

2011年日本9.0级地震前地震空间 相关长度增长现象*

荣代潞, 李亚荣

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 使用单键群方法研究了2011年3月11日日本本州东北部海域9.0级地震前地震空间相关长度变化。结果表明, 在本次地震发生前约两年, 5级以上地震的空间相关长度开始出现明显增长, 变化趋势可以用幂次率进行很好的拟合。用没有7级以上强震发生的时段内的地震目录, 采用相同方法进行了计算, 没有发现明显的幂次率增长现象, 说明强震前5级以上地震的空间相关长度的幂次率增长是地震孕育过程中震源区的物理性质特征的表现之一。

关键词: 日本9.0级地震; 地震空间相关长度; 幂次率; 单键群方法

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)02-0157-06

0 引言

2011年3月11日在日本本州东北部海域发生了9.0级特大地震, 地震持续时间达5 min, 除地震造成的直接破坏外, 还诱发了超过10 m高的海啸, 引起了火灾、核电站设施爆炸、核泄漏等, 造成上万人死亡和巨大的财产损失。

本次地震发生在太平洋板块和北美板块的边界。板块边界特大地震, 特别是环太平洋地震带地震比较有规律地发生在历史上或很长一段时间内没有破裂的地震空区内(徐锡伟, 2011)。但是源于板块边界带的地震空区理论也很难作为预测这种特大地震的依据。在本次地震发生前, 日本地震界的学者一直把东京湾以南、静冈的东海地区作为未来可能发生8级地震的预想地, 并推算该区域的发震概率达87%, 而将东北部海沟附近作为发震概率不高、震级相对较小的潜在危险区。结果在潜在震源区发生了级联破裂, 产生了9级地震(徐锡伟, 2011)。此外, 迄今为止日本地震研究者也没有提出这次地震其它可靠的前兆。

本文以日本9.0级地震前震源区周围的地震活动性为基础, 研究震前中等地震空间相关长度的变化特征, 试图发现地震活动性方面的前兆特征。

1 原理和方法概述

大尺度范围内的地震活动相关现象是复杂系统处于或趋近于临界状态的一般特征(Gabrielov *et al.*, 2000; Zaliapin *et al.*, 2003; Shebalin *et al.*, 2000; Zöller *et al.*, 2001; Keilis-Borok *et al.*, 2002)。在临近大震发生时这种相关范围的尺度有扩展的趋势, 即强震前的临界阶段地震活动的相关长度增长。这里的相关长度被定义为在一个区域内一定数目的地震之间的震中距的特征尺度。Zöller等(2001)研究发现, 自1952年以来美国加州32°~40°N之间发生的9次 $M \geq 6.5$ 地震前, 地震活动相关长度均有增长现象; 荣代潞等(2004)研究发现, 近17年来, 发生在甘肃及邻近地区的6次6级左右的地震前的地震活动空间相关长度也具有增长的特征。

地震发生前的临界阶段, 地震的相关长度发生幂次率增长(Bruce, Wallace, 1989), 可用下式表示

$$\xi(t) \sim (t_f - t)^{-k}. \quad (1)$$

式中, t_f 为主震的发震时间, k 为正数。

* 收稿日期: 2011-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40574026)资助.

计算相关长度 $\xi(t)$ 通常采用单键群方法 (Frohlich, Davis, 1990), 对于分布有 N 次地震的一个地区, 将每次地震与其空间分布最邻近的地震相连。如此循环下去, 直到 N 次地震用 $(N-1)$ 个键相连在一起, 不考虑震源深度, 这里键长即是两个地震的震中距。这样, 得到一个由 $(N-1)$ 个键长组成的序列。用键长小于等于 ξ 的概率为 0.5 的条件来定义这个地区 N 个地震的相关长度 ξ (Zöller *et al*, 2001)。然后用滑动时间窗方法计算主震前数年相关长度变化的时间进程。

2 主震基本参数

发震时间: 2011 年 3 月 11 日 14 时 46 分 24 秒 (东京时间);

发震地点: 日本本州东部海岸附近海域 (38.297°N , 142.372°E);

震中: 日本东北地区宫城县;

地震矩释放量: $3.6 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_w 9.0$;

发震断层: 太平洋板块向西俯冲到北美板块及更西的欧亚板块之下的巨型低角度逆断层, 属板块边界带地震;

发震断层走向 194.9° , 倾向向西, 倾角 14.9° 。

3 地震目录和计算参数

本文研究所使用的地震目录从美国国家地震信息中心 (National Earthquake Information Center, 简称 NEIC) 获得。所选取的地震目录以 9.0 级地震震中为圆心, 半径 1 000 km, 起始时间为 2000 年 1 月 1 日, 截止时间为本次地震发生时刻 (图 1)。

从 NEIC 下载的地震目录对震级有几种标度, 分别为 m_b , M_s , M_w 等, 绝大多数为 m_b 。对于参加统计分析的所有地震应当有统一的震级标度。因此, 如果选择起始震级 $m_b 5.0$, 则选择的所有地震均用 m_b 标注。

对于计算时空间窗大小的选取, Zöller 等 (2001) 以震中为中心的圆形区域作为计算相关长度的空间窗。由于板块的挤压运动, 增长的应力在地壳中转移传递, 这种传递与这一区域分布的断裂带特别是巨大断裂带有关。本次地震发生在太平洋板块和北美板块交界处。在这种情况下,

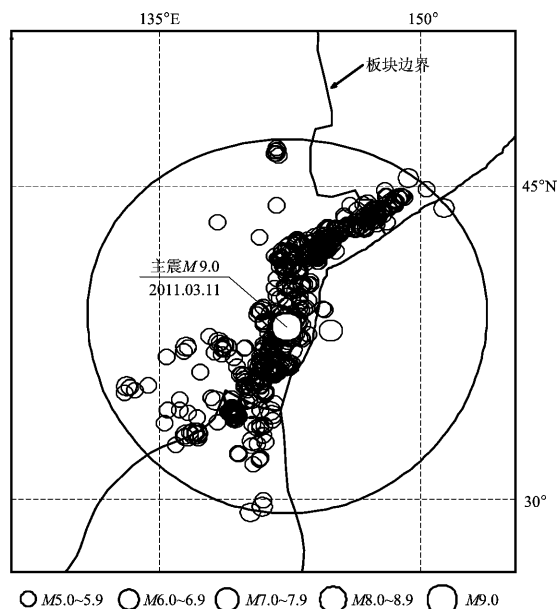


图 1 以主震震中为圆心, 半径 1 000 km 范围内 5 级以上地震分布 (2000-01-01 ~ 2011-03-11)

Fig. 1 $M \geq 5.0$ earthquake distribution in the circle region with 1 000 km radius centered by the epicenter of the main earthquake from Jan. 1, 2000 to Mar. 11, 2011

沿板块边界断裂带选取一定区域的空间窗来计算空间相关长度更合理。为方便起见, 笔者选择中心位于主震震中的椭圆形区域, 其长轴方向与该区的边界走向一致。然后用曲率参数的方法对所选取的空间窗大小进行优化。

由于相关长度增长在地震孕育接近临界阶段才能观测得到, 笔者取主震前 4 年的地震目录进行计算。

通常主震震级越大, 表现相关长度变化特征的地震震级就越高。Bowman 等 (1998) 选取比主震震级小两个震级单位以内的地震, 作为地震孕育的临界性特征的震前矩释放加速 (AMR) 特征。但是该方法存在的问题是对于一些地震可用于计算的地震数目太少。若选取的地震震级偏小, 一些地区由于监测能力的原因, 所记录的地震目录不完备。综合考虑这两方面的因素, 对于本次主震震级为 9.0 级的特大地震, 选取 $m_b 5$ 地震为起始震级。用古登堡—里克特公式对所用的主震前的地震目录进行了完备性检验, 由震级—频度图 (图 2) 可以看出, 5 级以上的地震目录是完备的。

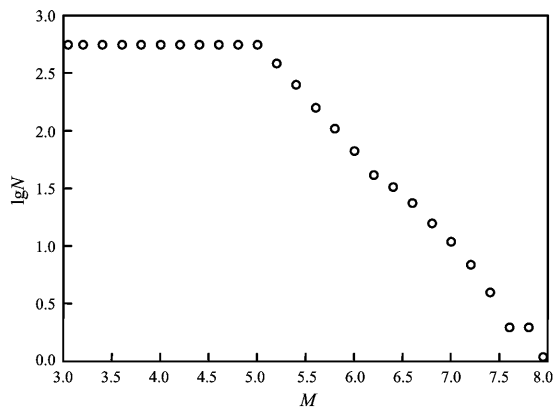


图2 所选取地震目录的震级—频度图
Fig. 2 Magnitude-frequency relation of the selected earthquake catalogues

4 优化程序和主震前地震空间相关长度计算结果

为了量化地震空间相关长度的加速程度，Zöller 等（2001）定义一个曲率参数：

$$c = \frac{(\text{RMS})_{\text{powerlaw}}}{(\text{RMS})_{\text{const}}} \quad (2)$$

式中， $(\text{RMS})_{\text{powerlaw}}$ 为根据（1）式进行幂次率拟合的均方根差； $(\text{RMS})_{\text{const}}$ 为相同资料进行常数拟合的均方差。如果相关长度加速增长， c 值小于 1；如果相关长度未发生加速增长， $\xi(t)$ 的值将围绕一个常数散布， c 值接近 1。在计算中，选取的空间窗（椭圆）由以下几个参数定义：椭圆的大小（长轴和短轴），椭圆长轴的方位角。在一定范围内以一定的步长增量选取这些参数，对应若干个不同的空间窗（椭圆），对它们分别计算 c 值。对于面积相对较小的空间窗，得出的相关长度点少，对于少于 5 个点的区域予以舍去。对于计算得出的 c 值设置一个阈值，例如 0.5，将 c 值大于 0.5 的区域舍去。对其余的区域，分别画出相关长度变化图。综合考虑 c 值得大小、相关长度变化的幅度以及变化的趋势，选择出相关长度变化比较明显的几个结果。在此基础上，再对区域内的地震目录选取不同的起始时间，进一步进行计算。从计算的结果中选取相关长度变化最为明显的作为最终结果。

图 3a 是最终选择出的主震前地震空间相关长度的变化趋势图，图 3b 显示了对应的临界区域和

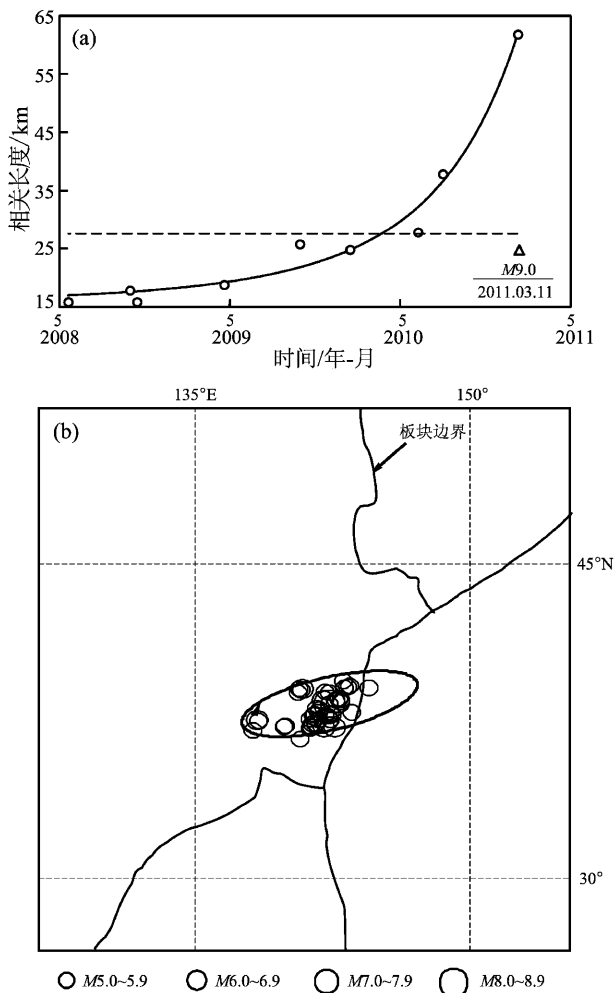


图3 地震空间相关长度变化结果（a）以及对应的临界区域和地震分布（b）
Fig. 3 Correlation lengthen change of seismic spatial (a) and its corresponding critical region and distribution of earthquakes (b)

地震分布。
在图 3a 中，纵轴为相关长度，三角形为主震发生时间，虚线为常数拟合，实线为幂次率拟合。从图中可以看出，对于这个临界区域 5 级以上地震的空间相关长度从 2009 年左右开始增长，到 2011 年 3 月 11 日主震发生前，其增长趋势可以用幂次率非常好地拟合，曲率参数为 0.15；对应的临界区域椭圆长轴 430 km，短轴 140 km，长轴与横轴（向东）夹角约 15°，这与本次地震发震断层的走向 194.9°几乎一致。

5 结果检验

主震前相关长度的幂次率增长是在地震孕育

过程中震源区本身具有的物理性质的表现，还是由于笔者采取的计算处理方法所得到的结果？Zöller 等（2001）以一定的分布创建随机的地震目录，用处理实际地震目录的方法进行处理，然后对实际结果进行显著性检验。得出的结论是，观测到的模型，即主震前相关长度的幂次率增长具有 99.3% 的置信水平。

笔者提出另一种方法进行检验，即在主震震中周围地区的历史地震活动中，选择这样一个时间段，在这个时间段内没有大地震（7.0 级以上）发生且大地震发生在这个时间段后数年，对这一时期的地震目录用前文处理 9.0 级地震前的地震目录同样的方法进行处理，分析是否可能出现同样的地震相关长度幂次率增长现象。图 4 是 1973 年以来图 1 所示区域 5 级以上地震的 $M-T$ 图。从图中可以看到，1996 ~ 2002 年没有大于 7 级的地震发生，随后的一次 8.3 级地震发生在 2003 年 9 月 25 日。笔者选取 1996 ~ 1999 年的地震目录，用同样的方法进行分析计算。

如前所述， c 值表示相关长度变化能用幂次率拟合的程度。图 5 为选取不同时间段的地震目录计算的 c 值的直方分布图。

由图 5 可以看出，日本 9.0 级地震前的地震目

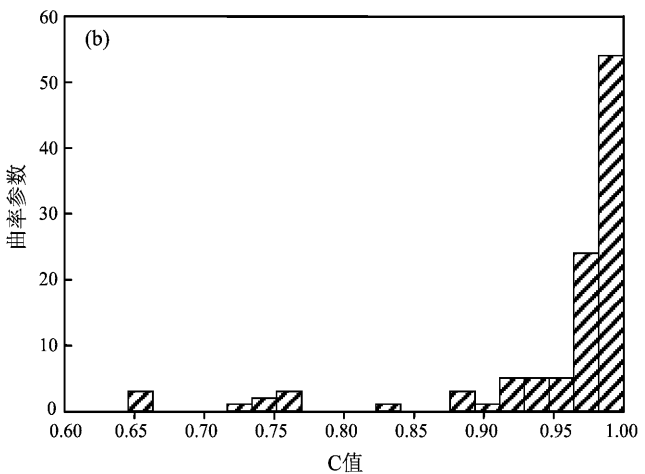
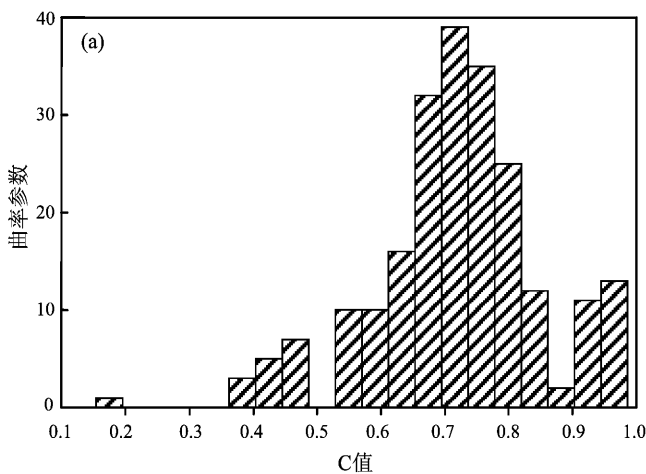


图 5 日本 9.0 级地震前 (a) 和 1996 ~ 1999 年 (b) 的地震目录 c 值分布图
Fig. 5 Distribution of c -value of catalog before Japan $M9.0$ earthquake (a)
and catalog from 1996 to 1999 (b)

6 结论

(1) 用单键群分析方法研究了日本东北部海

录计算相关长度变化的 c 值在 0.5 以下的占相当大的比例，最小值为 0.15；而 1996 ~ 1999 年的地震目录计算的 c 值绝大多数分布在 0.95 左右，最小值为 0.64，对应其相关长度变化如图 6。由图 6 可以看出相关长度没有明显的幂次率变化，而是围绕平均值分散分布。

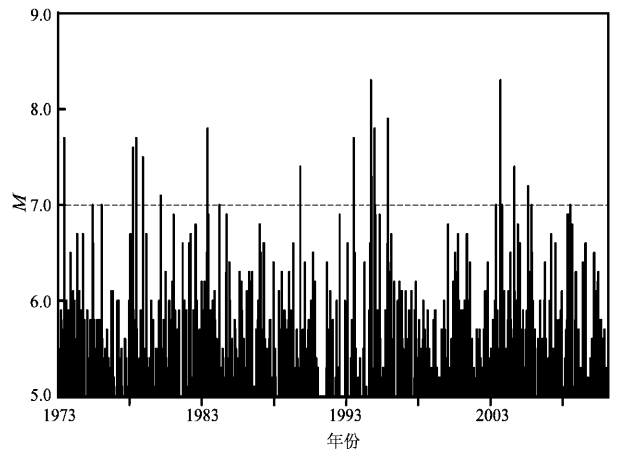


图 4 1973 至 2011 年 11 月图 1 所示圆形区域 5 级以上地震的 $M-T$ 图
Fig. 4 $M-T$ plot in $M > 5$ earthquakes in the circle region showed in graph 1 from 1973 to Mar. 11, 2011

域 9.0 级地震前地震空间相关长度变化。结果表明，从本次地震前约两年，5 级以上地震的空间相关长度开始出现明显增长，变化趋势可以用幂次率进行很好的拟合。

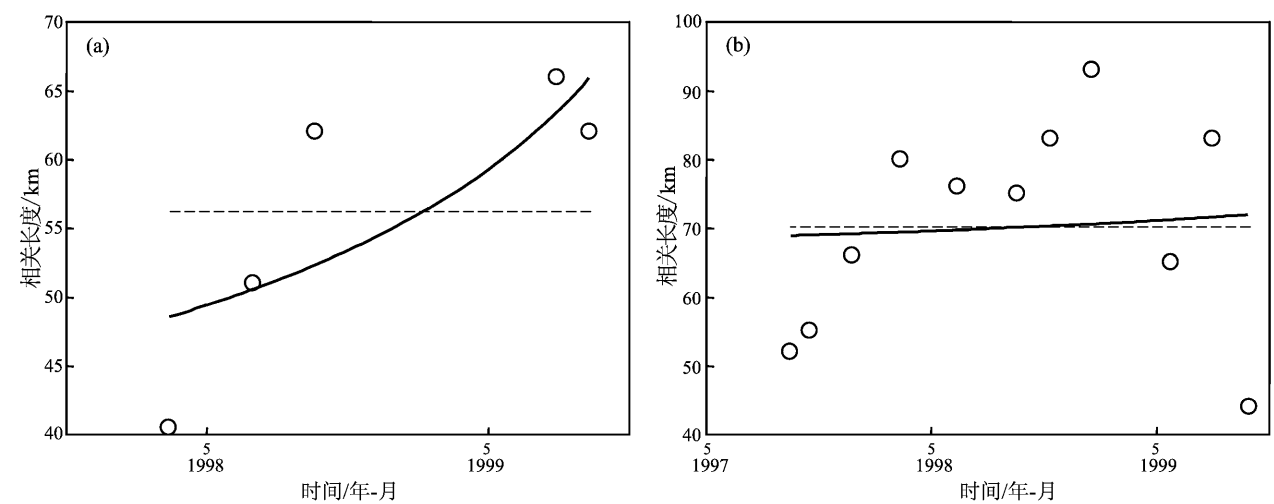


图 6 1996 ~1999 年的地震目录计算的相关长度变化

(a) 最小 c 值对应的相关长度变化；(b) 大多数情况相关长度变化

Fig. 6 Change of correlation length calculated by the catalog from 1996 to 1999

(a) Change of correlation length corresponding to the minimum c -value;

(b) Change of correlation length in most conditions

(2) 用没有 7 级以上强震发生的时段的地震目录，采用相同方法进行了计算，没有发现明显的幂次率增长现象，说明强震前 5 级以上地震的空间相关长度的幂次率增长是地震孕育过程中震源区的物理性质特征的表现之一。

(3) 对于具有自组织临界性特征的地震孕育和发生的物理系统，检测大地震之前空间相关长度的增长是一种从观测的地震活动中检测临界点特征的独立方法。同时，这种方法可为大地震的中短期预测提供地震活动性方面的前兆特征。如果在用通常的方法（例如地震地质方法、地震前兆方法等）确定的近期大震危险区进行相关长度的检测，有可能对未来大震发生的预测提供有价值的参考。

参考文献：

荣代潞,李亚荣,刘旭宙. 2004. 甘肃及邻近地区几次中强地震前地震空间相关长度增长的研究[J]. 地震学报, 26(5): 509-515.
徐锡伟. 2011. 日本 9 级特大地震简介[EB/OL]. (2011-03-21) [2011-10-27]. <http://wenku.baidu.com/view/8b694fdb58da0116c17494d.html>.
Bowman, Quillon D D, Sammis G, et al. 1998. An observational test of the

critical earthquake concept [J]. J Geophys Res, 103 (NB10): 24359-24372.
Bruce A, Wallace D. 1989. Critical point phenomena: universal physics at large length scales [D]//Davies P. The New Physics. New York: Cambridge Univ Press: 236-267.
Frohlich C, Davis D. 1990. Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues [J]. Geophys J Int, 100(1): 19-32.
Gabrielov A, Zaliapin I, Newman W I, et al. 2000. Colliding cascades model for earthquake prediction [J]. Geophys J Int, 143 (2): 427-437.
Keilis-Borok V I, Shebalin P N, Zaliapin I V. 2002. Premonitory patterns of seismicity months before a large earthquake: five case histories in southern California [J]. Proc Natl Acad Sci, 99 (26): 16562-16567.
Shebalin P, Zaliapin I, Keilis-Borok V I. 2000. Premonitory rise of the earthquakes' correlation range: lesser Antilles [J]. Phys Earth Planet Int, 122(3-4): 241-249.
Zöller G, Hainzl S, Kurths J. 2001. Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes [J]. J Geophys Res, 106(2): 2167-2175.
Zaliapin, Keilis-Borok V I, Ghil M. 2003. A Boolean delay equation model of colliding cascades, Part II: Prediction of critical transitions [J]. J Stat Phys, 111(3-4): 839-861.

Growing Phenomena of Seismic Spatial Correlation Length before Japan $M9.0$ Earthquake in 2011

RONG Dai-lu, LI Ya-rong

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

Using single-link cluster analysis (SLC) method, we studied the variation of seismic spatial correlation length before Japan $M9.0$ earthquake occurred in the Northeast Coast of Honshu. The results showed that the seismic spatial correlation length of $M > 5$ earthquakes increased significantly and its trend could be well fitted by power rate in 2 years before $M9.0$ earthquake. Then we applied this method to the catalog with period of no $M7$ strong earthquakes occurred from 1996 to 1999 which was selected from historical earthquake activities in the surrounding area of epicenter, and found that there was no significantly increasing process by power rate. The results showed that the seismic spatial correlation length increased by power rate of $M > 5$ earthquakes which occurred before strong earthquake represented the physical property of focal region in the process of strong earthquake preparation.

Key words: Japan $M9.0$ earthquake; seismic spatial correlation length; power rate; single-link cluster analysis (SLC) method