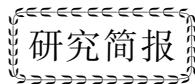


文章编号: 0253-3782(2004)01-0102-04



中国大陆地震活动的多尺度分析^{*}

邵辉成¹⁾ 杜长娥¹⁾ 刘志辉²⁾
孙彦雪²⁾ 夏长起²⁾

1) 中国西安 710068 陕西省地震局

2) 中国石家庄 050021 河北省地震局

关键词: 中国大陆 小波分析 多尺度分析

中图分类号: P315.3⁺¹ 文献标识码: A

中国大陆强震活动相对活跃或平静期的划分,对于地震预测预报,特别是中短期的强震分析预报,甚至短临预报工作具有十分重要的指导意义,也是我国地震预测研究的一个不可缺少的环节。目前对地震大形势预测已形成一套完整的思路和方法,主要是对 20 世纪以来中国大陆的地震资料,采用统计方法对地震次数、地震释放能量等进行分析,划分地震活跃期或平静期,并对今后一段时间地震的发展趋势进行研究与判断(张国民,李丽,1997;傅征祥等,2000)。地震的发生和孕育过程是一非线性过程,而地震发生的时间序列也相应的是非平稳序列,所以应用处理非线性问题的方法,对其进行研究和分析,探索其中所包含的特征信息(郑治真等,1996;赵松年,熊小芸,1997),可能是进行准确预报的一种有效途径。

20 世纪 80 年代中期出现的小波变换方法,作为一种分解工具和检测长时间序列中多尺度突变的方法,已逐渐广泛应用于数学、物理学、数字信号处理、图象、数值分析等领域。它同时具有时域和频域的良好局部化特征,而且随着信号不同频率成分在时间(空间)域取样的疏密,调节其放大倍数,就可以清楚地分析信号在各个层次上的变化,从而聚焦到分析信号的细节。该方法在地学及气象研究中得到大量应用(Laura, David, 1995; 高静怀等, 1996; 刘太中等, 1995; 冯博等, 1997; 刘希强等, 1998),也为我们的研究提供了一个有效的工具。

1 小波变换及突变分析

具有有限能量的函数 $f(x)$ 的小波变换是以函数簇 $\psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi[(t-b)/a]$ 为积分核的积分变换(即对函数进行伸缩和平移所得的一组函数簇)(赵松年,熊小芸,1997)

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= (W_\phi f)(a, b) = W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \quad a > 0, f \in L^2(R) \end{aligned} \quad (1)$$

这样就可把一维函数 $f(t)$ 变换成 a 和 b 的二维函数,其中 a 是尺度参数, b 是定位参数,函数 $\psi_{a,b}(t)$ 称为小波(*表示复共轭)。如果 $\psi(t)$ 是某一低通平滑函数 $\theta(t)$ 的一阶导数,则小波变换的零点正好是函数的极值点,小波变换的极值点,对应原函数的转折点,在极限情况下它也就是阶跃点。如果 $\psi(t)$ 是平滑函数 $\theta(x)$ 二阶导数,此时小波变换的零点正好是函数的转折点,极限情况下也就是阶跃点(杨福生,2001)。因此,可用小波变换的过零点或极值点位置,检测到原函数的特征点,即 $f(t)$ 的奇异性。通过调节放大倍

* 地震科学联合基金(0101070)和中国-希腊地震科技合作项目资助。

2002-11-15 收到初稿, 2003-02-14 收到修改稿, 2003-05-12 决定采用。

数, 可以观察 $f(t)$ 中不同尺度层次演化的情况及突变点(江剑民等, 2001). 因此我们就可以用小波函数的过零点或极值点来寻找地震活动突变的时间.

要从信号中提取有用的信息, 应恰当地选择或构造合适的小波函数(高静怀等, 1996). Morlet 小波为复数, 在时频域中有最好的分辨率, 能提取被分析的时间过程或信号的幅值与相位信息, 是地球物理过程和湍流分析研究中常用的小波. Morlet 小波可近似表示为

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{-i\omega t} e^{-t^2/2} \quad \omega \geqslant 5 \quad (2)$$

其实质是一个受高斯包络调制的谐波, ω 是振荡角频率, 可以看成是一平滑函数的二阶导数, 可以用来判别序列中所包含的不同时间尺度的结构. 可以证明当 $\omega=6$ 时, 尺度参数 a 与傅里叶变换的周期 T 有 $T=1.03a$ 的关系(Laura, David, 1995; 徐义贤, 王家映, 2000). 这样, 就把尺度因子赋予了一定的物理意义, 将以尺度为变量的小波谱转换为具有物理含义的频谱. 通过变换尺度参数 a 和平移参数 b , 可得时间序列任一时刻的频率及其在时间-频率上的变化特征(杜兴信, 1997; Lyubshin, 1999; 邵辉成等, 2000).

2 资料及结果分析

小波分析是通过不断改变尺度将信号的奇点、突变或图象的轮廓、细节逐级放大后呈现在研究者面前, 能够看清切片的细部特征结构(赵松年, 熊小芸, 1997).

突变是非线性系统非常重要的特性, 也是非线性系统非常普遍的性质. 地震既然孕育在非线性系统中, 其演化序列也应该是非线性的, 即存在某些临界点, 临界点前后序列性质将发生变化, 如强度、频度突然显著增减, 就是常称的地震活跃期和平静期现象. 地震活动由一种状态突然演化到另一种状态便为突变, 其尺度有大有小, 对应的地震活动强弱持续的时间有期、幕、段等等. 地震活动的强弱包括地震所释放的能量, 同时也包括地震发生的频次. 本研究以《中国强地震目录》为基础, 把中国大陆 1800 年以来每年地震释放的总能量的平方根(采用年折合震级也可得到同样的结果)组成时间序列 $f(t)$, 有

$$f(t) = \sum_i \sqrt{E_i(t)} \quad (3)$$

其中, E 是震级为 M_S 地震所释放的地震能量($\lg E = 1.5M_S + 11.8$).

对中国大陆强震年地震能量释放序列, 采用 Morlet 小波, 利用式(1)进行变换得到小波系数实部的等值线(图 1). 其中细实线为正, 粗实线和虚线为 0 或负. 横坐标为位置 b , 表示时间(年份), 纵坐标表示时间尺度, 已转换为周期(年). 该图反映了中国大陆年地震能量释放序列在时频域上的周期性振荡. 从图 1 中可以看出, 在不同时间尺度上, 地震序列变化表现出不同的特征. 在 40 年左右的时间尺度上, 有明显的突变特征, 即强弱交替, 突变点分别在 1870 年、1887 年、1907 年、1925 年、1944 年、1962 年和 1982 年 7 个突变点. 也就是说在时间尺度上, 百年来地震活动主要经历了 7 个强震强弱交替, 即 1870~1887 年, 1907~1925 年, 1944~1962 年, 1983 年至现在的地震活动偏多期和其余时间的偏少期. 而对 20

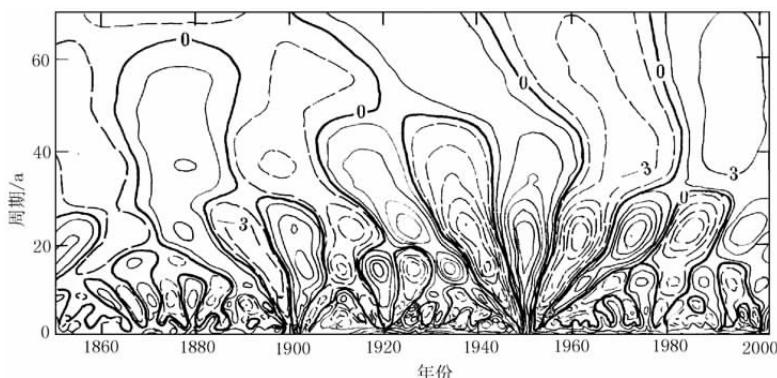


图 1 百年来中国大陆地震年释放能量序列的 Morlet 小波变换实部等值线图

年左右的时间尺度，突变点增加到 10 个，也就是说经历了 10 次强弱的交替。图 2 给出了小波变换幅值的平方(模，即 $w_p(a) = \sum_b |w_f(a, b)|^2$)，即在不同时间尺度的能量谱。可以发现，23 年周期是上世纪以来地震活动的主要周期，其次为 16 年左右和 37 年左右的弱周期(这与其他作者得到的结果一致)。同时从图 1, 2 还可发现，16 年左右周期在上世纪前半叶表现比较强，后半叶相对较弱；而 23 年左右周期，1920 年以前明显弱于 1920 年以后；37 年周期虽强度不大，但一直比较均匀存在。图 3 给出了上述 3 个主要活动周期的小波变换的剖面图，可以更清楚看出不同时间周期强弱随时间变化的情况。图 4 也给出了 Mhat 小波的计算结果，可以看出与 Morlet 小波结果基本一致，表明分析结果是可靠和稳定的。23 年周期对应的突变时间，与人们普遍使用的百年来大陆地震活跃期交替时间基本一致。

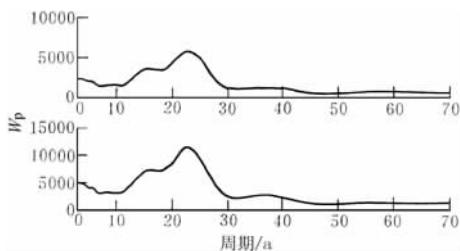


图 2 Morlet 小波变换模的平方(上图)、
实部平方(下图)

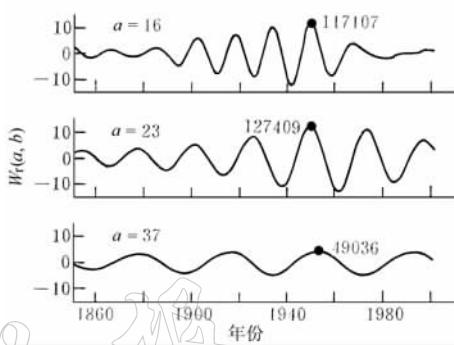


图 3 小波变换 3 种时间尺度的
小波结果(系数)

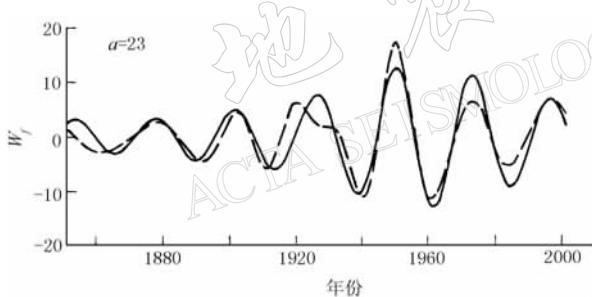


图 4 Morlet 小波(实线)和 Mhat 小波
(虚线)系数结果比较

个期的讨论，只有建立在具体的时间尺度上才有意义。不同时间尺度的地震活动，可能与地壳块体的整体应力应变及不均匀性，以及与邻区相互作用有密切的关系。

信号中低频部分代表着信号的发展趋势，在小波分析中，则对应着较大尺度小波变换的结果。随着时间尺度的增加和时间分辨率的降低，对信号的这种发展趋势会表现得更加明显(胡昌华等，2000)，因此，也可以用该方法对未来一定时期尺度内强震活动的强弱进行估计。

3 讨论和结论

从前面分析中可以看出，小波分析方法能够在多时间尺度上研究时间序列的变化特征，并对局部的信息有比较好的描述，能较快地确定地震活动格局的转变时间。同时也可得到：

1) 小波分析方法能给出不同时间尺度的地震活动特征，反映地震演化过程，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，还能确定出地震活动突变点的位置，对应于地震活跃期和平静期

中国及周边地区强震具有 10 年左右活跃期的假设，在地震预测研究中占有十分重要的地位。运用 Rydelek-Sacks 检验分析结果表明，18~25 年的周期性，在 95% 的置信水平上确实存在(吴忠良，1999)，这从图 2 可以明显看到。由上面的分析可以看出，小波分析具有较好地分离和刻画不同时间尺度扰动的能力和一定的探测序列突变的能力，长序列的强震偏多和偏少期，是相对不同时间尺度而言，它会有变化。因此，百年来地震活动的活跃和平静有多少

的转折，这可为今后地震活动分期提供新的工具，也为预测今后一段时间的地震活动水平提供了新的方法。

2) 百年来中国大陆地震活动在不同的时间尺度上表现出不同的特征，百年来地震活动除主要23年周期外，还存在16年和37年弱活动周期，而且其强度随时间在变化。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。

3) 与其它小波结果相比，Morlet小波在高频部分比较细腻地刻划了时间序列和内部结构，而且从其模中可以体现出主要的活动周期，但其突变位置可能有少许的偏移，但相对于周期尺度来讲，其对结果影响不大。

对张少泉教授的帮助以及审稿者的建议表示感谢。

参 考 文 献

- 杜兴信. 1997. 基于小波变换的动态地震活动周期分析[J]. 地震, **17**(3): 257~264
 冯博, 柯熙政, 丁华灵. 1997. 太阳黑子数的子波分析[J]. 天体物理学报, **17**(2): 182~190
 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): 34~37
 高静怀, 汪文秉, 朱光明, 等. 1996. 地震资料处理中小波函数的选取研究[J]. 地球物理学报, **39**(3): 392~400
 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 2000. 基于MATLAB的系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 225~227
 江剑民, Fraedrich K, 邹耀仁. 2001. 多尺度突变现象的扫描式t检验方法机器及其相干性分析[J]. 地球物理学报, **44**
 (1): 31~39
 刘太中, 荣平平, 刘式达, 等. 1995. 气候突变的子波分析[J]. 地球物理学报, **38**(2): 158~162
 刘希强, 周蕙兰, 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
 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
 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
 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
 杨福生. 2001. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 146~157
 张国民, 李丽. 1997. 地震大形势预测的科学思路及未来几年我国地震形势[A]. 国家地震局分析预报中心编. 中国地
 震趋势预测研究(1998年度)[C]. 北京: 地震出版社, 174~187
 赵松年, 熊小芸. 1997. 子波变化与子波分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 14~18
 郑治真, 沈萍, 谢永. 1996. 从Gabor变化到小波分析[J]. 中国地震, **12**(3): 237~242
 Laura J P, David D N. 1995. Wavelet analysis of velocity dispersion of elastic interface waves propagating along a fracture
 [J]. *Geophys Res Lett*, **22**(11): 1 329~1 332
 Lyubshin A A Jr. 1999. Wavelet-aggregated signal in earthquake prediction[J]. *Earthquake Research in China*, **13**(1):
 33~43

MULTI-SCALE ANALYSIS OF EARTHQUAKE ACTIVITY IN CHINESE MAINLAND

Shao Huicheng¹⁾ Du Chang'e¹⁾ Liu Zhihui²⁾ Sun Yanxue²⁾ Xia Changqi²⁾

1) Seismological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China

2) Seismologica Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

Key words: Chinese mainland; wavelet analysis; multi-scale analysis