

基于时空影响域地震加权网络的研究

徐久强, 赵楠, 何璇, 赵海

(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 为了研究地震活动的时空复杂性,在时空影响域地震网络的基础上,考虑地震活动之间相互影响程度的差异性,提出了一种地震加权网络的构造方法.使用1984~2014年加州地震数据构造了地震加权网络,研究其基本性质以及网络节点的连接性质来揭示地震活动的内在联系.分析结果表明:地震加权网络的点权分布及边权分布均具有幂律分布特征;网络节点的点权与度关系表明,相对于大地震,中强地震对网络性质的影响也同样较强;研究地震网络的平均邻近度和聚集系数,发现强震地区之间可能更容易发生强连接.研究结果表明,基于时空影响域的地震加权网络可以更好揭示无权网络无法发现的地震系统的内在联系.

关 键 词: 时空影响域;地震网络;加权网络;连接相关性;无标度

中图分类号: TP 393.17

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)06-0804-05

Study on Earthquake Weighted Network Based on Time-Space Influence Domain

XU Jiu-qiang, ZHAO Nan, HE Xuan, ZHAO Hai

(School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: ZHAO Nan, E-mail: zhaonan521@sina.cn)

Abstract: In order to study the time-space complexity of seismic activity, in view of the difference in the interaction between seismic activity regions, an earthquake weighted network construction method based on time-space influence domain was put forward. California seismic data in 1984~2014 was selected to structure the earthquake weighted network, and its basic properties and connection properties of the network nodes were analyzed to reveal the inner link of earthquake activity. Experiments show that the link-weight distribution and the node-weight distribution can be described by power law; the relationship of node-weight and node-degree show that, for the property of this earthquake weighted network, the moderate-strong shock is as important as the large shock; by the study of the average neighbor degree and the clustering coefficient of seismic weighted network, it was found that strong shock regions are tend to be linked to strong connection. The above results show that the weighted network can help us find some internal relations of seismic system which cannot be found through the unweighted network.

Key words: time-space influence domain; earthquake networks; weighted network; connection correlation; scale-free

在对地震活动的研究中,由于受地质构造、断裂带、介质和环境等多种因素的影响^[1],人们很难掌握其活动规律.复杂网络理论^[2]能够刻画复杂系统的各种相互作用或关系,而地震活动规律表现出一种复杂的网络动力学行为^[3],使得从复杂网络的角度去研究地震活动引起不少科研人员的兴趣.

Abe等最初将历史地震数据抽象成一种时间序列地震网络^[4],该网络具有小世界特性和无标度特性,且具有层次结构和社团特性^[5];根据时间序列构网方法,谢周敏验证了地震网络的复杂的网络动力学行为^[3].何璇等提出了一种综合考虑地震事件之间时间和空间关联的时空影响域地震网络构造方法^[6],使用该方法构造的地震网络

表现出稳定的无标度特征. 使用该方法进一步研究发现大地震发生地点与最高核节点所在位置相邻近^[7], 并结合贝叶斯推断对地震进行预测^[8].

但是以上对于时空影响域地震网络的研究中, 使用的均是无权网络: 节点之间的关系只有两种关系, 要么有连边、要么无连边. 无权网络降低了实际系统的复杂性, 有助于清楚地了解地震网络的拓扑结构. 但是, 通过观察地震数据, 可发现一段时间内不同地区发生地震的频率、震级具有很大区别, 不同地区之间地震事件的相互作用的大小也有很大区别. 因此, 将网络中所有的边看成无差别的是不够的, 需要使用边权来刻画节点之间的连接关系和相互作用. 为此, 本文提出一种基于时空影响域地震加权网络的构造方法, 并以加州为实例分析其拓扑特征以及节点之间的连接性质.

1 基于时空影响域地震加权网络构造方法及数据基础

1.1 基于时空影响域地震加权网络的构造

基于时空影响域的地震网络构造方法描述如下: 将所要研究的地理区域划分为边长为 l 大小相等的正方形单元, 若在一个单元内发生过一次及以上的地震, 那么将该单元抽象成为一个节点; 每次地震均产生一定的时空影响域, 在该影响域内发生的地震均视为与该地震有直接联系; 若这两次地震发生在不同单元那么这两个单元之间形成一条边, 若在同一单元内那么在该单元产生一条自连边, 而在该地震影响域之外发生的地震均视为与该地震无直接影响关系. 这种方法考虑了地震之间时间和空间上的影响关系, 因此本文选用该方法构造地震网络.

在构造地震网络过程中, 可能存在一对节点之间有多条重复的边, 还可能存在自连边. 本文作以下处理来构造地震加权网络: 去掉自连边; 如果节点 i 与节点 j 之间存在 n 条边, 则合并此 n 条边, 并将 n 定义为这对节点间唯一边的边权 w_{ij} ; 去掉与其他节点没有连边的孤立节点. 例如, 假设基于时空影响域构造的地震网络拓扑如图 1 所示, 图 2 为按照以上方法构造的基于时空影响域的地震加权网络.

在地震加权网络中, 节点表示地理区域, 边表示两个地区之间存在地震能量传递的相互作用, 边权就表示两个节点地区发生地震能量传递的总次数, 是对应节点区域之间的关联程度的衡量

标准.

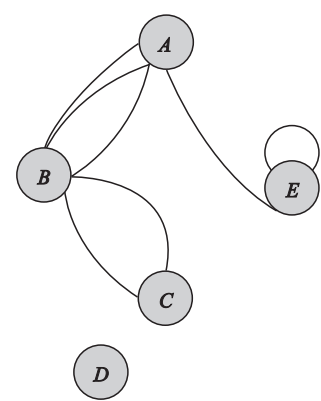


图 1 基于时空影响域地震网络的拓扑图
Fig. 1 Network topology based on time-space influence domain

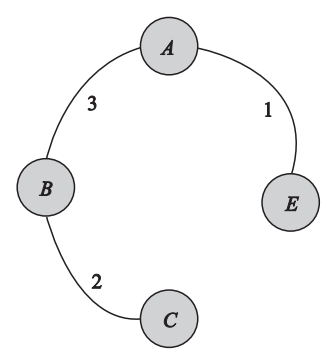


图 2 地震加权网络拓扑图
Fig. 2 Earthquake weighted network topology

需要强调的是, 在整个地震网络构造过程中存在一个变量, 它是划分节点正方形单元的边长 l . Abe 等提出一种确定 l 大小的方法^[9], 本文使用这种方法发现在 $5\text{ km} \leq l \leq 28\text{ km}$ 时, 地震网络的性质是稳定的. l 取值越小, 地震网络可以包含的连接信息越详细, 因此本文选择区域划分的单元面积为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$.

1.2 数据基础

地震带地区的地震活动频繁, 这些地区完备的地震数据更有利于人们对地震活动研究分析. 在对地震活动的研究中, 很多学者以美国加州为研究对象, 因为加州属于环太平洋地震带, 地震发生频繁且数据完整, 本文也选择使用美国加州地区地震数据源 (<http://scedc.caltech.edu/>) 对地震活动进行研究分析. 本文选取了从 1984 年至 2014 年, 西经 111° 到 124° , 北纬 30° 到 39° 的地震数据, 总计 498 794 条地震记录.

2 地震加权网络的无标度特性

根据所描述的方法使用加州 1984 ~ 2014 年地震数据构造地震加权网络. 为了更清晰地理解

认识地震加权网络的拓扑特征,对该网络的基本统计参数进行分析.

一个节点的度为连接该节点的边的数目,用 k 来表示.度是描述网络局部特性的基本参数;度分布 $p(k)$ 描述度为 k 的节点的出现概率,反映了网络系统的宏观统计特征.研究的地震加权网络共有 4 648 个节点,观察发现度值最高的三个节点是发生 1992 年 7.3 级大地震、1987 年 6.6 级大地震、2010 年 7.2 级大地震的节点地区,出现这种现象的原因是一个地区发生了大地震以后,该地震引发大量的余震与更多的地区发生联系,从而使该节点地区度值更大.整个网络的平均度值是 18.42,也就是说平均每个节点地区与其他 18 个节点地区有地震能量的传递关系.

在地震加权网络中,判断节点重要性除考虑节点的度值之外,还需要考虑与节点相连的边的边权 w .为此引入节点点权的概念,若集合 A 是节点 i 的所有邻居节点的集合,那么节点 i 的点权 s_i 定义如下:

$$s_i = \sum_{j \in A} w_{ij} . \tag{1}$$

地震加权网络中,边权表示两个地区发生地震能量传递的次数,那么节点的点权表示该节点与其他节点地震能量传递的总次数,对于研究地震活动具有重要意义.另外,点权分布 $p(s)$ 度量了节点点权为 s 的概率,它和度分布 $p(k)$ 以及边权分布 $p(w)$ 一起为分析地震加权网络提供了多个角度.

图 3a,3b,3c 分别为加权网络的度分布、点权分布和边权分布,为观察分析之便,取双对数坐标.

从图 3a 可以看出,度分布服从幂律分布,显示了地震加权网络的无标度特性.图 3b 看出, $p(s)$ 是重尾的,重尾前的部分服从幂律分布,点权数值在 $1 \sim 10^7$ 之间,表明节点的连接性质存在较大差异性,与度分布比较,数值范围相差两个数量级,说明节点的点权比节点的度更细致地刻画了节点之间连接性质的差异性.图 3c 看出, $p(w)$ 也是重尾的,重尾之前的部分服从幂律分布.边权数值在 6 个数量级之间,表明地区之间关联程度具有较强的异质性,边权较大的边连接的两个节点地区之间频繁发生地震能量传递,它们之间的连接属于强连接,是重点研究对象.边权的幂律分布表明网络中少数连接属于强连接,大多数属于弱连接.

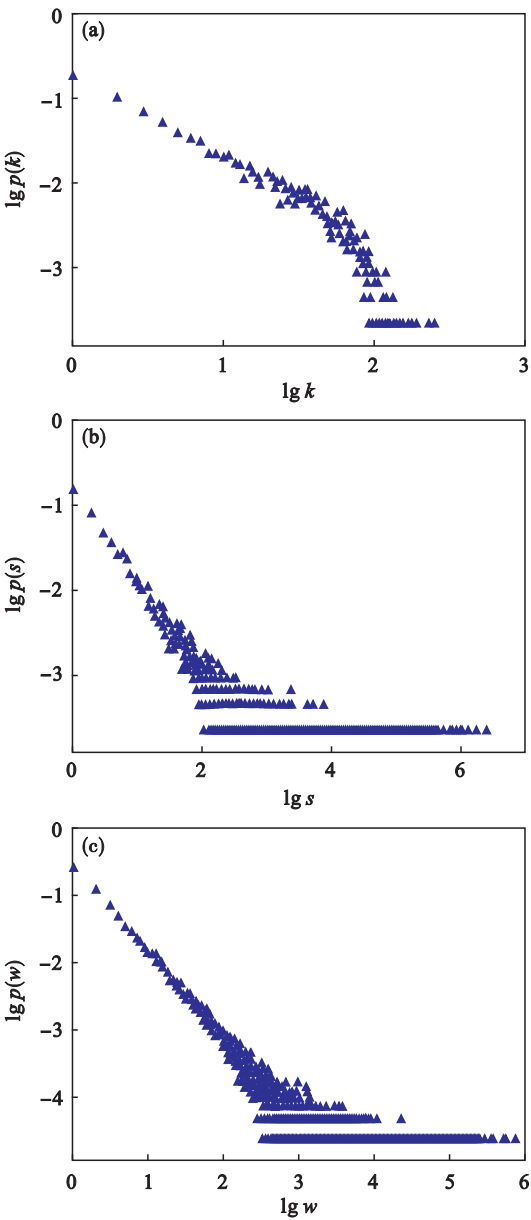


图 3 度分布、点权分布以及边权分布特性
Fig. 3 Node-degree distribution, link-weight distribution and node-weight distributions
(a)一度分布;(b)一点权分布;(c)一边权分布.

3 地震加权网络的无标度特性

分析地震加权网络节点的性质以及节点之间连接的偏好性.

3.1 点权和度的关系

地震加权网络中,节点的度和点权都是判断节点重要性的重要指标,分析两者之间存在什么样的关系对于研究节点在网络中的作用是很有必要的.所有度为 k 的节点的平均点权为 $\langle s(k) \rangle$,图 4 为 k 与 $\langle s(k) \rangle$ 之间的关系.

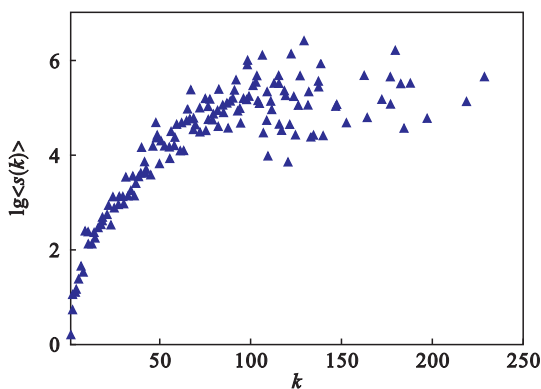


图4 节点度与点权的关系

Fig. 4 Relationship of node-degree and node-weight

在地震加权网络中, k 与 $\langle s(k) \rangle$ 呈现出非线性相关, $k < 100$ 时, $\langle s(k) \rangle$ 随着 k 的增长而增长, 说明节点地区发生过的地震震级越大, 就会与其他地区有更多次的能量传递关系, 导致点权以更快的速度增长; $k \geq 100$ 时, $\langle s(k) \rangle$ 不会继续增加, 会在一定范围内波动. 中强地震是 4.5 ~ 6.0 级的地震, 统计发现, $k \geq 100$ 的节点地区是发生中强地震活跃的地区, 例如度值是 109 的地区虽然没有发生过 6.0 级以上大地震, 但是发生过 7 次中强地震, 是所有地区发生中强地震频数最多的地区. 这些节点地区的点权值与发生过大地震节点地区的点权值差别不大, 这可以解释为相对于大地震, 中强型地震也会引发大量余震与其他地区产生多次地震能量传递, 导致其度值和与其连接的边权增加, 对整个网络的拓扑结构和连接性质产生较大的影响.

3.2 网络的同配性

平均近邻度表现的是节点之间相互连接的偏好性, 是衡量网络节点匹配性的指标^[10]. 在无权重网络中, 节点 i 的平均近邻度定义为

$$k_{nn,i} = \frac{1}{k_i} \sum_{j \in A} k_j. \quad (2)$$

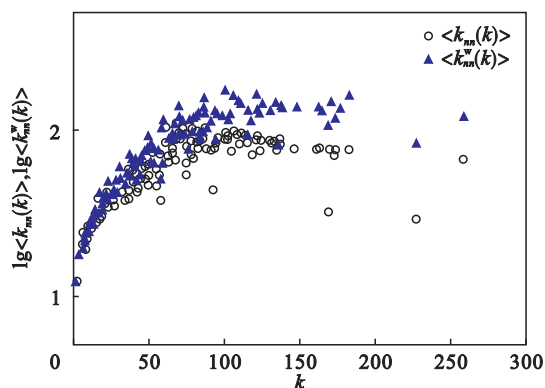
对于加权网络, 节点 i 的平均近邻度定义为

$$k_{nn,i}^w = \frac{1}{s_i} \sum_{j \in A} w_{ij} k_j. \quad (3)$$

度为 k 的所有节点的 k_{nn} 的平均值用 $\langle k_{nn}(k) \rangle$ 来表示, 度为 k 的所有节点的 $k_{nn}^w(k)$ 的平均值用 $\langle k_{nn}^w(k) \rangle$ 来表示. 如果 $\langle k_{nn}(k) \rangle$ 随 k 递增, 则表示度大的节点优先连接别的度大的节点, 网络是同配的; 反之, 如果 $\langle k_{nn}(k) \rangle$ 随 k 递减, 则度大的节点优先连接度小的节点, 则网络是异配的.

图 5 给出了地震加权网络中 k 与 $\langle k_{nn}(k) \rangle$, $\langle k_{nn}^w(k) \rangle$ 的关系. 图 5 可以看出,

存在 $\langle k_{nn}(k) \rangle < \langle k_{nn}^w(k) \rangle$ 的关系, 它表示与节点所连接的各边中, 边权大的边往往连接到度大的邻居节点上. 在 $k < 100$ 的区域, $\langle k_{nn}(k) \rangle$, $\langle k_{nn}^w(k) \rangle$ 均出现上升的趋势, 说明度大的节点倾向于与度大的节点之间产生边权较大的连接, 即强震节点地区 (一般是指度大的节点) 之间可能会更容易产生强连接. 在 $k > 100$ 时, $\langle k_{nn}(k) \rangle$ 出现下降趋势, 而 $\langle k_{nn}^w(k) \rangle$ 几乎保持不变. 究其原因, 一个地区发生了中强地震以后, 其影响力大, 会影响到其他很多地区, 但是这些地区中可能本身不属于地震活跃地区, 只是受大地震影响, 其本身度值并不会发生显著变化, 因此使该地区的平均近邻度的增长速度变慢, 甚至出现下降的现象.

图5 k 与 $\langle k_{nn}(k) \rangle$, $\langle k_{nn}^w(k) \rangle$ 的关系Fig. 5 Relationship of k and $\langle k_{nn}(k) \rangle$, $\langle k_{nn}^w(k) \rangle$

3.3 网络的聚集系数

在无权重网络中, 节点 i 的聚集系数定义如下:

$$c_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}. \quad (4)$$

其中: k_i 为节点 i 的邻居节点的个数; E_i 为节点 i 的邻居节点之间实际存在的边数.

推广到加权网络, 节点 i 的定义如下:

$$c_i^w = \frac{1}{s_i(k_i - 1)} \sum_{j,h \in A} \frac{(w_{ij} + w_{ih})}{2} a_{ij} \cdot a_{ih} \cdot a_{jh}. \quad (5)$$

该定义考虑了三角形中 2 条边权 w_{ij} 和 w_{ih} , 其中, a_{ij}, a_{ih}, a_{jh} 表示节点 i 与邻居节点 j, h 这三个节点之间的连接关系, 存在连接为 1, 不存在连接为 0. $s_i(k_i - 1)$ 为归一化因子, 以确保 $0 \leq c_i^w \leq 1$. 如果所有的权重都相等, 式 (5) 还原为节点的无权网络的式 (4). 度为 k 的所有节点的 c 的平均值用 $\langle c(k) \rangle$ 来表示, 度为 k 的所有节点的 c^w 的平均值用 $\langle c^w(k) \rangle$ 来表示.

图 6 为地震加权网络 k 与 $\langle c(k) \rangle$, $\langle c^w(k) \rangle$ 的关系图. 图 6 中可以看出, $\langle c(k) \rangle < \langle c^w(k) \rangle$, 这表明在节点的邻居节点中, 该节点

的邻居节点中边权较大的节点之间更容易彼此产生强连接. 这可能说明:如果两个节点地区与第三个地区具有强连接,那么这两个地区之间也可能产生强连接,也就是说,那些与主震地区连接紧密的余震地区之间更容易发生强连接. 当 $k > 100$ 时, $\langle c(k) \rangle$, $\langle c^w(k) \rangle$ 开始下降,其原因与平均近邻度在 $k > 100$ 有下降趋势类似,是中强地震发生时影响的地区可能原本不属于地震活跃地区,只是受个别地震影响,与其他地区连接并不紧密,导致该地区聚集系数下降.

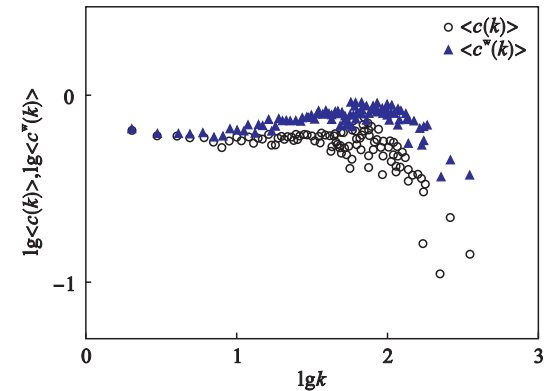


图 6 k 与 $\langle c(k) \rangle$, $\langle c^w(k) \rangle$ 关系
Fig. 6 Relationship of k and $\langle c(k) \rangle$, $\langle c^w(k) \rangle$

4 结 语

1) 区别于无权网络认为所有的边都是无差别的,地震加权网络的边权数值分布范围大且服从幂律分布,节点地区之间的连接具有很强的异质性,强连接占整个网络的比例很小,大多数属于弱连接. 另外,地震加权网络的点权分布、度分布服从幂律分布,地震加权网络具有无标度性质.

2) 为了研究网络节点的连接性质,首先分析点权与度的关系,发现相对于强震和大地震,中强地震对网络性质的影响也同样较强. 然后通过计算地震网络的平均近邻度和聚集系数,发现强震地区之间可能更容易发生强连接,并且如果两个地区与第三个地区具有强连接,那么这两个地区之间也可能产生强连接.

3) 使用中国南北地震带的数据进行试验,也能得到同样的地震活动规律. 后续工作是将该分析方法应用到更多地区,以检验该方法的有效性和普适性.

参考文献:

[1] D' Hour V, Schimmel M, Nascimento A F D, et al. Detection of subtle hydromechanical medium changes caused by a small-magnitude earthquake swarm in NE Brazil [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2016, 173(4): 1097 - 1113.

[2] Barrière L, Comellas F, Dalfó C, et al. Hierarchical organization in complex networks [J]. *Recercat Home*, 2015, 362(1): 39 - 66.

[3] 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.)

[4] Abe S, Suzuki N. Small-world structure of earthquake network [J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2004, 337: 357 - 362.

[5] Abe S, Suzuki N. Dynamical evolution of the community structure of complex earthquake network [J]. *Europhysics Letters*, 2012, 99(3): 313 - 316.

[6] 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. Construction method based on space-time influence domain for earthquake network [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(10): 1395 - 1399.)

[7] He X, Zhao H, Cai W, et al. Analyzing the structure of earthquake network by k-core decomposition [J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2015, 421: 34 - 43.

[8] Zhang Y, Zhao H, He X, et al. Bayesian prediction of earthquake network based on space-time influence domain [J]. *Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications*, 2016, 445: 138 - 149.

[9] Abe S, Suzuki N. Determination of the scale of coarse graining in earthquake networks [J]. *Europhysics Letters*, 2009, 87(4): 48008 - 48012.

[10] Stienmetz J L, Fesenmaier D R. Estimating value in Baltimore, Maryland: an attractions network analysis [J]. *Tourism Management*, 2015, 50: 238 - 252.