桂萍,等. 2000. 中国大陆成组强震活动水平的三分法及其应用[J]. 地震,20(增刊):34-38.

- 黄玮琼,李文香,曹学锋. 1994. 中国地震资料完整性研究之二[J]. 地震学报,16(4):423-431.
- 刘虹,苏有锦. 2007. 云南地区 7 级大震震源区地震活动特征研究[J]. 地震研究,30(1):18-23.
- 刘希强,周惠兰,郑治真,等. 1998. 基于小波包变换的弱震相识别方法[J]. 地震学报,20(4):373-380.
- 马宗晋,傅征祥,张郢珍,等. 1982. 1966 ~ 1976 年中国九大地震震[M]. 北京:地震出版社.
- 马宏生,刘杰,张国民,等. 2002. 用应变积累释放模型研究中国大陆地块分区地震活动[J]. 地震学报,24(6):569-578.
- 马宏生,刘杰,张晓东,等. 2005. 基于 G—R 关系的应变积累释放模型研究中国大陆强震的分区活动[J]. 地震学报 27(4):355-366.
- 苏有锦,李忠华,刘祖萌,等. 2001. 20 世纪云南地区 $M_s \geq 5.0$ 级地震活动的基本特征[J]. 地震研究,24(1):1-9.
- 邵辉成,杜兴信,金学申,等. 2000. 小波分析在地震趋势预测中的应用[J]. 中国地震,16(1):48-52.
- 时振梁,汪良谋,傅征祥,等. 1997. 中国大陆中长期强震危险性预测方法研究[M]. 北京:海洋出版社.
- 吴忠良. 1999. 鉴别地震活动周期性和随机性的广义 Rydelek Sacks 检验[J]. 地震学报,21(5):487-494.
- 万永革,齐福荣,孟晓春,等. 2003. 中国大陆及华北地区地震资料的小波分析[J]. 大地测量与地球动力学,23(4):28-33.
- 万永革. 2007. 数字信号处理的 matlab 实现[M]. 北京:科学出版社.
- 夏浩明. 1987. 大华北 $M \geq 4.0$ 地震阶级性分区特征及其意义[J]. 地球物理学报,30(3):281-291.
- 徐义贤,王家映. 2000. 基于连续小波变换的大地电磁信号谱估计方法[J]. 地球物理学报,43(5):677-683.
- 张国民. 1987. 我国大陆强震活动的韵律特征[J]. 地震地质,9(2):27-37.
- 张国民,张培震. 2000. 大陆强震机理与预测中期学术进展[J]. 中国基础科学,(10):4-10.
- 张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D 辑),33(增刊):12-20.
- 中国地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)[M]. 北京:地震出版社.
- Benioff H. 1951. Crustal strain characteristics derived from earthquake sequences[J]. Trans Amer Geophy Union,32(4):203-208.
- Logan B. 1977. Information in the zero-crossing of bandpass signals[J]. Bell Syst Tech J,56,510-532.
- Mallat S. 1991. Zero-crossing of a wavelet transform[J]. IEEE Trans,IT-37(1):1019-1033.
- Mallat S, Hwang W L. 1992. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans AMS,IT-38:617-643.

Research on the Characteristics of Seismic Activity in North China Using Wavelet Transform

ZHANG Xiao-tao^{1,2}, FENG Xiang-dong³, ZHANG Yue-gang³,
ZHANG Shuang-feng¹, YANG Ya-qiong³, HAN Li-ping¹

(1. Central Seismic station of Handan, Earthquake Administration of Hebei Province, Handan 056001, Hebei, China)

(2. Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

(3. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract

Referring to the $M \geq 5.0$ earthquakes from 1500 to 2000 and the $M \geq 4.0$ earthquakes from 1970 to 2009 in North China, we analyze the Benioff strain using wavelet transform in various scales. Analysis shows that on a century-scale the $M \geq 5.0$ earthquake-activity period has just finished and now the stress is accumulating. And since 1970 there has existed activity cycle of about 7 years for the $M \geq 4.0$ earthquakes; now the $M \geq 4.0$ significant earthquake-activity period is beginning in North China.

Key words: Benioff strain; wavelet transform; seismic active period; seismic quiet period; North China