

doi:10.3799/dqkx.2012.019

# 全球大震活动特征

薛艳<sup>1,2</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 尹继尧<sup>3</sup>, 宋治平<sup>3</sup>

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2. 中国地震台网中心, 北京 100045

3. 上海市地震局, 上海 200062

**摘要:** 分析了全球、环太平洋地震带(P系)和低纬度环球剪切带(E系)的地震活动特征,并运用小波变换技术对地震活动周期成分进行了定量研究,结果表明:(1)全球地震活动存在45.5a和32.0a的显著周期成分,P系为45.5a,E系为30.9a和47.5a;(2)全球及两大构造系7.0级以上地震频度均显示30.0a左右的周期特征,但地震频度与全球8.5级以上特大地震活动是不同步的,不能作为判定地震活跃期与平静期的依据,频度变化可能反映全球尺度的某种活动对地震产生的影响;(3)全球地震具有50.0a尺度的活跃期与平静期;当前全球地震活动处于2004年开始的以8.5级以上地震活动为特点的大释放阶段,这种状态还将持续数年;E系处于 $M_w \geq 7.8$ 大震活跃期的尾声,而2010年智利 $M_w = 8.8$ 地震可能标志着P系开始进入大释放阶段。

**关键词:** 地震;地震活动周期;环太平洋地震带;低纬度环球剪切带;小波分析;地震波。

**中图分类号:** P315.3

**文章编号:** 1000-2383(2012)01-0191-08

**收稿日期:** 2010-11-08

## Characteristics of Global Great Earthquakes

XUE Yan<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>2</sup>, YIN Ji-yao<sup>3</sup>, SONG Zhi-ping<sup>3</sup>

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3. Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China

**Abstract:** Using the global earthquake catalogue with  $M_w \geq 7.0$  since 1900, we analyze the characteristics of great earthquakes in the global area, the circum-Pacific seismic belt (namely P-system) and the low-latitude circum-earth zone (namely E-system) respectively. In addition, the technique of Morlet wavelet transform is applied to quantitatively analyze the seismicity periodicities. Results show: (1) there are two principal periodic components, including 45.5 a and 32.0 a, in the global seismicity. For the P-system, the principal period is 45.5 a. The principal periodic components are 30.9 a and 47.5 a in the seismicity of the E-system; (2) The earthquake frequency with  $M_w \geq 7.0$  of the globe, the P-system and the E-system show a prominent period of about 30 a. However, the temporal process of earthquake frequency is not synchronous with the global seismicity of  $M_w \geq 8.5$ , so it is not properly distinguish the active or quiet period by frequency and the variation of earthquake frequency may be a reaction that some global activity influence on the global seismicity; (3) The global great earthquakes showing the seismicity period is about 50.0 a (including an active and a quiet period). Great earthquakes ( $M_w \geq 8.5$ ) in globe occurred frequently since 2004, showing a high actively trend based on the characteristics of great earthquakes cyclic process. It has been in high active period with many large earthquakes ( $M_w \geq 7.8$ ) in the E-system since 1992, and currently it is in the end of the active period. The 2010 Chile  $M_w = 8.8$  event may be the sign that it begins a new active period in the P-system.

**Key words:** earthquakes; seismicity period; the circum-Pacific seismic belt; the low-latitude circum-earth zone; wavelet transform; seismic waves.

据中国地震台网测定,2010年1~9月全球共发生24次7.0级以上地震,其中8.0级以上地震1

次,为2010年2月27日智利8.8级地震(www.ceic.ac.cn),而1900年以来全球平均每年发生18次

**基金项目:** 国家“973”项目(No. 2008CB425704)。

**作者简介:** 薛艳(1969-),女,副研究员,主要从事地震预测及数值模拟研究。E-mail: xueyan5619@seis.ac.cn

7.0 级以上地震. 2010 年全球地震活动表现出频度高、强度大、灾害严重的特点. 2010 年 1 月 13 日海地 7.3 级地震造成至少 23 万人死亡、30 万人受伤、100 万人无家可归([http://en.wikipedia.org/wiki/2010\\_Haiti\\_earthquake](http://en.wikipedia.org/wiki/2010_Haiti_earthquake)). 2010 年 2 月 27 日智利 8.8 级特大地震为 1900 年以来全球第 5 大地震, 引发海啸, 造成至少 802 人死亡, 经济损失达到 300 亿美元(<http://news.qq.com/a/20100304/001063.htm>). 2010 年 4 月 14 日我国青海玉树 7.1 级地震已造成 2 698 人遇难、270 人失踪(<http://news.sohu.com/20100531>).

频繁的大震活动和严重的地震灾害引起了人们对全球地震活动状态的广泛关注. 全球地震是否在增加? 美国地质调查局在其官方网站回答了这一问题. 他们认为, 近 20 a 来全球测震台站的迅速增加和通讯技术的进步使得现在能够监测到的地震数量确实在增多, 但每年全球发生的 7.0 级以上大震数量相当稳定. 据 1900 年以来长期记录统计, 全球平均每年发生 17 次 7.0~7.9 级地震和 1 次 8.0 级以上地震. 1980 年以来全球每年 6.0~6.9 级、7.0~7.9 级和 8.0 级以上的地震频度图进一步说明当前全球 7.0 级以上大震并没有增多, 仍然保持平稳状态(<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/graphs.php>).

这样的回答虽然是客观的, 但仅从频度角度得出的结论却容易让人误解, 因为地震活动状态不仅包含了频度, 还应包括地震所释放的能量. 震级差 1 级, 能量差 33 倍, 一个 9.0 级地震与一个 7.0 级地震虽然频度相同, 但释放的能量差别巨大. 另外, 年尺度是人为设定的, 对于不同的时间窗长, 频度是否具有起伏变化也需要研究.

地震频度和能量可用于描述地震活动的不同特征, 但确定地震活动是否处于活跃、平静状态需要综合考虑这 2 个参数, 累积 Benioff 应变就是这 2 个参数的综合体现. 因为累积 Benioff 应变与应变积累成正比, 而由构造作用产生的应变积累在较长时间尺度是基本不变的, 因此, 地震的活跃与平静可通过比较地震的应变释放与平均应变释放大小来划分. 在目前不能精确得到平均应变释放大小的情况下, 如果某个区域能得到几个完整的地震活跃—平静轮回, 用 Benioff 应变曲线的变化也是可以做出判断的.

许多研究表明, 地震活动在时间上具有非平稳性, 表现为地震活动, 特别是大震活动, 在时间轴上具有活跃和安静(高潮和低潮)交替的特性. 早在

1960 年, 梅世蓉(1960)在研究中国地震活动性时就曾指出 7.0 级以上地震活动在时间轴上的分布具有高潮和低潮相交替的特征. “地震周期”(Fedotov, 1965, 1968)、“地震活跃期”(Mogi, 1974)、“地震幕”(Ma and Jiang, 1987)等概念的提出, 都是为了从一个地区或一些有代表性的地震带中揭示不同时间尺度地震活动的规律性. Mogi(1974, 1979)对全球主要地震活动带的分析, 肯定了地震活动存在明显的分段性, 划分出主要地震活动带的平静期和活跃期, 论述其与板块运动的关系, 并研究了全球大地震的纬度分布特征. 范洪顺(2001)认为, 20 世纪全球有  $M_w=9.0$  左右地震的成丛现象, 并推测全球范围内可能有时间尺度大于或等于 100 a 的准周期. 于泳等(2003)认为环太平洋地震带和低纬向带地震活动存在 20 a 左右的交替性, 并从动力学机制进行了探讨. 马宗晋等(2006)提出了低纬度环球剪切带的概念, 并统计发现该带与环太平洋地震带存在 15~18 a 的准周期交替活动. 马宏生等(2010)认为, 20 世纪以来全球大震活动呈现 100 a 左右起伏的长期变化.

由于客观条件限制, 以上研究使用的地震目录比较混乱, 有的学者使用的地震目录为面波震级, 从理论上讲, 当震级大于 8.0 级时, 面波震级会出现饱和问题. 其次, 以上对全球及主要地震带地震活动时间特征的研究多为定性分析的结果, 缺少定量研究. 另外, 2004 年以来全球地震活动出现了新的变化, 已发生 10 次 8.0 级以上大地震, 特别是相继发生了 2004 年 12 月 26 日苏门答腊  $M_w=9.0$ , 2005 年 3 月 28 日苏门答腊  $M_w=8.6$  和 2010 年 2 月 27 日智利  $M_w=8.8$  特大地震. 如何认识全球当前的地震活动状态是一个值得研究的问题.

本文使用全球 1900 年以来的  $M_w \geq 7.0$  地震目录(其中 1900—1999 年的资料来源于 Engdahl and Villaseor(2002)修订的全球目录, 2000 年以后采用 Harvard 大学提供的全球 CMT 目录(<http://www.seismology.harvard.edu/>))研究全球及主要构造带(环太平洋地震带与低纬度环球剪切带)大震活动的时间特征. Engdahl and Villaseor(2002)修订的全球地震目录是在收集、整理所有不同区域、不同版本目录的基础上, 对震级进行了统一校订, 克服了以往面波震级目录出现的震级饱和问题引入了矩震级, 此外, 对具有地震波到时资料的地震进行了重新定位. 该目录 1900 年以来 7.0 级以上地震是完整的.

本文研究的地震活动期指地震的活跃—平静期, 为地震能量释放由高潮到低潮的一个完整过程.

用数学方法(如 FFT、小波等)可以对地震的应变释放等进行定量的周期成分分析,但得到的周期成分不等于地震活动期。作为一个时间序列,地震应变释放可以包含多个周期成分,需要分析哪些周期成分代表地震的活跃—平静期(即地震活动期),哪些周期成分反映的只是地震活动受某些因素影响产生的起伏变化。

## 1 全球地震活动的时间特征

### 1.1 全球 7.0 级以上地震分析

图 1 是全球 8.5 级以上地震活动  $M-t$  图。由图可见,近百年来,全球 8.5 级以上地震存在活跃—平静的交替性,共出现 3 个活跃时段和 2 个平静时段,活跃时段分别为 1905—1923 年、1950—1965 年及 2004 年至今。2 个平静时段分别持续 26 a 和 38 a。前 2 个活跃时段共持续活动了 19 a 和 16 a,分别发生 8.5 级以上地震 6 次和 7 次。以 2004 年 12 月 26 日苏门答腊 9.0 级地震开始的第 3 活跃时段至 2010 年持续了近 7 a,共发生 8.5 级以上地震 3 次。图 1 显示了 8.5 级以上地震 2 个完整的活动轮回,第 1 个轮回包括第 1 活跃时段和第 1 平静时段,共持续约 45 a,第 2 个轮回包括第 2 个活跃时段和第 2 个平静时段,共持续近 54 a。可见,全球 8.5 级以上地震大致存在 50 a 左右的活跃期(图 1)。

图 2 给出全球 7.0 级以上地震年频度及 10 a 窗口的累积频度曲线(滑动步长为 1 a)。从 7.0 级以上地震年频度(图 2a)可以看出,1900~1970 年地震频度比较高,起伏比较大,而 1971 年以来,特别是近 20 a,年频度非常平稳。但 10 a 的累积频度(图 2b, 1 a 滑动)具有明显的起伏特点。如果以相邻 2 个极低点作为一个活动期的起止时间,则共出现 4 个活动期,分别持续 18 a、34 a、33 a 及 21 a,其中第 1 和第 4 个活动期持续时间短,可能受地震资料起止

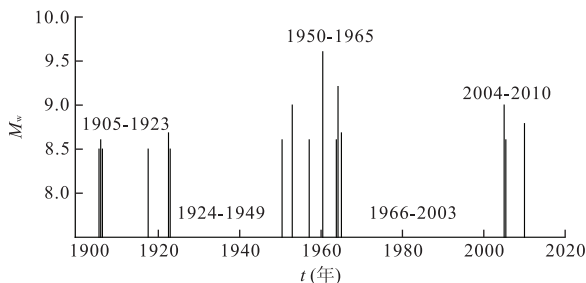


图 1 全球 8.5 级以上地震活动  $M-t$  图

Fig. 1  $M-t$  chart of global earthquakes with  $M_w \geq 8.5$

时间的影响。可见,7.0 级地震频度表现出 30 a 左右准周期特点。

在计算 Benioff 应变之前,先采用经验关系式计算出地震矩  $M_0 = 10^{1.5M_w + 16.05}$ ,其中  $M_0$  的单位是  $N \cdot m$ (Wells and Coppersmith, 1994)。根据经验关系  $E = 5.0 \times 10^{-5} M_0$ ,由地震矩计算地震波能量(Kanamori, 1977),再取能量的平方根即可得到 Benioff 应变。

图 2c 是全球 7.0 级以上地震 10 a 累积 Benioff 应变曲线。与频度所表现出的 30 a 左右活动周期不同,累积 Benioff 应变存在 3 个明显的起伏阶段,每个阶段 Benioff 应变都经历了低—高一低的变化特点,其中第 2 个阶段最为完整。如果以图 2c 中的 2 个低点(1931 年,1984 年)作为第 2 阶段的持续时间,则第 2 个活动期共持续了 54 a。第 1 阶段持续时间短,可能是其起始时间受使用的地震资料所限造成的。第 3 阶段开始于 1984 年,2004 年至今处于峰值过程中。可见,全球 7.0 级以上地震应变释放表现出 50 a 左右的准周期特征。值得注意的是,在第 2 阶段的上升过程中(1955—1962 年)累积应变曲线出现了一个小的低值过程,且与累积频度曲线的第 2 个“波谷”相对应,但该低值与累积应变曲线显示的另外 2 个“波谷”相比,不仅持续时间短,而且应变释放水平高。该小低值过程的形成与该时段全球 7.0 级以上地震的低频度有关,从图 2d 的 8.0 级以上地震  $M-t$  图可见,将该阶段的地震活动作为活跃期内的一个低值起伏更为合理。

为了便于对比,将累积地震频度与累积 Benioff 应变进行归一化处理(图 3)。全球 7.0 级以上地震频度与 Benioff 应变曲线的起伏特征不完全一致,在有的时段,两者呈正相关,如 1900—1955 年。而在地震能量的大释放阶段,两者呈明显的负相关。2004 年开始全球进入一个以发生 8.5 级以上地震为特征的大释放阶段,而期间频度却出现下降趋势。这表明,地震频度不能作为划分活跃期和平静期的指标,应综合考虑地震频度和能量释放。

### 1.2 应用 Morlet 小波变换对全球 7.0 级以上地震年应变释放进行周期成分分析

以上的定性分析表明,全球地震活动大致存在 50 a 左右的准周期特征。为了定量确定全球地震活动的周期性,下面使用 Morlet 小波变换进行分析。

自 20 世纪 90 年代初 Mallat(1991)提出塔式分解算法以来,小波变换技术得到了迅速发展。目前 Morlet 小波变换方法被广泛地应用到地震行业相

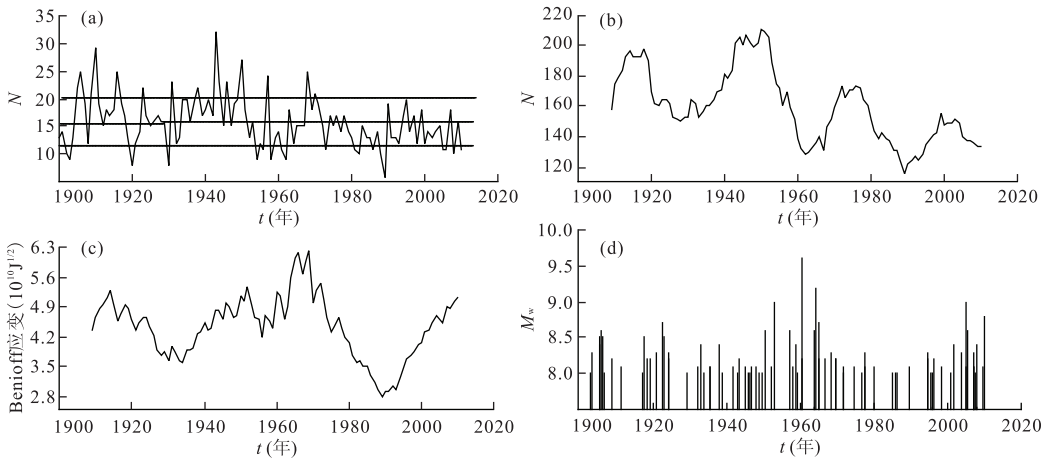


图 2 全球 7.0 级以上地震年频度(a)、累积频度(b)、累积 Benioff 应变(c)(10 a 窗长,1 a 滑动)及 8.0 级以上地震活动  $M_t$  图(d)  
Fig. 2 Curves of the annual global  $M_w \geq 7.0$  earthquake frequency (a), the cumulative frequency (b), the cumulative strain release (c) (the time window is 10 a and the time step is 1 a) and  $M_t$  chart of  $M_w \geq 8.0$  (d)

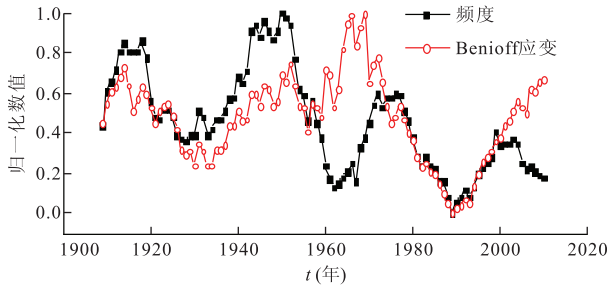


图 3 全球 7.0 级以上地震累积频度与应变释放归一化处理后的结果  
Fig. 3 Normalization for cumulative frequency and strain release of global earthquakes with  $M_w \geq 7.0$

关学科的数据处理和地震活动性分析中(何岭松和李巍华,2002;丁娜等,2005). Morlet 小波是一个由 Gauss 函数调制的连续性平面波,母函数(林振山和邓自旺,1999)为:

$$\Psi(t) = e^{ict} (e^{-\frac{t^2}{2}} - \sqrt{2} e^{-\frac{t^2}{2}} e^{-t^2}). \quad (1)$$

离散小波变换公式为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \sum_{i=1}^N f(i\delta t) \Psi^* \left( \frac{i\delta t - b}{a} \right), \quad (2)$$

式中,星号(\*)表示复共轭; $a$ 为尺度因子(与周期和频率有关); $b$ 为平移因子(时间位置); $i$ 为资料序列时间位置标号; $f(t)$ 为变量时间序列; $W_f(a,b)$ 为小波系数; $\delta t$ 为变量序列时间间隔,因为小波是复数形式的,所以小波变换后的系数也是复数.

小波功率谱定义为:

$$E_{a,b} = |W_f(a,b)|^2, \quad (3)$$

总体小波功率谱  $E_a$  表征不同尺度  $a$  对应的能量密

度,定义为:

$$E_a = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N |W_f(a,b)|^2. \quad (4)$$

根据 Torrence and Compo(1998)导出的关系, Morlet 小波尺度  $a$  与周期  $T$  有如下对应关系:

$$T = \frac{4\pi a}{c + \sqrt{2 + c^2}} \approx 1.033a, \quad (5)$$

$c$  为无维度的频率,为满足容许性条件(admissibility condition), $c$  值取为 6(Torrence and Compo, 1998).

本文取全球 7.0 级以上地震年应变释放作为离散信息源,用上述 Morlet 小波方法计算其周期成分.为了检验小波功率谱是否显著,本文合成 2 个正弦函数作为随机噪声,对上述小波分析方法进行 95%置信区间检验(尹继尧等,2011).噪声函数如下:

$$y = A_1 \cdot \sin(2\pi t/f_1) + A_2 \cdot \sin(2\pi t/f_2) + w(t), \quad (6)$$

其中振幅  $A_1, A_2$ , 频率  $f_1, f_2$  以及噪音  $w(t)$  都为随机数.频率  $f_1, f_2$  为 10~130 a 之间的随机数.

图 4 是全球 7.0 级以上地震年 Benioff 应变的周期谱分析结果.图 4a 显示,Benioff 应变的周期性非常明显,存在 50 a 左右,80 a 左右的周期变化.为了进一步确定所得到的周期变化情况,图 4b 是小波功率谱在所有时间的累积平均值,即总体小波功率谱.红色和绿色虚线分别为 95%与 90%置信度检验曲线.图 4b 显示,地震活动存在着 45.5、32.0 和 77.5 a 的周期成分.考虑到仅使用 110.0 a 的地震资料,77.5 a 的周期远远超过了使用资料时间长度的一半,还需要有更

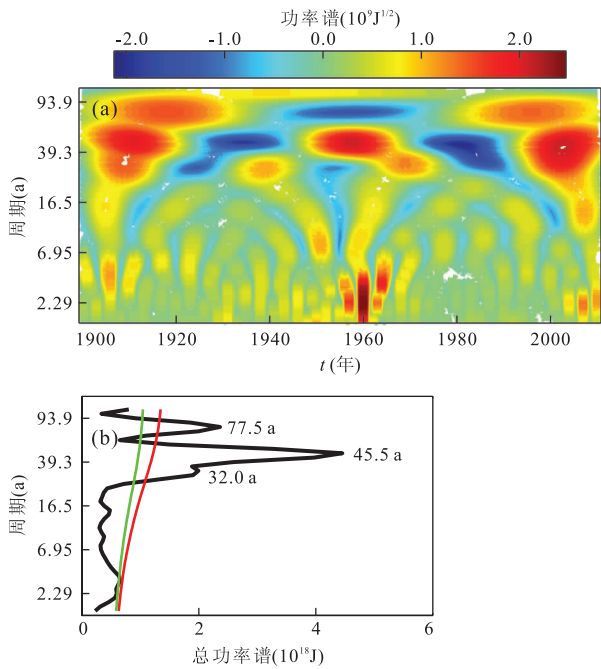


图 4 全球 7.0 级以上地震年 Benioff 应变周期谱分析

Fig. 4 Periodic spectrum of the annual global earthquake Benioff-strain with  $M_w \geq 7.0$

a. Benioff 应变小波功率谱; b. Benioff 应变显著周期谱(红线、绿线分别为 95%、90%置信度检验)

长地震资料的检验. 近百年的地震资料显示, 全球地震活动最显著周期成分为 45.5 a, 其次是 32.0 a.

## 2 P 系与 E 系的地震活动周期特征

马宗晋等(2006)依据 GPS 矢量场(ITRF2000)的动态分析, 发现在地球低纬度带赤道两侧发育了一条斜切赤道, 以剪切运动为主要特征的活动断裂构造系——低纬度全球剪切带(E 系), 它与以挤压俯冲为主的环太平洋活动构造系(P 系)和以张裂为主的洋脊活动构造系(O 系)是具有不同力学属性而又相互协调的全球构造系. P 系和 E 系是全球地震活动的主体地区. 杜品仁等(2010)在马宗晋等(2006)研究的基础上, 对 E 系的范围作了改动. 本文 P 系和 E 系的范围与杜品仁等(2010)的一致.

图 5 是 1900 年以来环太平洋地震带(P 系)7.0 级以上地震 10 a 累积频度、累积 Benioff 应变(滑动步长为 1 a)及 Morlet 小波分析结果. 10 a 累积频度曲线显示, 1900 年以来共出现 4 个起伏过程, 若以相邻的 2 个极低值点作为一个活动期的起止时间, 则前 3 个活动期分别持续 24、29 与 27 a. 可见, 与全球 7.0 级以上地震频度所表现出的周期特征一致, P 系 7.0 级以

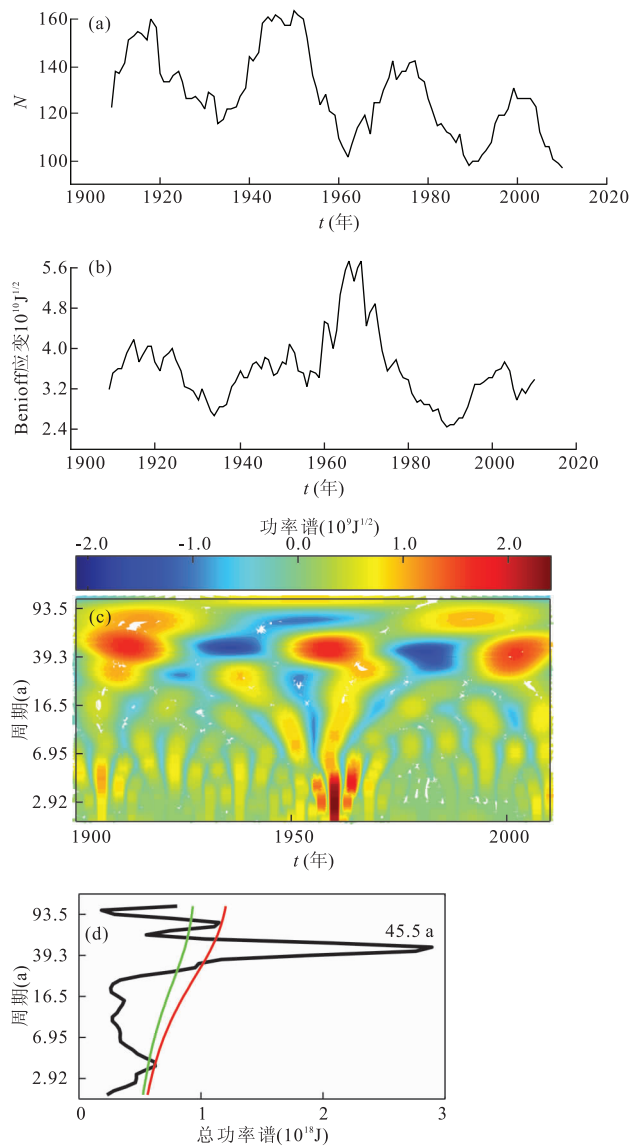


图 5 P 系 7.0 级以上地震 10 a 累积频度图(a)、累积 Benioff 应变曲线(b)、小波功率谱(c)及显著周期谱(d)

Fig. 5 Cumulative frequency (a) and Benioff-strain (b) with  $M_w \geq 7.0$  of the P-system, periodic spectrum of the annual global earthquake Benioff-strain (c) and the predominant periods (d)

图 6d 中的红色、绿色线分别为 95%、90%置信度检验

上地震频度也显示出 30 a 左右的准周期特征(图 5a).

10 a 累积 Benioff 应变曲线(图 5b) 大致出现 3 个起伏过程, 每个起伏过程 Benioff 应变释放经历了低—高一低的变化特点. 若以曲线相邻 2 个极低点作为活动期的起止时间, 则 P 系可以划分 3 个活动期, 其中第 2 个活动期最为完整, 相邻的 2 个低点分别为 1935 年和 1990 年, 共持续 56 a. 显然, 与全球一致, P 系的应变释放也显示出 50 a 左右的准周期特征.



图 5c、5d 是 P 系 7.0 级以上地震年 Benioff 应变的 Morlet 小波分析结果. 由图可见, 该区存在 45.5 和 75.4 a 周期成分, 均通过了 95% 置信度检验, 考虑到使用地震资料的时间尺度, 75.4 a 的周期还需要有更长时间的资料检验, 所以该区稳定的周期成分为 45.5 a.

图 6 是 E 系 7.0 级以上地震 10 a 累积频度、累积 Benioff 应变及 Morlet 小波分析结果. 从累积频度可见(图 6a, 滑动步长 1 a), 如果以相邻 2 个极

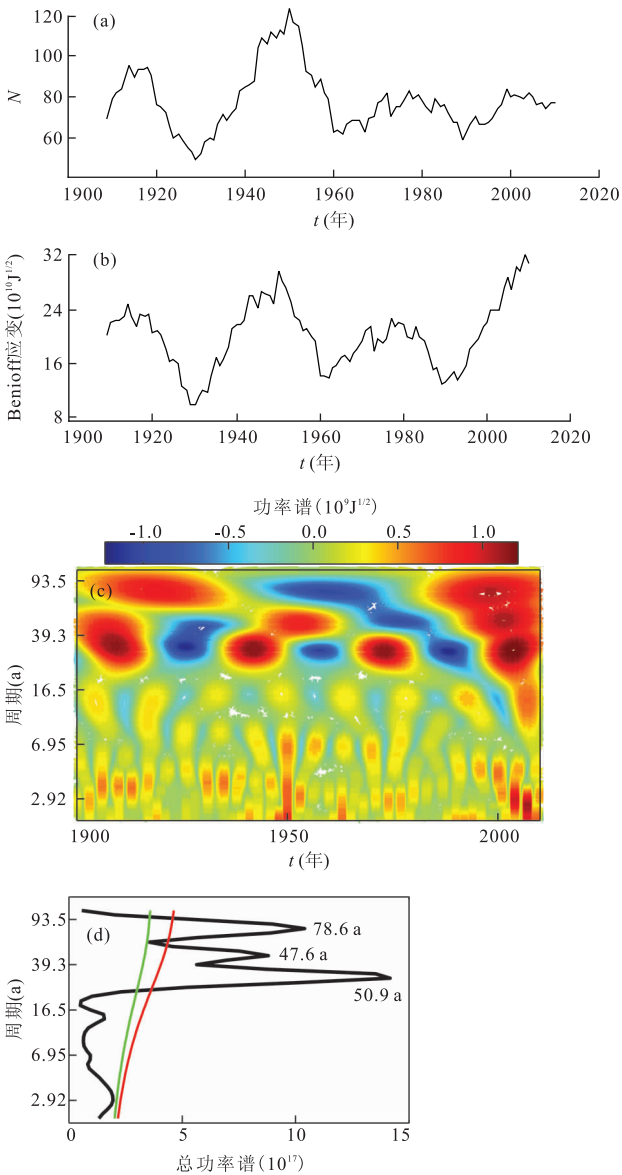


图 6 E 系 7.0 级以上地震 10 年累积频度(a)、累积 Benioff 应变(b)、小波功率谱(c)及显著周期谱(d)

Fig. 6 Cumulative frequency (a), Benioff-strain (b) with  $M_w \geq 7.0$  of the E-system, periodic spectrum (c) and the predominant periods (d)

图 6d 中的红色、绿色线分别为 95%、90% 置信度检验

值点作为一个活动期的起止时间, 则前 3 个活动期分别持续 20、33 和 27 a, 与全球及环太平洋地震带 7.0 级以上地震累积频度的起伏特征一致, 低纬度全球剪切带的地震频度也表现出 30 a 左右的周期特征.

图 6b 是 E 系 7.0 级以上地震 10 a 累积 Benioff 应变曲线(滑动步长为 1 a). 如果以曲线相邻 2 个极低点作为活动期的起止时间, 则 E 系可以划分 4 个活动期, 前 3 个活动期分别持续 20、37 与 27 a, 第 4 活动期从 1989 年开始, 至 2010 年持续了近 22 a, 累积应变释放曲线表现为逐渐上升, 2008 年达到峰值点. 显然, E 系地震活动存在 30 a 左右的准周期特点.

图 6c、6d 是 E 系 7.0 级以上地震年 Benioff 应变的 Morlet 小波分析结果. 由图可见, E 系地震活动具有 30.9、47.5 和 78.5 a 的周期成分, 且这 3 个周期都通过了 95% 置信度检验, 同前面的分析相同, 78.5 a 的周期还需要有更长时间的地震资料检验, 所以该区最显著周期成分为 30.9 a, 其次为 47.5 a.

### 3 讨论与结论

为了便于对比, 对全球及 2 大构造系的 7.0 级以上地震累积频度与 Benioff 应变作归一化处理(图 7). 结果表明, 全球、P 系和 E 系的 7.0 级以上地震频度与时间的起伏特征一致, 均显示出显著的 30 a 左右的周期(图 7a). 从 Benioff 应变释放看, 全球与 P 系地震活动期为 50 a 左右, E 系为 30 a 左右(图 7b), 即 P 系与 E 系地震活动期不同. 小波定量计算的结果显示, 全球地震活动的显著周期成分为 45.5 a, 其次为 32.0 a; P 系的显著周期成分为 45.5 a; E 系为 30.9 a, 其次为 47.5 a.

地震活动周期性的原因以及影响因素一直被人们所关注. Mogi (1974) 指出, 全球主要地震带的强震活动存在彼此交替的现象, 并认为低纬度各地震带之间有共同的活动周期, 可能是受地球自转的影响. 徐道一等(1980)对地震活动与天体运行的各种周期关系作了探讨.

白春华和徐文耀(2010)通过分析历史地磁场模型 gufml(时间跨度从 1590—1990 年), 考察主磁场长期变化场的周期性, 得到了 3 个主要的周期分量: 稳定的 30 a 周期、准 50 a 周期和强度变化的 110 a 周期. 其中 30 a 周期主要由偶极子场的赤道分量贡献, 同时非偶极子场对此也有贡献; 50 a 周期成分主要由偶极子场的轴向分量贡献, 此外, 非偶极子场中

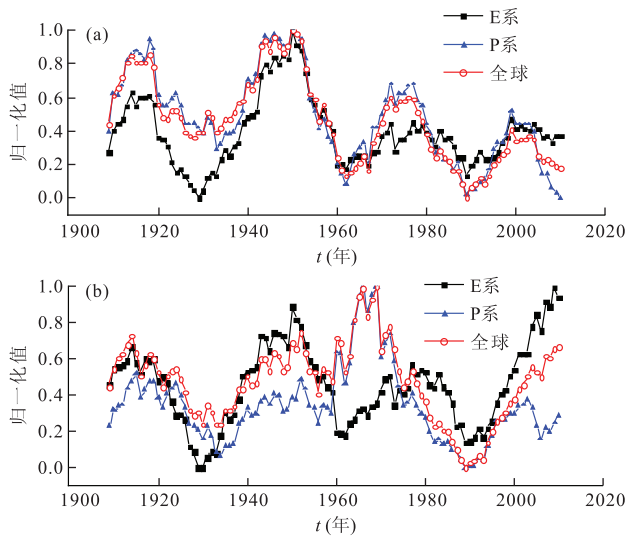


图 7 全球、P 系及 E 系 7.0 级以上地震累积频度(a)和 Benioff 应变(b)归一化结果

Fig. 7 Normalization for cumulative frequency (a) and Benioff-strain (b) of global, the P-system and the E-system earthquakes with  $M_w \geq 7.0$

的四极子场也有贡献. 造成地磁场周期变化的原因可能与地球内部的物质运移有关.

本文定量计算的结果显示,地震活动的显著成分为 50 a 左右和 30 a 左右,其中呈轴向展布的环太平洋地震带的显著周期为 50 a 左右,斜切赤道的低纬度环球剪切带最显著的周期成分为 30 a 左右. 这表明全球地震活动在时间上的韵律性可能与地球主磁场长期变化有关,即和地球内部的物质运动有关. 另外,环太平洋地震带与低纬度环球剪切带地震活动的周期性不同可能还与这 2 个地区地震的发生机制不同有关. 环太平洋地震带是主要的板块俯冲带,地震以逆冲和引张型为主,低纬度环球剪切带地震以走滑型为主(于泳等,2003). 板块扩张与消减运动对应着地球的垂直运动分量,走滑运动对应地球的水平运动分量,它们控制着全球主要地震带的运动特征(Bercovici, 1995). 于泳等(2003)从地幔对流的垂直运动与水平运动分量角度解释了逆冲、引张与走滑型强震空间分布的区域差异性及其交替性.

全球及两大构造系 7.0 级以上地震频度均显示出显著的 30 a 左右的周期特征,但从应变释放角度得到全球和环太平洋地震带的地震活动期为 50 a 左右. 这表明,全球和环太平洋地震带的地震活跃—平静期受控于全球地震活动的 50 a 左右的周期成分,而 30 a 左右的周期成分仅造成全球地震活动频次上有一定起伏,对地震来讲,这是一种外力的调制

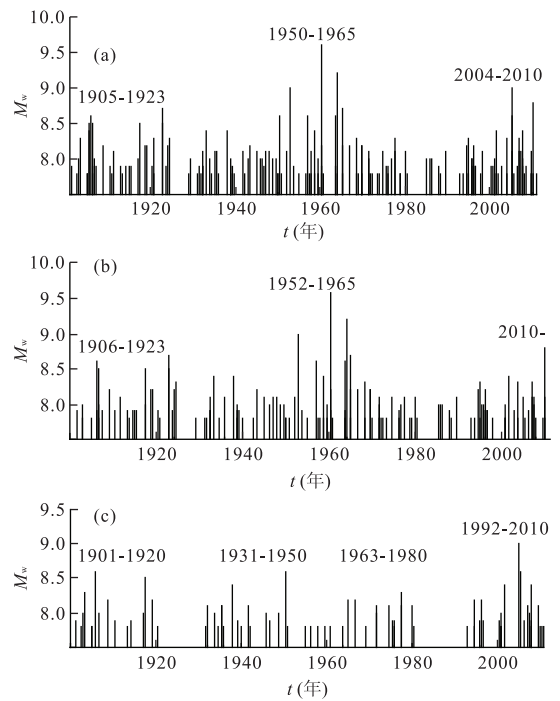


图 8 全球(a)、P 系(b)和 E 系(c)  $M_w \geq 7.8$  地震活动  $M-t$  图  
Fig. 8  $M-t$  chart of global (a), P-system (b) and the E-system (c) earthquakes with  $M_w \geq 7.8$

结果,而不是代表地震活跃—平静期. 当然,低纬度环球剪切带地震活跃—平静期为 30 a,全球活动的 30 a 周期成分对该带地震活跃与平静起控制作用.

从全球、P 系和 E 系  $M_w \geq 7.8$  地震活动  $M-t$  图(图 8)可以清晰地看出,全球与 P 系地震活动是同步的,P 系与 E 系在 20 世纪前 20 a 是同步的,其后主要表现为交替性. 1900 年以来全球 8.5 级以上特大地震出现 3 个活跃时段. 2004 年开始全球地震活动进入以 8.5 级以上地震活动为特征的大释放阶段,参照前 2 个活跃时段的持续时间,这种大释放状态可能还将持续数年. 低纬度环球剪切带处于  $M_w \geq 7.8$  大震活跃幕的尾声,而 2010 年智利  $M_w = 8.8$  地震可能标志着环太平洋地震带开始进入一个  $M_w \geq 8.5$  大震相对活跃的大释放阶段.

致谢:衷心感谢马宗晋院士和两位审稿老师提出的宝贵意见和建议.

### References

Bai, C. H., Xu, W. Y., 2010. Multi-decadal to centennial secular variation of the main geomagnetic field. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(4): 904–911 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.015

- Bercovici, D., 1995. On the purpose of toroidal motion in a convecting mantle. *Geophys. Res. Lett.*, 22: 3107—3110.
- Ding, N., Guan, L. X., Wen, C. B., 2005. Study on fault signal of compressor with Morlet wavelet. *Electrical Automation*, 28(4): 7—10 (in Chinese with English abstract).
- Du, P. R., Ma, Z. J., Gao, X. L., 2010. An analysis on episodes of great earthquakes in the low-latitude circum-earth zone and circum Pacific zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(12): 2869—2874. doi:10.3969/j.issn.0001—5733.2010.12.010
- Engdahl, E. R., Villaseor, A., 2002. Global Seismicity: 1900—1999. In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., eds., *International handbook of earth-quake and engineering seismology*. Academic Press, San Diego, Part A: 665—690.
- Fan, H. S., 2001. A preliminary analysis of global seismicity since 1900. *Recent Development in World Seismology*, (2): 12—17 (in Chinese with English abstract).
- Fedotov, S. A., 1965. On distribution patterns for strong earthquakes in Kamchatka, the Kurile Islands and northeastern Japan. *Trudy Inst Fiz Zemli Akad, Nauk SSSR*, 36: 66—93.
- Fedotov, S. A., 1968. The seismic cycle, quantitative seismic zoning, and long-term seismic forecasting. In: Medvedev S. V., ed., *Seismic zoning in the USSR*. Izdatel'stvo Nauka, Moscow, 133—166.
- He, L. S., Li, W. H., 2002. Morlet wavelet and its application in enveloping. *Journal of Vibration Engineering*, 15(1): 119—122 (in Chinese with English abstract).
- Kanamori, H., 1977. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 82: 2981—2987. doi: 10.1029/JB082i020p02981
- Lin, Z. S., Deng, Z. W., 1999. Study on diagnosis technology of wavelet climate. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Ma, H. S., Zhou, L. Q., Shao, Z. G., et al., 2010. Process and trend of large earthquakes on the earth and in the China continent and its surroundings. *Earthquake*, 30(2): 29—37 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. J., Jiang, M., 1987. Strong earthquake period and episodes in China. *Earthquake Research in China*, 3(1): 47—51.
- Ma, Z. J., Du, P. R., Ren, J. W., et al., 2006. Eposodes of great earthquakes in the low-latitude circum-earth zone and circum Pacific zone. *Science in China (Ser. D)*, 36(4): 326—331 (in Chinese with English abstract).
- Mallat, S., 1991. Zero-crossings of a wavelet transform. *IEEE Transaction on Information Theory*, 37(4): 1019—1033.
- Mei, S. R., 1960. Seismic activity in China. *Acta Geophysica Sinica*, 9(1): 1—19 (in Chinese with English abstract).
- Mogi, K., 1974. Active periods in the world's chief seismic belts. *Tectonophysics*, 22: 265—282.
- Mogi, K., 1979. Global variation of seismic activity. *Tectonophysics*, 57: 43—50.
- Torrence, C., Compo, G. P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79(1): 61—78.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 84(4): 974—1002.
- Xu, D. Y., Zheng, W. Z., An, Z. S., 1980. Heavenly spheres and earthquake prediction. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Yin, J. Y., Zhu, Y. Q., Song, Z. P., 2011. Significance test and precision analysis of Morlet wavelet: application to studying periodic variation of earthquake activity and geomagnetic field. *Acta Seismologica Sinica*, 33(5): 663—671 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y., Hong, H. J., Liu, P. X., et al., 2003. Spatiotemporal distribution of global great earthquakes and dynamic mechanism. *Earth Science Frontiers*, 10(Special): 5—10 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 白春华, 徐文耀, 2010. 主磁场长期变化十年至百年尺度的周期. *地球物理学报*, 53(4): 904—911.
- 丁娜, 关立行, 文常保, 2005. Morlet 小波对于压缩机故障信号的研究. *电气自动化*, 28(4): 7—10.
- 杜品仁, 马宗晋, 高祥林, 2010. 低纬度环球带和环太平洋带大地震的幕式活动分析. *地球物理学报*, 53(12): 2869—2874.
- 范洪顺, 2001. 1900 年以来全球地震活动的初步分析. *国际地震动态*, (2): 12—17.
- 何岭松, 李巍华, 2002. 用 Morlet 小波进行包络检波分析. *振动工程学报*, 15(1): 119—122.
- 林振山, 邓自旺, 1999. 子波气候诊断技术的研究. 北京: 气象出版社.
- 马宏生, 周龙泉, 邵志刚, 等, 2010. 全球及中国大陆周边强震活动状态研究. *地震*, 30(2): 29—37.
- 马宗晋, 杜品仁, 任金卫, 等, 2006. 低纬度环球剪切带及其与环太平洋带大地震的幕式活动. *中国科学(D 辑)*, 36(4): 326—331.
- 梅世蓉, 1960. 中国的地震活动性. *地球物理学报*, 9(1): 1—19.
- 徐道一, 郑文振, 安振声, 1980. 天体运行与地震预报. 北京: 地震出版社.
- 尹继尧, 朱元清, 宋治平, 等, 2011. Morlet 小波显著性检验和精度分析在地磁场和地震活动性周期分析中的应用. *地震学报*, 33(5): 663—671.
- 于泳, 洪汉净, 刘培润, 等, 2003. 全球大地震时空分布与动力学机制的初步研究. *地学前缘(特刊)*, 10: 5—10.