

芦山 7.0 级地震前地震活动的临界点特征^①

荣代璐, 李亚荣

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:直接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的方法。本文研究了 2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震前 5 年震中周围地区中等地震活动的空间相关长度变化。结果表明,从地震前近两年开始,中等地震以上地震的空间相关长度出现明显增长,变化趋势可以用幂次率进行很好的拟合。用该地区没有 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,说明强震前中等地震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临界点物理特征的表现。

关键词:芦山 7.0 级地震; 临界点特征; 地震空间相关长度; 单键群方法(SLC)

中图分类号: P315.51

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0252-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0252

The Critical Point Behavior of Seismic Activities Prior to Lushan M_s 7.0 Earthquake in 2013

RON Dai-lu, LI Ya-rong

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

Abstract: The seismic correlation length prior to the Lushan earthquake (April. 20, 2013) has been studied by use of single-link cluster (SLC) analysis. The catalogs used were downloaded from China Earthquake Networks Center (CENC, <http://www.csndmc.ac.cn>). The earthquakes were located in an area centered in the mainshock (30.3°N , 103.0°E) and ranging $27^{\circ}\sim 33^{\circ}$ to $100^{\circ}\sim 106^{\circ}$ from 5 years before the mainshock to its origin time. We selected 3.5 as the minimum magnitude and checked the completeness of the catalogs used prior to the mainshock using the Gudengberg formula, which shows good completeness above magnitude 3.5. The results showed that the growing correlation length of earthquakes for moderate-size earthquakes, which had been observed prior to the mainshock nearly two years ago to the origin time, can be fitted well by the power law. At the same time, we have developed a method to test whether or not the result obtained is simply caused by data selection to produce the desired pattern. We selected a time interval before the mainshock in which no great earthquake occurred and several years later when the greater earthquake occurred. The catalogs in the time interval will be analyzed using the same method as the catalogs prior to the mainshock study to check whether the correlation length shows an increase with the power law. We cannot find an obvious increasing process by the power law. For the preparation and occurrence stages of the earthquake process, characterized as a self-organized critical phenomenon, to test directly for growing spatial correlation lengths prior to large earthquakes is an independent approach to detect critical point behavior in observed seismic-

① 收稿日期: 2013-05-06; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013027

基金项目: 中国地震局老专家科研基金(201329)

作者简介: 荣代璐(1945-), 男, 研究员, 从事地球物理和地震学研究。E-mail: rongdl@gssb.gov.cn

ty. The results from this paper showed that the self-organized critical point characteristic was observed prior to the Lushan 7.0 earthquake. The studies in this paper illuminate the notion that the growing seismic correlation length by the power law represents a physical process of critical-point characteristics in the source area preparing for a great earthquake. In future work, the predictive power of growing correlation length should be tested. In an area, the grid search technique can be applied to extract regions of growing correlation length systematically from a data set. The estimates for occurrence time, epicenter, and magnitude of expected mainshock may then be obtained from the fitting parameter, critical region, and value of correlation length. For a further reduction of uncertainties in a predictive approach, it also appears promising to combine the concepts of growing correlation length and other predictive methods.

Key words: Lushan M_s 7.0 earthquake; Critical-point characteristics; Seismic spatial correlation length; Single-link cluster analysis (SLC)

0 引言

地震孕育和发生具有自组织临界性特征。在大地震的孕育过程中,应力从较小到较大规模的重新分布建立了一种长程相关性。因此在高度相关的应力场中,小的破裂可以越过障碍发展成为大地震。当达到临界程度时该系统可以保持接近这种状态。根据这个理论,正在孕育大震的地区具有加速地震释放的特征^[1]。地震释放的加速是由空间相关长度的增长造成的。直接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的方法。

1990 年 Frohlich 和 Davis^[2]将单键群分析方法 (Single-linkcluster analysis, SLC) 用于地震目录的分析研究中。单键群分析法在其他诸多领域已有大量的应用(如社会科学,分类学,天文学等),可以在全局和局部区域的不同层次上定义群或分立事件之间的特征尺度,因此可以从数学上表达事件之间或事件组之间的相互关系。并且单键群分析的结果形成一种线性的链接,它对地震这种常常沿线性构造(例如大断裂)发生的现象是一种很好的分析方法。对于某一区域分布的一定数目的地震,它们之间的距离(震中距)的特征尺度即所谓空间相关长度。国内已有一些研究者用这种方法研究地震活动性特征与地质构造的关系^[3],研究某一地区地震活动的特征^[4]。2001 年 Zoller 等^[5]用此方法研究了美国加州北纬 $32^\circ \sim 40^\circ$ 之间 1952 年以来发生的 9 次 $M \geq 6.5$ 地震前地震活动相关长度的增长现象;荣代潞等^[6]研究了近 17 年来发生在甘肃及邻近地区的数次 6 级左右地震前的地震活动空间相关长度增长的现象。荣代潞等^[7-9]还将这一方法应用于日本 9.0 级地震(2011 年 3 月 11 日)、汶川 8.0 级地

震(2008 年 5 月 12 日)和 2004 年以来苏门答腊北部海域两次强震(2004 年 12 月 26 日 M_w 9.4 和 2012 年 4 月 11 日 M_s 8.6)。从这些研究的结果发现在中强地震前都不同程度地观测到了相关长度增长的现象,这一现象有可能作为一个地区中强地震前地震活动性方面的预测指标。而且原则上这一方法可以用于任何有数年观测记录的地区。

2013 年 4 月 20 日在四川芦山发生了 M_s 7.0 强震,震中位置北纬 30.3° ,东经 103.0° 。本次地震震中及附近地区地质构造复杂^[10]。本文针对这次大地震,以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。

1 原理和方法概述

如果一种系统接近临界点,根据幂次律,相关长度 ξ 应增长^[11]:

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

式中 k 为正数; t_f 是系统破裂(地震发生)的时间。从地震目录中估算相关长度 ξ 的方法是用 Frohlich 和 Davis^[1]引进的单键群分析方法(SLC)。在用单键群分析方法来估算相关长度 $\xi(t)$ 时,选定一个地区分布有 N 次地震,可以首先将每次地震与其空间分布最邻近的地震相连构成一个小震群,然后每一个小震群与其最近的震群相连,如此循环下去直到 N 次地震用 $N-1$ 个键相连在一起。这里键长即是两个地震的震中距(这里仅考虑二维情况)。这样就得到一个由 $(N-1)$ 个键长组成的序列,用键长小于等于 ξ 的概率为 0.5 的条件来定义相关长度。

为了得到相关长度的时间演化进程,使用滑动时间窗方法。在选定的空间范围内,以在主震发生前一段时间(一般是数年)的地震序列为基础,以一

定数目的地震作为时间窗。用单键群分析方法计算这个时间窗内的地震的相关长度,然后以一定的步长使这个时间窗移动,重复上面计算相关长度的步骤,这样就可得到主震发生前一段时间内相关长度随时间的演化过程。如果这种演化进程在主震发生前有加速增长的现象,可以用式(1)进行幂次律拟合。

2 地震目录和计算参数

所使用的地震目录从中国地震台网中心地震数据服务网(<http://www.csndmc.ac.cn>)获得。空间范围北纬 $27^{\circ} \sim 33^{\circ}$,东经 $100^{\circ} \sim 106^{\circ}$,时间范围为 2009 年 1 月 1 日至 2013 年 2 月 28 日(在线数据截止日期),缺失 2013 年 3 月至主震发生前一个多月的资料(图 1)。

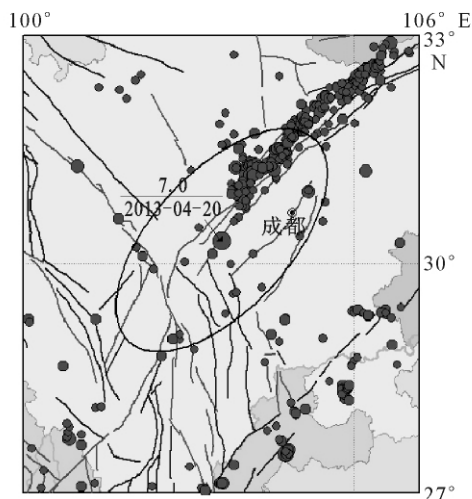


图 1 以主震震中为中心, $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ 范围内地震分布
Fig. 1 The seismic distribution in the area centered in the epicenter of main shock and having $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ range.

从台网中心下载的地震目录对于震级有几种标度(m_b , M_s , M_L , M_w 等),绝大多数为 M_L 。对于参加统计分析的所有地震应当有统一的震级标度。本文选择的所有地震均用 M_L 的震级标度标注的地震震级。

关于计算相关长度的起始震级,通常主震震级越大,表现相关长度变化特征的地震震级越高。一些作者在研究中选取比主震震级小两个震级单位以内的地震^[12],但是存在对于一些地震可用于计算的地震数目太少的问题;若选取的地震震级偏小,又存在对于一些地区由于监测能力的原因所用地震目录不完备的问题。综合考虑这两方面的因素,对于本文研究的主震震级为 $M_s 7.0$ 大地震,选取 3.5 级(M_L)地震为起始震级。用古登堡公式对所用的主

震前的地震目录进行了完备性检验,其震级-频度图如图 2,可以看出所用的地震目录在 3.5(M_L)级以上完备的。

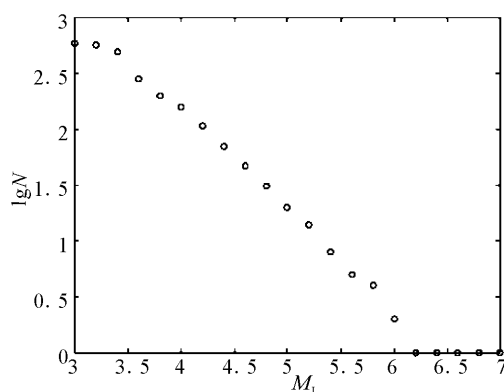


图 2 所用地震目录的震级-频度关系
Fig. 2 The magnitude-frequency plots for the used catalog.

需要指出的是,图 1 所选的地震中,区域东北方向有大量的地震属于汶川 8 级地震的余震,我们在相关长度的计算中没有删除。因为如前所述,在大地震的孕育过程中应力从较小到较大规模的重新分布建立了一种长程相关性,也就是说大震前地震相关长度的增长是区域应力重新分布和集中的结果。余震的发生是强震后应力调整的表现,同样反映了这个区域的应力状态,因而汶川 8 级地震的余震发生与这一地区未来大震的孕育和发生相关。

3 优化程序和主震前地震空间相关长度计算结果

对于某一次地震,在选定的空间窗区域内计算相关长度并进行幂次律拟合,同时进行常数拟合^[4]。然后定义一个曲率参数

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

这里 $(RMS)_{powerlaw}$ 为根据式(1)进行幂次率拟合的均方根差; $(RMS)_{const}$ 为相同资料进行常数拟合的均方差。对于相关长度加速增长, 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。对所选取的不同大小和方位角的椭圆内的地震活动,同时选取地震目录中不同的起始时间来计算参数 C ,综合考虑来确定临界区域。

最终结果的选择:对于所有的空间窗计算得到对应的 C 值,分别画出相关长度变化图。综合考虑 C 值的大小、相关长度变化的幅度以及变化的趋势,选择出最终的结果。

图 3 是最终选择出的主震前地震空间相关长度

的变化,对应的临界区域和地震分布如图 1 中椭圆形所示。图中纵轴为相关长度,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。由图 3 可以看到,对于 2013 年 4 月 20 日 $M_s 7.0$ 地震,在临界区域 $M_L = 3.5$ 以上地震的空间相关长度从 2011 年 6 月左右开始增长,到 2013 年主震发生前,其增长趋势可以用幂次率非常好地拟合,曲率参数为 0.60。

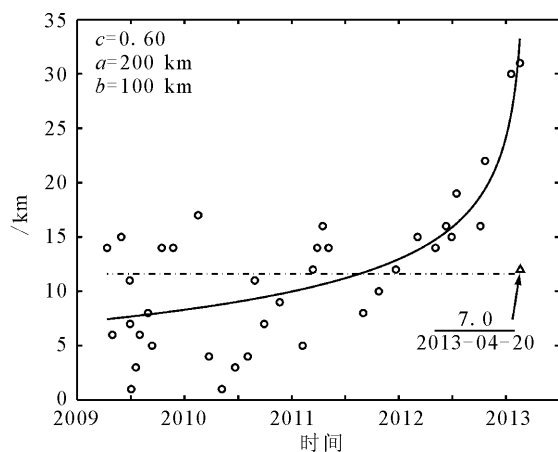


图 3 相关长度变化结果(对应的临界区域和地震分布如图 1 中椭圆形区域)

Fig. 3 The result of correlation length changing (the corresponding critical area and seismic distribution are shown as the ellipse area in Fig. 1).

4 结果的检验

我们使用的优化程序根据真实的地震目录的时空分布鉴别出在主震前的相关长度增长。问题是在所研究的地震观测到的相关长度增长是否简单地由于我们的程序中数据选择和数据拟合所产生的结果?为了回答这个问题,G. Zoller 等人采取的方法是^[4]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同样的方法进行处理,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)可在随机目录中发生的零假设可以 99.3%的置信水平被否定。

在本文中我们提出另一种方法进行检验,即在主震周围地区的历史地震活动中选择没有大地震($M_s 7.0$ 以上)发生,且后续大地震发生相隔数年的时间段,对这一时期的目录用上面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 1983 年以来研究区域 3.5 (M_L)级以上地震的 $M-T$ 图。从图中可以看到,1997 年至 2007 年期间没有大于 $M_s 7$ 的地震发生,

随后的一次 $M_s 8.0$ 地震发生的是 2008 年 5 月 12 日汶川的 8.0 级地震。我们取 1998—2002 年 5 年的地震目录用同样的方法进行分析计算,结果表明相关长度随时间进程只是在平均值上下分散分布,没有发现明显的幂次率增长现象。一个示例如图 5。

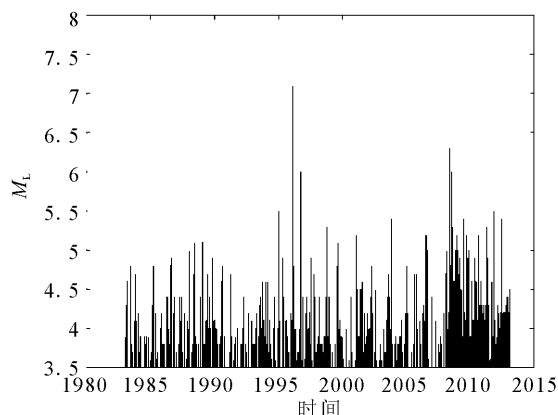


图 4 1983 年以来以芦山 7.0 级地震为中心,图 1 中区域 3.5(M_L)级以上地震的 $M-T$ 图

Fig. 4 The $M-T$ plot for the earthquakes from 1983 in the area centered in the epicenter of Lushan earthquake having a range $6^\circ \times 6^\circ$ greater (and equal) magnitude 3.5 (M_L).

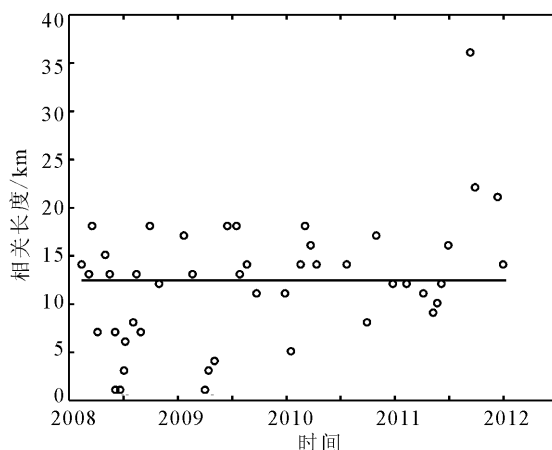


图 5 1998 年—2002 年的地震目录计算的相关长度变化(一个示例)

Fig. 5 The correlation length changing for the catalog from 1998 to 2002 (one example).

5 结论和讨论

(1) 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地震孕育和发生的物理系统的临界点特征的独立方法。本文用单键群分析方法研究了 2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震

前地震空间相关长度变化。结果表明从地震前近两年开始中强地震($M_L=3.5$)以上地震的空间相关长度出现明显增长,变化趋势可以用幂次率进行很好的拟合。可以看出2013年4月20日四川芦山7.0级前观察到了明显的地震活动的临界点特征。

(2) 为了对所得结果进行检验,本文用主震发生区域没有 M_S7 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,说明强震前中强地震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。

(3) 在今后的研究中应对增长的相关长度的预测能力进行检测,因此 t_f 将成为一个新的拟合参数。对于一个地区进行格点搜索可用于从数据组中系统地提取发生相关长度增长的地区。预测的主震发生时间将与新的拟合参数有关,且震中与震级的估计值可以根据主震之前的临界区与相关长度 t_f 的计算。把增长的相关长度理论与其他方法结合起来有望进一步降低预测方法的误差。

[参考文献]

- [1] Sykes L R, S C Jaume. Seismic Activity on Neighboring Faults as A Long-term Precursor to Large Earthquakes in the San Francisco Bay area[J]. *Nature*, 1990, 348: 595-599.
- [2] Frohlich C, D Davis. Single-link Cluster Analysis as A Method to Evaluate Spatial and Temporal Properties of Earthquake Catalogues[J]. *Geophys. J. Int.*, 1990, 100: 19-32.
- [3] 周惠兰, 刘振, 高原. 单键群方法与昆仑山—阿尔金弧形构造顶部地震时空群集特征[J]. *中国地震*, 1997, 13(3): 197-206.
ZHOU Hui-lan, LIU Zhen, GAO Yuan. SLC Method and Earthquakes' Clustering Features in Time-space in the Top Area of Kunlun—Altun—Arc[J]. *Earthquake Research in China*, 13(3): 197-206.
- [4] 高原, 周惠兰, 马延路. 川滇地区地震活动单键群分析[J]. *中国地震*, 2000, 16(1): 86-91.
GAO Yuan, ZHOU Hui-lan, MA Yan-lu. SLC Analysis on Earthquake Activity in the Regions of Sichuan and Yunnan, China[J]. *Earthquake Research in China*, 2000, 16(1): 86-91.
- [5] Zöller G, Hainzl S, Kurths J. Observation of Growing Correlation Length as An Indicator for Critical Point Behavior Prior to Large Earthquakes[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(2): 2167-2175.
- [6] 荣代路, 李亚荣, 刘旭宙. 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*, 2004, 26(5): 509-515.
RONG Dai-lu, LI Ya-rong, LIU Xu-zhou. Study on Growing Correlation Length Prior to the Earthquakes Occurred in Gansu Province and Its Nearby Area[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 26(5): 509-515.
- [7] 荣代路, 李亚荣. 2011年日本9.0级地震前相关长度增长现象[J]. *地震研究*, 2012, 35(2): 157-162.
RONG Dai-lu, LI Ya-rong. Growing Phenomena of Seismic Spatial Correlation Length before Japan M9.0 Earthquake in 2011[J]. *Journal of Seismological Research*, 2012, 35(2): 157-162.
- [8] 荣代路, 李亚荣. 汶川8.0级地震前地震空间相关长度变化特征[J]. *西北地震学报*, 2010, 32(1): 54-58.
RONG Dai-lu, LI Ya-rong. The Changing Characteristics of Seismic Correlation Length before Wenchuan M8.0 Earthquake, 2010[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 32(1): 54-58.
- [9] RONG Dai-lu, LI Ya-rong. Growing Correlation Length of Moderate-sized Earthquakes Prior to Two Earthquakes Near Sumatra Island[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2012, 3(3): 29-33. doi: 10.3724/SP.J.1246.2012.00029.
- [10] 黄伟, 江娃利. 四川龙泉山断裂带及其活动性与潜在地震危险性讨论[J]. *西北地震学报*, 2012, 34(1): 50-56.
HUANG Wei, JIANG Wa-li. Discussion on the Late Quaternary Activity and Earthquake Risk Potential of Longquanshan Fault in Sichuan[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012, 34(1): 50-56.
- [11] Bruce A, D Wallace. Critical Point Phenomena: Universal Physics at Large Length Scales[A]//edit by P Dawis. the New Physics[G]. New York: Cambridge Univ. Press, 1989: 236-267.
- [12] Jaume S C, L R Sykes. Evolving towards A Critical Point: A Review of Accelerating Seismic Moment/energy Release Prior to Large and Great Earthquakes[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1999, 155: 279-306.