

基于时空影响域的地震网络动力学演化特征分析

赵海, 张娅, 何璇, 赵楠
(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 为了研究地震网络的动力学行为, 基于时空影响域的地震网络, 分析以大地震发生时间为基点的网络的拓扑特征演化. 结果发现: 大地震发生前网络的规模和熵值较小, 模块度较大; 大地震发生后网络的规模变大, 熵值跳变到相对大的值, 模块度值达到极小值. 同时分析了 1992 年地震网络的多参数拓扑特征演化, 结果表明地震网络表现出一种内在的网络动力学行为. 此外, 发现从大地震发生前 100 d 开始网络模块度振荡出现极大值, 熵值振荡出现极小值, 并呈现很好的负相关性.

关 键 词: 地震网络; 节点; 边; 熵; 模块度; 演化

中图分类号: TP 399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)09-1232-05

Dynamic Evolution Analysis of the Earthquake Network Based on the Time-Space Influence Domain

ZHAO Hai, ZHANG Ya, HE Xuan, ZHAO Nan

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Ya, E-mail: zhang.ya.cool@163.com)

Abstract: Based on the earthquake network of the time-space influence domain, the topology of seismicity around the main shock was analyzed for the network's dynamic behaviors. It was found that the scale and the entropy were small while the modularity was big before the main shock; the scale increased greatly, the entropy jumped to a high value and the modularity reached a minimum value after the main shock. Meanwhile, the multi-parameter evolution of the topology of seismicity in 1992 was analyzed, whose results showed that the earthquake network exhibited a inner dynamic behavior. In addition, the modularity took a maximum value, the entropy had a minimum value, and they presented good negative correlation.

Key words: earthquake network; vertices; edge; entropy; modularity; evolution

近年来,地震活动形式的探索受到越来越多人的重视,不仅是因为不同的探索形式能够带来预测地震的可能,而且能使人们以一种不同的角度理解地震活动过程.地震的发生不是独立的,在一次地震发生前后总会有其他地震事件的发生;地震的发生也不是偶然的,而是受各种因素的影响.在地震学中有两个比较著名的定律:描述震级和地震频度的 Gutenberg - Richter 定律^[1];描述余震发生频度和时间间隔的 Omori 定律^[2].这 2 个定律的发现说明地震的发生不是独立也不是偶然的,是有规律可循的,所以从整体的角度研究地震活动是很有必要的.而复杂网络^[3]可以使人们

从整体的角度研究复杂系统的结构和功能,探究其内在联系,从而发现地震的本质特征.

2004 年日本学者 Abe 首次将复杂网络引入到地震学中,提出了一种基于时间序列的地震网络的构造方法^[4],使用该方法构造的地震网络具有小世界^[5]和无尺度^[4]特性、层次性^[6]和社团特性^[7].2011 年中国地震学家谢周敏提出了一种加权复杂网络模型^[8],研究发现地震活动中震源之间的关联程度有较强的异质性,同时发现大地震前网络参数表现出一定规律的异常变化.2014 年巴西学者 Douglas 提出了一种基于时间窗口的地震网络构造方法,还证明了网络的无尺度特性,同

收稿日期: 2014-07-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110304003).

作者简介: 赵海(1959-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师.

时发现大度值节点多集中在易发生地震的地区^[9]. 同年,何璇注意到以上构造方法都是基于时间序列的思想,存在一定的不足,提出了一种基于时空影响域的地震网络构造方法^[10-11],该地震网络被证明具有小世界和无尺度特性.

每年总会有大地震发生,这些大地震发生后会使网络发生什么变化,可以通过分析地震网络参数的演化规律给出结论. 同样,这也为分析地震系统提供了一种新的途径.

按系统论的观点,演化是事物从一种多样性统一形式转变为另一种多样性统一形式的具体过程. 在地震系统中,不断有新的地震发生,地震网络的结构不断发生变化. 在对网络的演化研究中,通过观察已有的结构特性,找到大地震对网络结构的影响,并根据这些规律更好地认识地震发生的本质. 本文以时间为主线,对不同时间段的地震网络规模、熵值、模块度的演化规律进行了分析. 结果发现,这些参数值的变化与大地震有很强的关联,无大地震出现的情况下其参数值不断波动,大地震发生后其参数值会有巨大变化. 这些结果以一种新颖的方式显示了地震活动的时空复杂性.

1 数据的选择

世界上有众多多发地震带,美国加州是地震发生最频繁的地区,该地区的地震数据量大,统计精确,为地震的研究带来了可靠的支持. 许多地震学家都以加州为例分析研究地震系统. 同样,本文选取加州 1992 年,1999 年,2010 年的地震活动数据. 该地理区域位于 $32^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\text{W} \sim 122^{\circ}\text{W}$. 该地震数据来源于美国加州数据中心 (http://www.scecdc.scec.org/eq-catalogs/date_mag_loc.php). 这里设置震级下限为 0.0 级,从中选出每年震级最大的地震,以该地震发生时间为基点,进行数据划分. 其中 1992 年 6 月 28 日发生 7.3 级地震;1999 年 10 月 16 日发生 7.1 级地震;2010 年 4 月 4 日发生 7.2 级地震.

2 地震网络构造方法

地震学家注意到地震事件在时间和空间上均表现出一定的相关性,时空影响域的构造方法^[10]从时间和空间上考虑了地震间的关系,所以本文选用该构造方法对网络的拓扑演化特征进行分析.

3 网络演化分析

本文将考察在时空影响域的地震网络的动力学演化过程中,其规模、熵值、模块度的大小随窗口的变化特征.

3.1 固定时间窗口

本文设置的时间窗口 $t_{\text{win}} = 10 \text{ d}$,时间窗口是该地震目录的起始时刻不断地向终止时刻方向移动的时间长度,移动步长 $t_{\text{step}} = 10 \text{ d}$. 每移动一步,立刻将该时窗内的地震数据构造成一个无向简单网络,获得一系列的随窗口演化的特征参数值. 以大地震发生时间为基点,对大地震发生前 60 d 和发生后 60 d 网络的参数进行演化分析.

3.1.1 网络规模的分析

本文把生成的地震网络转换成简单无向图,分析其参数的演化规律,首先分析网络规模的演化规律. 节点数和边数在一定程度上体现了网络的规模,是网络规模大小的度量.

图 1 给出了节点和边随时间的演化规律,横坐标表示与大地震发生的时间间隔,纵坐标分别表示节点数和边数. 从图 1a 中可见基点之前不同时间段的节点数介于 50 ~ 100,基点之后节点数

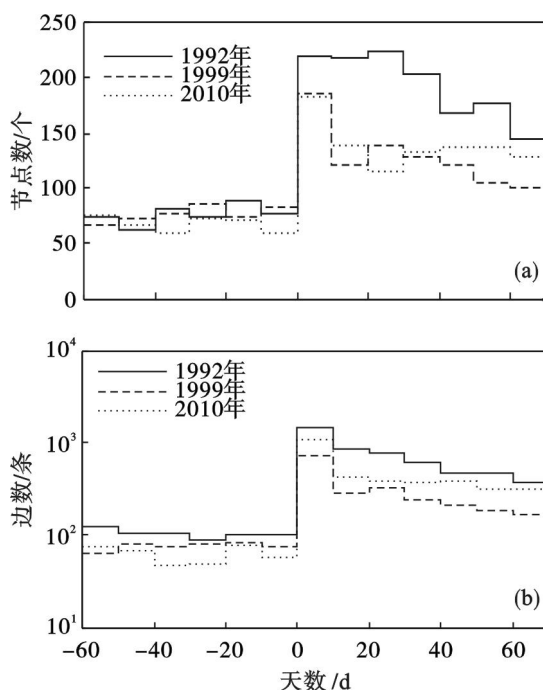


图1 大地震前后地震网络规模的演化
(0代表大地震发生的时刻)

Fig. 1 Scale evolution of the earthquake network around main shocks (zero represents the happening time of the biggest earthquake)

(a)—节点数的演化; (b)—边数的演化.

显著增加. 在很长的一段时间内, 网络的节点数都普遍多于基点之前网络的节点数. 从图 1b 可见在大地震来临后其边数保持增长趋势, 然后逐渐减少, 但边数相比大地震发生前的网络要多.

可见, 随着大地震的来临, 网络的规模明显变大. 这是因为大地震震源释放的能量巨大, 波及的范围广, 以弹性波的形式向四周传播的地震波衰减经历的时间长, 在地震波衰减的过程中, 有的地区由于地质构造薄弱, 导致了新震的发生. 同时大地震发生, 余震增加, 导致大地震发生后节点数并没有迅速恢复, 而是逐渐减小.

3.1.2 熵值的分析

在复杂网络中, 熵值被用来描述网络的无序程度. 熵是系统的一个状态函数, 熵的变化与系统演化的方向有密切关系, 可以作为系统演化的重要判据. 熵的宏观意义表示系统能量分布的均匀度, 能量分布越不均匀, 熵就越小.

将无尺度网络的结构熵定义为

$$H = - \sum_{k=1}^n p(k) \ln p(k). \quad (1)$$

其中: $p(k)$ 为网络拓扑中度值为 k 的概率; n 是网络拓扑节点总数.

图 2 给出了熵随时间的演化规律. 可见, 无大地震发生时网络的熵值介于 1~2, 当大地震来临后, 熵值增加, 最大值可达到 3~3.5, 整体呈现上升的趋势. 结合式 (1) 可知有大地震的地震网络无尺度特征更加明显. 这说明大地震对网络的无序程度影响显著, 大地震来临后导致地壳运动, 网络处于非平衡状态, 在接下来的一段时间, 其熵值比无大地震的网络熵值要大.

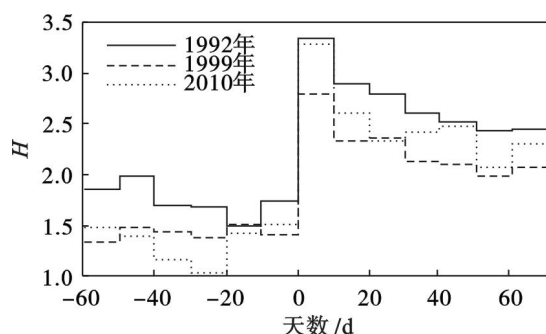


图 2 熵值的动力学演化

Fig. 2 Dynamic evolution of the entropy

3.1.3 模块度的分析

模块度是网络的社团结构划分好坏的度量, 而社团结构是表征整个网络是如何被划分成子网的. 地震网络的社团结构也是从整体和全局的角度进行的“群”的划分, 它可以很好地反映地震系

统的整体结构, 如果地震网络的社团结构越明显, 则地震网络的模块性越好, 这样就可以单纯从社团角度出发研究网络的结构, 从而发现地震系统的本质特征.

假定网络已经被划分成 n 个社区, 定义 1 个 $n \times n$ 的对称矩阵 $e = (e_{ij})$, 其中, 元素 e_{ij} 表示原网络中连接社区 i 和社区 j 中节点的边数所占比例. 该矩阵中对角线上各元素之和为矩阵的迹, 即 $\text{Tre} = \sum_i e_{ii}$. 定义每行 (或者列) 中各元素之和 $a_i = \sum_j e_{ij}$. 则模块度定义如下:

$$Q = \text{Tre} - \sum_i a_i^2. \quad (2)$$

图 3 给出了模块度随时间的演化规律, 横坐标表示与大地震的时间间隔, 纵坐标表示模块度的大小. 可见, 大地震发生后, 网络的模块度降低, 然后再逐渐增加, 这说明大地震破坏了网络的社团结构, 融合了一些其他的社团, 使社团结构的显著性降低, 这也展示了大地震怎样在地震网络中被描述为地震活动的代表.

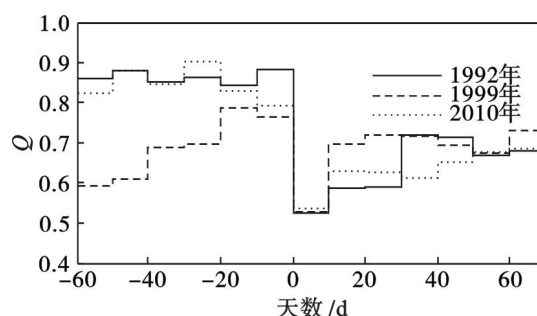


图 3 模块度的动力学演化

Fig. 3 Dynamic evolution of the modularity

为了清楚地看到大地震对社团结构的影响, 本文使网络的规模处于同等程度大小, 分别选取了 1992 年大震发生前 6 个月和发生后 1 个月的数据生成网络. 图 4 使用 Gephi 展示了网络拓扑的社团结构. 从图 4a 中看出网络有些破碎, 源于该构造方法会使一些节点之间无必然联系, 从而没有连边, 形成孤立节点. 从图 4b 中可以看出网络中出现了更大的社团, 社团间的紧密连接降低了社团结构的显著性. 大地震的发生增加了网络的连通性, 使得任意两次距离很远的地震均存在联系, 从而使地震震源产生的弹性波能通过节点之间进行传播, 体现了网络的动力学行为.

从以上参数的演化规律中发现大地震影响了网络的规模、无序程度和社团结构. 为了探究其他时间段的地震网络的动力学演化特征, 本文以 1992 年的数据为例, 通过多参数分析网络的演化特征.

3.2 1992 年多参数融合分析

由上面的分析可知,单参数只能反映大地震对网络的某一特性的影响,不能综合反映对网络变化情况的影响.为了全面地分析网络的动力学

演化规律,选取 1992 年的数据,以最大的地震发生时间为基点,以 10 d 为一个数据单元,对网络的变化情况进行多参数融合分析.

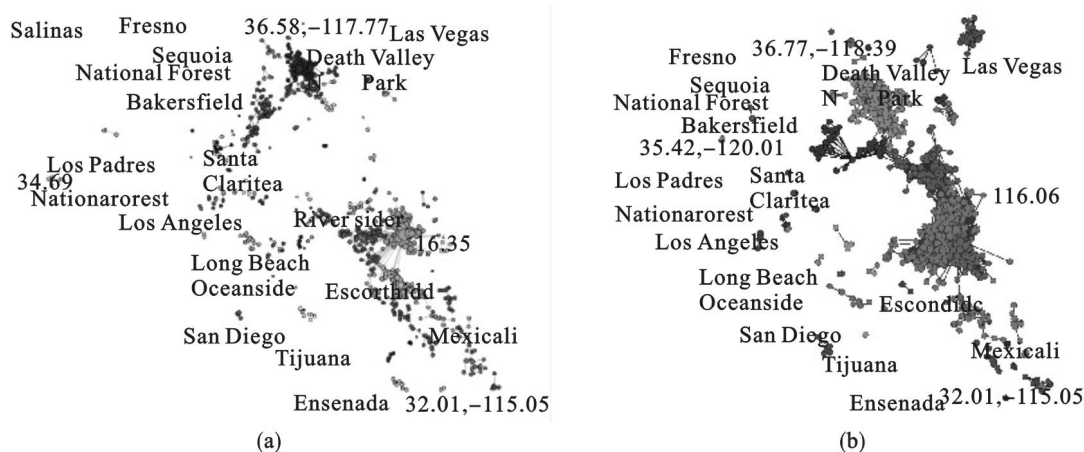


图4 大地震发生前6个月和发生后1个月的网络拓扑社区划分

Fig. 4 Partition of community six months before the main shock and one month after the main shock

(a)一大震发生前6个月的网络社区划分;(b)一大震发生后1个月的网络社区划分.

图5给出了1992年每一数据单元构成的地震网络的节点数、边数、熵值、模块度的变化规律.从图5a中可以看出节点数、边数仅在(2)处有显著变化,经查阅数据发现这两处分别包含了Joshua Tree地震(M6.1)和Landers地震(M7.3).研究发现相对于Joshua Tree地震,Landers地震表现出了更明显的变化规律,边和节

点的数量均大幅增加.说明Landers地震的发生引发了众多的小震,加强了节点之间的联系,使网络变成了稠密网络.而Joshua Tree地震仅使边数出现小幅度增长,节点数基本没有变化.由此可以看出:两次震级差距很小的地震,引起的网络结构变化差距很大.(1),(2)两处出现增长后,曲线呈下降趋势,并逐渐恢复至平稳状态.

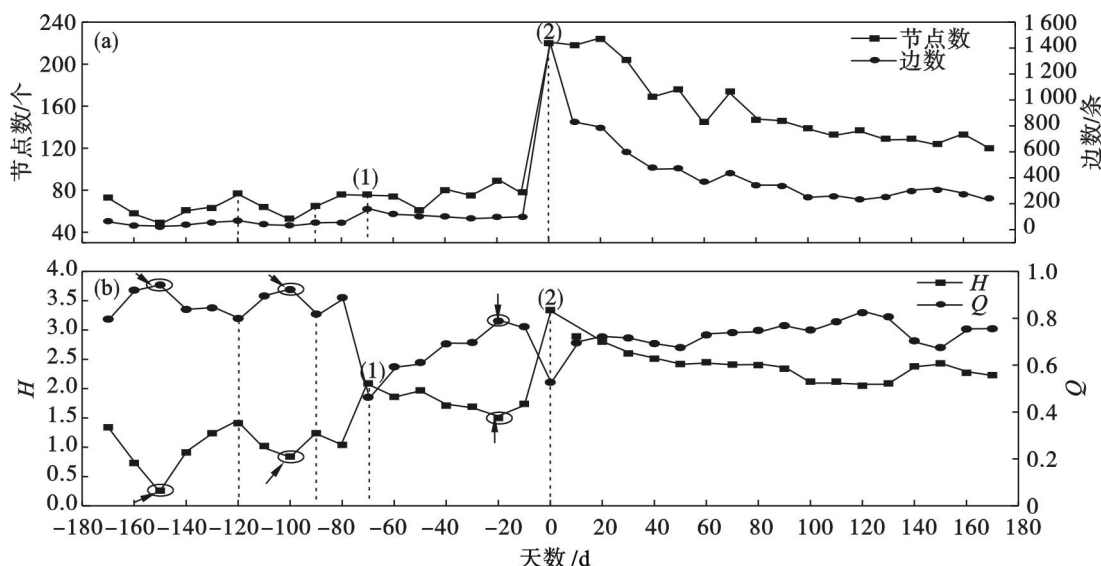


图5 1992年网络拓扑特征演化(时间轴零点对应为7.3级主震发生时刻,箭头处为异常点)

Fig. 5 Dynamical evolution of the network in 1992 (zero in time axes refers to the moment of M7.3 main shock, and the arrows represent the abnormal points)

(a)—节点数和边数;(b)—熵值和模块度.

结合图5a判断出大地震所处的数据单元,从图5b中可知,Landers地震和Joshua Tree地震所

在的数据单元构成的地震网络熵值出现了极大值点,模块度出现了极小值点.Landers地震导致网

网络的熵值达到最大值,Joshua Tree 地震导致网络的模块度达到最小值.此外,在 Joshua Tree 地震发生前 100 d 开始网络模块度一直保持显著的极大值,并振荡出现多个极大值,同时熵值 H 也一直保持显著的极小值,并振荡出现多个极小值.从图中可以看出熵值出现最大值的时候正是模块度出现次小值的时候,本文称这种情况为异常点.图中箭头所指之处即为异常点,可以看出,Joshua Tree 地震前有多次异常,熵值和模块度值的差距较大,而 Landers 地震发生前仅有一次异常.

大地震导致网络的熵值增加,模块度减小.从图 5b 中可以看出熵值多次振荡出现极大值,其对应的模块度振荡出现极小值.由图 5 可知,当天数等于 -120 d 时,其熵值出现了极大值,模块度出现了极小值,但是其节点数增加,边数基本保持不变,同时该时间段没有发生大地震.同样,当天数等于 -90 d 时,熵值和模块度均出现了上述的规律,其边数和节点数均呈现上升趋势,但不是极值点,而且该时间段也没有发生大地震.因此,可以看出网络结构的变化不是仅由大地震引起的,而是众多地震相互作用导致的.所以仅从单个参数去分析网络的演化特征只能对网络有局部了解,只有多参数的共同分析才能从全局对网络有更加全面而清晰的理解.

综上所述,大地震导致了网络规模的增大,主要影响了网络的紧密程度,同时熵值和模块度的变化规律可发现地震来临前的异常.这些规律的发现可以更好地理解地震网络.

4 结 论

本文基于时空影响域的地震网络构造方法,以大地震发生时刻为基点,分析了美国加州 1992 年,1999 年,2010 年大地震发生前、后两个月的无向简单网络的拓扑特征演化,包括节点数、边数、熵值、模块度.作者发现大地震发生前:网络的规模较小,拓扑结构较为有序,社团结构较为明显;大地震发生后地震网络规模变大,结构变得无序,社团结构显著性降低.这一根本原因在于大地震释放巨大的能量,地震波对周围地质产生很大影响.这一结论表明地震网络中事件的内在动力学行为.

此外,本文选择 1992 年的地震数据构造的网

络进行多参数融合分析,从全局更好地理解网络的变化情况.作者发现网络的熵值和模块度对震级大于 6 级的地震比较敏感,并在大地震来临前表现出一种特殊的规律性:熵值保持显著的极小值,并振荡出现多个极小值;模块度保持显著的极大值,并振荡出现多个极大值,与熵值呈现负相关性.

参考文献:

- [1] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, 34(4): 185 - 188.
- [2] Omori F. On the aftershocks of earthquakes [J]. *Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo*, 1894, 7: 111 - 119.
- [3] 周涛,柏文洁,汪秉宏,等. 复杂网络研究概述 [J]. 物理, 2005, 34(1): 31 - 36.
(Zhou Tao, Bai Wen-jie, Wang Bing-hong, et al. A brief review of complex networks [J]. *Physics*, 2005, 34(1): 31 - 36.)
- [4] Abe S, Suzuki N. Scale-free network of earthquakes [J]. *Europhysics Letters*, 2004, 65(4): 581.
- [5] Abe S, Suzuki N. Small-world structure of earthquake network [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2004, 337: 357 - 362.
- [6] Abe S, Suzuki N. Complex earthquake networks: hierarchical organization and assortative mixing [J]. *Physical Review E*, 2006, 74(2): 26113.
- [7] Abe S, Suzuki N. Dynamical evolution of the community structure of complex earthquake network [J]. *Europhysics Letters*, 2012, 99(3): 39001.
- [8] 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.)
- [9] Ferreira D S R, Papa A R R, Menezes R. Small world picture of worldwide seismic events [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 408: 170 - 180.
- [10] 何璇,赵海,蔡巍,等. 一种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] 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: 175 - 184.