

基于节点汇聚的地震序列分析方法

徐久强, 宋佳, 何璇, 赵海

(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于时空影响域方法构造地震网络, 结果显示地震网络具有小世界、无标度等复杂网络的一般特征. 选取 1990 年至 2010 年的四川地震数据进行研究, 这些地震大多分布在龙门山断裂带上. 对所构造的地震网络进行节点汇聚, 得到以节点为单位的地震序列, 序列类型为前震-主震-余震型. 通过对地震序列的能量变化进行研究发现, 能量的变化不具有周期性, 而一定大小的时间窗口内的地震能量和的变化具有周期性, 且能量中心分布在龙门山断裂带的主中央带上. 这些结果说明, 基于节点汇聚的地震序列分析方法对于认识地震的发生规律具有重要的意义.

关 键 词: 地震网络; 龙门山断裂带; 节点汇聚; 地震序列; 能量规律

中图分类号: TP 399

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)03-0319-04

Analysis Method of Seismic Sequence Based on Node Converging

XU Jiu-qiang, SONG Jia, HE Xuan, ZHAO Hai

(School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SONG Jia, E-mail: songjia_sj@sina.cn)

Abstract: Based on space-time influence domain, an earthquake network was built, which had small-world and scale-free characteristics of complex network. The Sichuan seismic data were chosen between 1990 and 2010, most of which distributed on the Longmenshan fault. After node converging on the earthquake network, several seismic sequences from nodes were obtained, which mainly belonged to foreshock-mainshock-aftershock type. Through studying the energy changing of seismic sequences, the results indicated that a single earthquake's energy changing does not show the law, but the sum energy of sequences with a certain size time window has periodicity change, and the energy center distributes on the Longmenshan central fault zone. All of these researches show that there is an important significance to recognize the regularity of earthquake using analysis method of seismic sequence based on node converging.

Key words: earthquake network; Longmenshan fault; node converging; seismic sequence; energy law

目前国内外主要从地震动力学和统计学两方面来研究地震活动. 地震活动由于多种复杂因素的共同作用, 往往表现出复杂且不确定的特性. 尽管许多科学家一直致力于寻找地震活动的规律性, 但只发现几个关于地震活动的经验定律. 其中有两个最著名的地震定律, 用于刻画余震的时间间隔模型的 Omori 定律^[1], 以及描述地震震级和频数的关系的 Gutenberg - Richter 定律^[2]. 然而最近的一些研究工作还发现, 地震事件的发生是非随机的和非独立的, 是有一定规律性的, 不同地

震事件之间具有复杂的相互关联和相互作用, 因此从系统的角度来研究地震活动是很有必要的. 复杂网络^[3-4]是认识系统复杂性的关键途径. 近些年来, Abe, Suzuki 等在研究地震活动时, 首次将复杂网络的概念引入到地震学中, 并且建立了一种基于时间序列的网络模型, 定义为地震网络 (earthquake network, 简称 EN). 研究发现 EN 具有小世界^[5]、标度不变性^[6]、高聚集系数^[7]等复杂网络的一般特征. 另外, 地震学者发现地震活动表现出了一定的时空相关性^[8], 所以仅仅从时间

收稿日期: 2015-02-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAH82F04).

作者简介: 徐久强(1966-), 男, 辽宁北镇人, 东北大学教授; 赵海(1959-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

或空间角度来考虑地震活动之间的关系显然是不够的,因此有学者提出了一种基于时空影响域的地震网络构造方法^[9-10],本文也将采用这种方法来构造地震网络。

一般把一次强震发生前后一定时间内发生的大小地震按时间排列起来称为一个地震序列^[11]。为了将地震网络拓扑^[12-13]特性与地震知识结合起来,本文提出一种基于节点汇聚的“前震-主震-余震型”地震序列分析方法来研究地震能量的变化规律。地震的发生被认为是地球内部能量释放的结果,大震来临前和大震发生后地震序列的能量分布会发生显著的变化,对地震序列能量的规律研究有助于分析地震活动的能量变化趋势,提高对地震的发生与分布规律的认识水平。

1 节点汇聚

1.1 节点汇聚思想

运用复杂网络方法分析地震网络,经过计算发现网络中某些节点的度、聚集系数等特性比较明显,这些节点在网络中表现为与周围的大量节点联系较紧密,进一步分析发现,这些节点往往包含着强震。本文根据地震网络这一特性提出节点汇聚思想,将这些联系紧密的节点聚合在一起,并对它们所包含的地震序列进行研究,期望发现地震序列的一些规律。

1.2 节点的汇聚过程

本文地震网络中的节点存储结构 Node(id, outdegree, rank, sign) 见图 1。其中, id 表示节点的编号; outdegree 表示节点的出度值; rank 表示节点的优先级; sign 表示标志位。

id	outdegree	rank	sign
----	-----------	------	------

图 1 节点的存储结构

Fig. 1 The storage construction of node

需要说明的是 sign 标志位取值分为三种情况:①sign 等于 2 表示这个节点是一个强震节点(即含有震级大于等于 6 级地震事件的节点);②sign 等于 1 表示这个节点已经被汇聚到某个集合中;③sign 等于 0 表示这个节点有待分配。rank 表示节点的优先级大小,主要是用于决定节点汇聚时公共节点归属于哪个节点集合。

节点汇聚过程描述如下:

1) 首先找出强震节点,并将这些强震节点的标志位 sign 设为 2。因为在地震中存在这样的情况,由于主震震级过大,其余震有可能也是强震。所以,像这样的强震节点不再作为主震节点来进

行节点汇聚,而是把它作为直接邻居节点汇聚到其主震节点的集合中。

2) 确定有几个主震节点后就有几个节点集合。定义相应的集合 $V_i, i = 1, 2, \cdots, n$; 首先按照顺序交替找出每个主震节点的所有直接邻居节点,将这些节点的标志位 sign 值设为 1,并将这些节点放入到相应的主震节点集合 V_i 中,如果两个或多个主震节点间有公共的直接邻居节点,按照优先级大小将此节点汇聚到优先级大的主震节点集合中。将新形成的主震节点集合视为一个新的节点继续找出其直接邻居节点,并将这些节点放入到各自形成的节点集合中,直到网络的所有节点全部被汇聚完毕为止。

如图 2 所示,当 B 也是强震节点时,由于 B 是 A 的直接邻居节点,已被分配,所以不再将 B 作为一个主震节点进行节点汇聚。首先对强震节点 A 进行第一次汇聚得到一个集合 $S_{A1} \{A, B, C, D\}$,再对强震节点 J 进行第一次汇聚得到 $S_{J1} \{N, K, J, L, O\}$,这时 A 和 J 在各自的集合中就是主震节点;再分别将 S_{A1} 和 S_{J1} 看作新的节点进行第二次汇聚,分别得到 S_{A2} 和 S_{J2} ;当进行第三次汇聚时,首先得到 $S_{A3} \{A, B, C, D, E, F, G, H, P\}$,当得到 S_{J3} 时,由于 $P \in S_{A3}$,产生冲突,但因为 $\text{rank}(J) > \text{rank}(A)$,所以, $S_{A3} = S_{A3} - P, S_{J3} = S_{J3} \cup P$,此时得到 $S_{J3} \{J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T\}$ 和 $S_{A3} \{A, B, C, D, E, F, G, H\}$,对其余强震节点进行汇聚时也按这种方法处理。

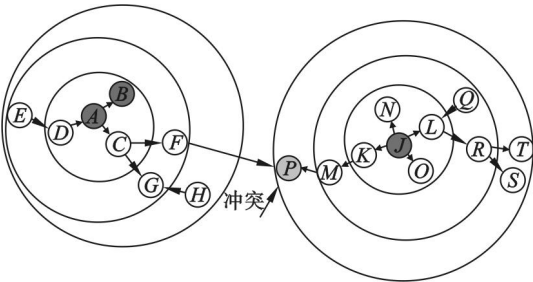


图 2 节点汇聚过程

Fig. 2 The process of node converging

2 实验过程

2.1 数据选取与数据处理

本文选取国家地震科学数据共享中心中国台网地震目录(<http://data.earthquake.cn/data/>)提供的 1990 年~2010 年 20 年间记录的 5 030 条四川地震数据,分布范围为纬度 26.03°N~34.19°N,经度 97.21°E~108.31°E,震级范围 $M_L 2.0 \sim 6.3$,这些地震大多分布在龙门山断裂带。近年来汶川、雅安、芦山等地都发生过大地震,对人民

的生命财产造成巨大损失,而且它们又都分布在四川的龙门山地震带上,因此对四川地震的研究是一项非常有价值的课题.

将各个节点集合内的所有节点包含的地震事件按照时间先后顺序排序,利用地震能量公式计算出每个地震事件的能量值.

地震能量公式:

$$\lg E = 11.8 + 1.5 M . \tag{1}$$

其中: E 代表地震能量; M 代表地震的震级.

图 3 是各个集合的地震序列能量示意图. 由图3可知仅仅研究单个地震的能量变化没有明

显的规律,基于国外学者提出的一种基于时间窗口^[14]方法建立地震网络,本文设置一个时间窗口用于分析地震序列的能量变化规律,通过移动时间窗口来研究该窗口内所有地震累积能量和的变化规律. 在本文中由于数据量较大,时间跨度长,设置一个时间窗口 $\text{window} = 1$ 年,每次移动步长 $\text{step} = 0.5$ 年,各个集合地震序列能量和示意图见图 4a ~ 4e.

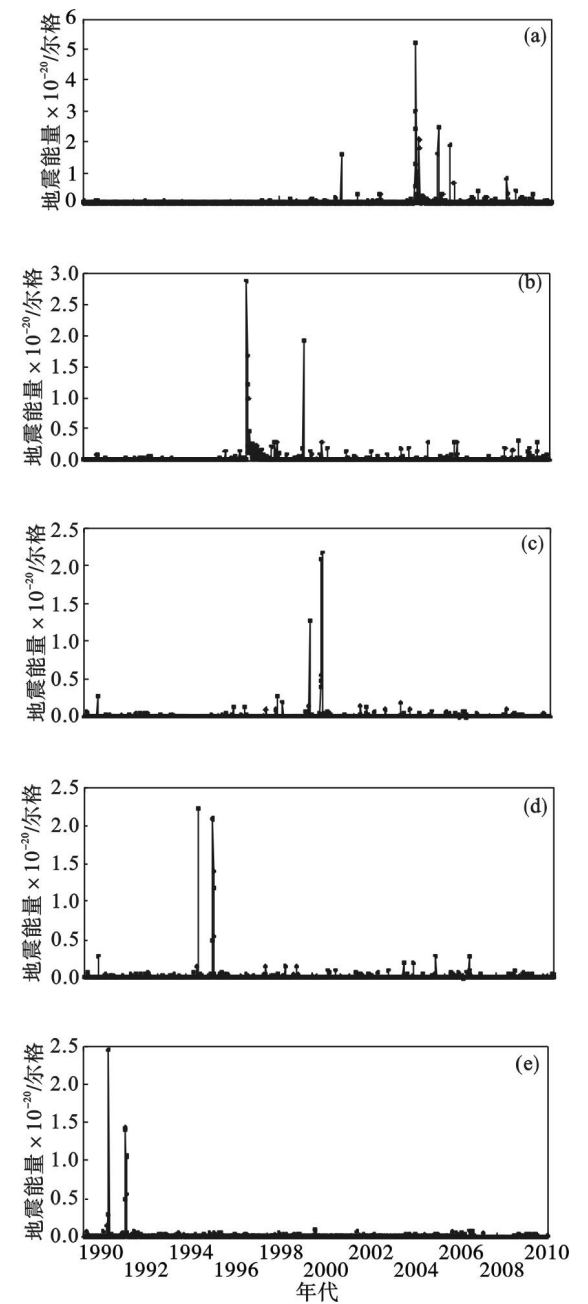


图 3 不同集合的地震序列能量示意图
Fig. 3 The seismic sequence energy map of different sets
(a)—集合 S_1 ; (b)—集合 S_2 ; (c)—集合 S_3 ;
(d)—集合 S_4 ; (e)—集合 S_5 .

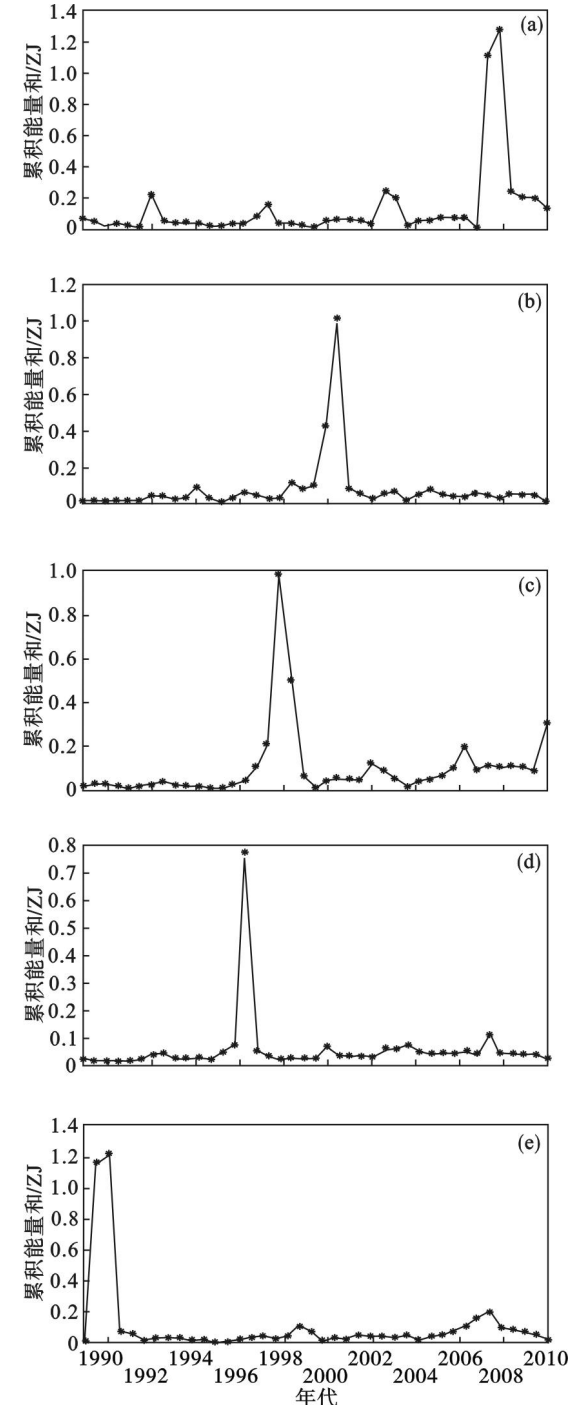


图 4 不同集合的能量和示意图
Fig. 4 The energy sum map of different sets
(a)—集合 S_1 ; (b)—集合 S_2 ; (c)—集合 S_3 ;
(d)—集合 S_4 ; (e)—集合 S_5 .

2.2 结果分析

如图 4 所示,以能量和的峰值变化规律为标准,本文中各个节点集合的能量和周期大约是 5 年,4 年,2 年,3 年及 8 年,但是各个节点集合的能量和的峰值大小却是不同的.通过分析各个节点集合能量和的峰值前后半年的变化情况,可以发现在强震发生时能量值达到峰值,在强震发生前能量值并不都是呈现增加的趋势,即不一定有明显的前震,说明还无法通过节点集合的能量和的变化规律来预测强震的发生,只能将能量和的变化规律作为研究地震活动周期性的一种参考.

由于本文只选取龙门山断裂带的地震数据进行分析,因此后续工作是将本文提出的基于节点汇聚的地震序列分析方法应用到其他断裂带上,以检验该方法是否具有普适性.

3 结 论

1) 地震网络中某些节点具有高聚集性,这些节点与周围节点联系紧密,该类节点一般包含大震节点,根据这一特点,提出了节点汇聚思想.

2) 对集合中的地震序列仅研究单个地震事件能量变化不易发现地震活动的规律,而使用时间窗口对一段时间内的地震事件能量和的研究,发现其能量和具有一定的周期性.

参考文献:

- [1] Omori F. On the aftershocks of earthquakes[J]. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 1894, 7: 111 – 119.
- [2] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, 34(4): 185 – 188.
- [3] Wang X F, Chen G. Complex networks: small-world, scale-free and beyond[J]. *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, 2003, 3(1): 6 – 20.
- [4] Zhou T, Bai W J, Wang B H, et al. A brief review of complex networks[J]. *Physics*, 2005, 34(1): 31 – 36.
- [5] Abe S, Suzuki N. Small-world structure of earthquake network [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2004, 337(1): 357 – 362.
- [6] Abe S, Suzuki N. Scale-invariant statistics of period in directed earthquake network [J]. *The European Physical Journal B—Condensed Matter and Complex Systems*, 2005, 44(1): 115 – 117.
- [7] Abe S, Suzuki N. Dynamical evolution of clustering in complex network of earthquakes[J]. *The European Physical Journal B—Condensed Matter and Complex Systems*, 2007, 59(1): 93 – 97.
- [8] Novelo-Casanova D A, Berg E, Hsu V, et al. Time-space variation of seismic S-wave coda attenuation (Q_c) and magnitude distribution (b-values) for the Petatlan earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 1985, 12(11): 789 – 792.
- [9] He X, Zhao H, Cai W, et al. Earthquake networks based on space-time influence domain [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 407(C): 175 – 184.
- [10] 何璇,赵海,蔡巍,等. 基于时空影响域的地震网络构造方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(10): 1395 – 1399.
(He Xuan, Zhao Hai, Cai Wei, et al. An earthquake network construction method based on time-space influence domain [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(10): 1395 – 1399.)
- [11] Marfurt K J, Scheet R M, Sharp J A, et al. Suppression of the acquisition footprint for seismic sequence attribute mapping [J]. *Geophysics*, 1998, 63(3): 1024 – 1035.
- [12] 谢周敏. 地震活动的网络拓扑结构和网络动力学行为[J]. *震灾防御技术*, 2011, 6(1): 1 – 17.
(Xie Zhou-min. Network topology and network dynamical behavior of seismicity [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2011, 6(1): 1 – 17.)
- [13] Abe S, Suzuki N. Main shocks and evolution of complex earthquake networks[J]. *Brazilian Journal of Physics*, 2009, 39(2A): 428 – 430.
- [14] Ferreira D S R, Papa A R R, Menezes R. Towards evidences of long-range correlations in seismic activity [J]. *arXiv Preprint arXiv:1405.0307*, 2014.