

基于 OFC 的仿真地震序列网络化特征对比分析

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: OFC 模型通过模拟地震能量传递行为来认识地震的活动规律. 为更加真实反映地震发生时的能量传递, 用 1992 年美国加利福尼亚州地震数据抽象成的时空域网络替换传统二维规则网络 OFC 模型的底层网络. 为了解仿真地震序列是否与真实地震数据具有相似性, 将仿真地震序列网络化, 与真实地震网络对比累积度分布的趋势, 由此判断是否改进后的网络更接近真实地震网络. 实验结果表明, 时空域网络 OFC 模型产生的仿真地震序列和真实地震数据在宏观网络拓扑上具有一致性.

关 键 词: 复杂网络; 地震网络; OFC 模型; 地震序列; 网络拓扑特征

中图分类号: TP 393.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)02-0205-05

Comparison Analysis of Network Characteristics of OFC-based Simulated Earthquake Sequences

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: The Olami Feder Christensen (OFC) model shows the law of earthquake activities by simulating the earthquake energy transfer behavior. In order to truly describe the earthquake energy transfer, the underlying network of the OFC model of regular two-dimensional network is replaced by the real time-space domain network extracted from the California earthquake data in 1992. The simulated earthquake sequence is constructed by the improved OFC model to find the similarity between the simulated earthquake sequence and real earthquake data. Whether the improved simulated network is closer to the real network is determined through comparing the cumulative degree distribution trend of the two networks. The experimental results show that, in terms of macro network topology, the simulated earthquake sequences are consistent with the real earthquake data.

Key words: complex network; earthquake network; OFC model; earthquake sequence; network topology characteristic

对地震活动规律的研究一直是全世界研究的重要课题,各个领域的学者试图通过自己的专业知识来认识地震活动的本质规律.一些研究工
作发现,地震事件的发生是非随机和非独立的,具
有一定规律性,不同地震事件之间具有复杂的相
互关联和相互作用,因此从整体角度来研究地震
活动是很有必要的.

地震活动规律难以掌握的根本原因在于,地
震系统本身是一个复杂系统,地震活动往往表现
出复杂的系统动力学行为^[1].2004 年日本学者
Abe 等在研究美国南加州地区的地震活动时首
先将分析复杂网络的方法引入到地震活动研究
中,其将历史地震数据通过一定的方法抽象成网
络^[2],定义为地震网络^[3],然后通过研究网络
的拓朴性质就可以对大量的历史地震数据进行
综合研究,这种结合统计学与复杂网络理论技
术的网络化思维为认识地震活动本质规律提供
了一种新的尝试.地震学者发现地震活动表现
出一定的时

空相关性,所以仅仅从时间或空间角度来考虑地震活动之间的关系显然是不够的,因此本课题组提出了一种基于时空影响域的地震网络构造方法^[4],本文也将采用这种方法来构造地震网络。

系统的自组织临界性研究在各个学科取得了一些重要成果,科学家研究发现地震系统也呈现出自组织临界性。当地球上某处发生地震时,该处的能量就通过地震波和其他的形式释放出来,并通过介质传播到周围环境中。基于这种现实,1992年,Olami, Feder 和 Christensen 提出了一种基于二维规则网络的 OFC 模型(简称 2D - OFC 模型),它是关于自组织临界性地震模型研究中的一个非常著名的模型^[5],是对经典的 BK 弹簧块模型的简化。研究发现,复杂网络表现出小世界特性^[2],Ferreira 等曾将 2D - OFC 模型的底层网络替换成类小世界网络,发现类小世界网络的 OFC 模型更接近真实地震网络^[6]。因此,运用复杂网络理论结合地震系统的自组织临界性知识对地震现象进行研究,是当今研究认识地震活动规律性的一个新趋势。

本课题组提出的时空影响域网络构造方法同时考虑了地震事件之间的时间和空间关系,相对于类小世界网络更接近真实的地震网络,所以本文将 2D - OFC 模型的底层网络替换成时空域网络,试图找到一种能模拟真实地震发生规律的 OFC 模型(简称 TS - OFC 模型),用该模型产生的仿真地震序列替代真实地震数据进行分析,这为地震预测提供了一种新的可能。

1 OFC 模型

2D - OFC 模型的底层网络拓扑是二维规则

网络,网络中的每个节点代表一个板块或者地震单元,每条边代表板块之间的相互联系。开始时,每个节点赋予一个 $0 \sim F_{th}$ 之间的随机能量值, F_{th} 表示阈值。网络规模为 L 时,整个网络中有 $L \times L$ 个节点。图 1 所示为网络规模 $L = 5$ 时的 OFC 模型。

为了描述地壳运动导致的板块累积能量的变化,所有板块累积的能量都应同时增加;因此使网络中每个节点的能量值缓慢均匀增加,一直到其中一个节点能量值达到阈值,此时该节点变得不稳定(倒塌),认为这时一次地震开始发生。

节点的能量传递按如下规则:

$$\left. \begin{aligned} F_{n,n} &\rightarrow F_{n,n} + \alpha F_{i,j}, \\ F_{i,j} &\rightarrow 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $F_{n,n}$ 表示节点 $F_{i,j}$ 上、下、左、右 4 个邻居节点; α 表示耗散参数,在此二维规则网络 OFC 模型中,当 $0 < \alpha < 0.25$ 时,认为系统是耗散的,当 $\alpha = 0.25$ 时认为系统是守恒的。举例描述 OFC 模型中节点的能量传递过程,如图 1a,图 1b 所示:由于能量的积累, $F_{3,3}$ 节点能量达到了阈值,所以该节点会按照比例 α 将能量分配给其上、下、左、右 4 个邻居节点,而 $F_{3,3}$ 节点的能量为 0。如果因为 $F_{3,3}$ 节点的能量传递导致其 4 个邻居节点的能量值超过阈值,那么这些节点也将按此分配规则进行能量传递。如图 1c 所示,由于 $F_{3,3}$ 节点的能量传递导致 $F_{3,4}$ 节点的能量也达到了阈值,那么 $F_{3,4}$ 节点也会按照能量传递规则进行能量传递。当所有节点的能量值都在阈值以下时,就认为此次地震结束。当一次地震结束时,再使所有节点的能量缓慢均匀增加,让系统的演化持续进行下去,这样系统在演化过程中就可以形成一系列大小不一的地震。

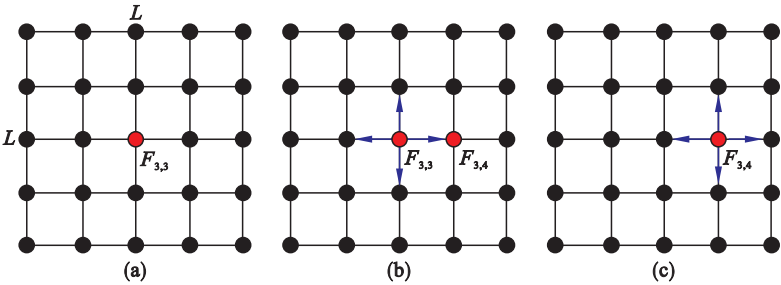


图 1 二维规则网络 OFC 模型能量传递过程
Fig. 1 Energy transfer of 2D-OFC model

复杂网络具有无标度和小世界特性^[5], Ferreira 等已经证明了类小世界的 OFC 模型比 2D - OFC 模型更接近真实地震网络,但是类小世界网络模型并不能很好地表示真实地震事件之间

的时空相关性。针对这一特点,本文将二维规则网络替换成时空域网络(去掉自连边、重复边,并简化成无向图拓扑结构),希望改进后的 OFC 模型,即 TS - OFC 模型更加接近真实地震网络,以便

发现能否用仿真地震序列替代真实地震数据;若二者具有相似性,便可以通过分析仿真地震序列研究地震发生规律.

由于时空域网络具有无标度特性,网络中的每个节点的邻居节点数量不同,因此必须修改能量传递公式:

$$\left. \begin{aligned} F_{n,n} &\rightarrow F_{n,n} + \beta \frac{1}{N_{\text{adj}}} F_{i,j}, \\ F_{i,j} &\rightarrow 0. \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

式中: $F_{n,n}$ 为节点 $F_{i,j}$ 的所有邻居节点; β 为耗散参数, $0 < \beta \leq 1$; N_{adj} 为节点 $F_{i,j}$ 的邻居节点数量.

2 仿真地震序列

在 OFC 模型中,节点能量达到临界值时该节点变得不稳定,这时地震开始发生.节点崩塌,其能量会按照一定规则传递给其邻居节点.由于能量的传递,会发生震级、影响范围、持续时间不同的一系列地震.

本文主要用到 3 个参数 Count, Spot, Update^[7-9],定义如下:

Count:在一次地震过程中,节点发生倒塌的次数,称为倒塌规模.

Spot:在一次地震过程中,发生倒塌的节点数量.

Update:在一次地震过程中,能量状态发生改变的节点数量.

这 3 个参数分别模拟真实地震数据的震级、地震的影响范围、地震持续时间.表 1、表 2 分别是 2D - OFC 模型和 TS - OFC 模型的仿真地震序列.因 2D - OFC 模型和 TS - OFC 模型的底层网络不同,所以地震序列的各个字段含义也有区别.仿真地震序列中的时间字段都是由 Update 累加得来,倒塌规模代表的是 Count 值,模拟的是地震震级大小.

表 1 2D - OFC 模型的仿真地震序列

Table 1 Simulated earthquake sequence generated by the 2D-OFC model

编号	Update	行	列	Count
58F90	15	58	90	3
36F31	20	36	31	1
86F43	30	86	43	2

注:行、列是节点在二维规则网格中的位置.

3 网络特征对比分析

仿真地震序列是由 OFC 模型生成的,序列与

真实地震数据代表的含义不同,无法通过对比数据直接判断出仿真地震序列与真实地震数据是否具有相似性;因此通过宏观网络拓扑特征进行判断,将累积度分布趋势作为评价网络相似性的标准^[6].若仿真地震序列网络与真实地震数据网络具有相似性^[6],那么有理由认为 OFC 模型产生的仿真地震序列与真实地震数据存在相似性,这样可以利用仿真地震序列来替代分析真实地震数据,为地震预测提供了可能.

表 2 TS - OFC 模型的仿真地震序列

Table 2 Simulated earthquake sequence generated by the TS-OFC model

编号	Update	LatID	LonID	Count
7F38	8	7	38	3
12F20	9	12	20	1
20F30	77	20	30	4

注:LatID 和 LonID 是真实地震位置的经纬度.

3.1 OFC 模型参数之间的关系

时空影响域网络构造方法同时考虑了时间和空间因素,本文采用该方法构造网络.若想利用时空影响域网络构造方法将仿真地震序列抽象成网络,必须计算出每个节点发生地震时的时间影响域和空间影响域.因为 Count 模拟震级,Spot 模拟地震的影响范围,Update 模拟地震持续时间,所以研究 Count 与 Spot 关系,以及 Count 与 Update 关系是计算时空域的关键.接下来分别研究 2D - OFC 模型和 TS - OFC 模型的 Count 与 Spot 之间的关系和 Count 与 Update 之间的关系.定义参数 N 为模拟的地震次数,本文取 $N = 100\,000$,时空域网络 OFC 模型的底层网络是根据 1992 年美国加州地震数据 (http://service.scedc.caltech.edu/eq-catalogs/date_mag_loc.php) 构造的时空域网络.实验发现,两种模型的空间影响域和时间影响域关系如式(3) ~ 式(6)所示:

$$L_{2D} = 0.997M + 0.003 ; \quad (3)$$

$$T_{2D} = 4.991M - 0.006 ; \quad (4)$$

$$L_{TS} = 0.752M + 0.329 ; \quad (5)$$

$$T_{TS} = 14.898\,1M - 11.293 . \quad (6)$$

式中: M 为震级,在该时空域网络中对应的是 Count; L 和 T 分别是对应震级产生的空间影响域和时间影响域.

3.2 仿真地震序列与真实地震数据网络化对比

因底层网络不同,OFC 模型会产生两种仿真地震序列,运用时空域网络构造方法将两种仿真地震序列抽象成网络.为简单起见,用 N1 和 N2 分别代表由 2D - OFC 模型和 TS - OFC 模型产

生的仿真地震序列抽象得到的时空域网络. 本文试图找到能更加准确模拟真实地震发生的模型, 所以将 N1、N2 与真实地震时空域网络进行对比, 若其中某种网络与真实地震时空域网络相似, 可以认为其仿真地震序列与真实地震数据具有相似性, 可以替代真实地震数据进行分析. 接下来, 从累积度分布趋势方面进行对比, 判断哪个网络与真实地震网络更相似.

本文用一种归属 Tsallis 的 q -Gaussian 分布来拟合累积度分布, 其数学形式为

$$f(x) = A[1 - B(1 - q)\omega x^2]^{1/(1-q)}. \quad (7)$$

其中 A, B, q, ω 为常量. 本文对真实地震网络、N1 和 N2 作了累积度分布的分析, 并用 q -Gaussian 分布对累积度分布进行拟合.

真实地震网络是 1992 年美国加州数据的时空域网络, 其累积度分布拟合结果如图 2 所示. 真实地震网络的累积度分布趋势能较好地符合 q -Gaussian 分布, 拟合优度 R 为 0.989 95, q 指数为 2.827. 大约在度值 $k > 60$ 之后, 累积度分布趋势发生了末端偏转现象.

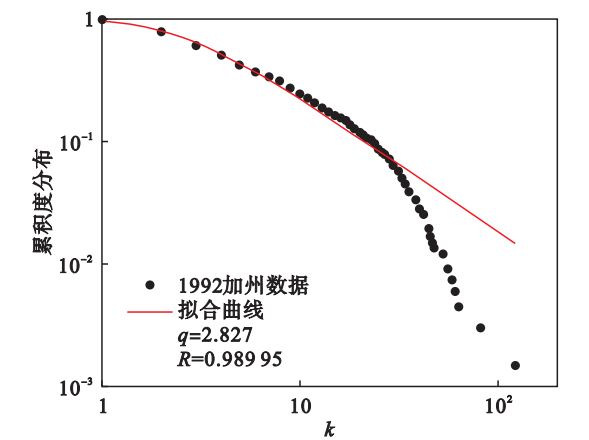


图 2 真实地震网络节点的累积度分布
Fig. 2 Cumulative degree distribution of the nodes in the real earthquake network

首先, 对比 N1 与真实地震时空域网络的累积度分布趋势是否相似. 实验发现, α 取 0.248 时拟合优度较高. 图 3a 是 α 取 0.248 时累积度分布结果. 从图 3a 可以看出, 耗散参数 α 取 0.248, 其累积度 q 指数是 2.685, 拟合优度小于 0.8, 并且累积度分布在一定的范围内出现凹陷现象, 使得累积度分布趋势不能很好地符合 q -Gaussian 分布. 所以, 本文认为利用 2D-OFC 模型产生的仿真地震序列构造的时空域网络与真实的时空域网络的累积度分布情况不同, 因此, 有理由相信 N1 与真实地震时空域网络相似性较小, 也就是 2D-OFC 模型产生的仿真地震序列与真实地震数据

相似性较小.

接下来, 对比 N2 与真实地震时空域网络的累积度分布趋势是否相似. 实验发现, 在耗散情况下, β 取 0.6 时其拟合优度较高. 图 3b 是 β 取 0.6 时累积度分布结果. 从图 3b 中可以看出, 当 β 取 0.6 时其 q 指数为 1.093, 拟合优度为 0.998 65, 该时空域网络的累积度分布能较好地符合 q -Gaussian 分布, 并且该网络的累积度分布趋势均出现不同程度的末端偏转现象, 这与真实的时空域网络累积度分布情况一致. 所以, 本文认为利用 TS-OFC 模型产生的仿真地震序列构造的时空域网络与真实的时空域网络的累积度分布情况相似, 因此, 有理由相信 N2 与真实地震时空域网络相似性较大, 也就是时空影响域网络 OFC 模型产生的仿真地震序列与真实地震数据相似性较大.

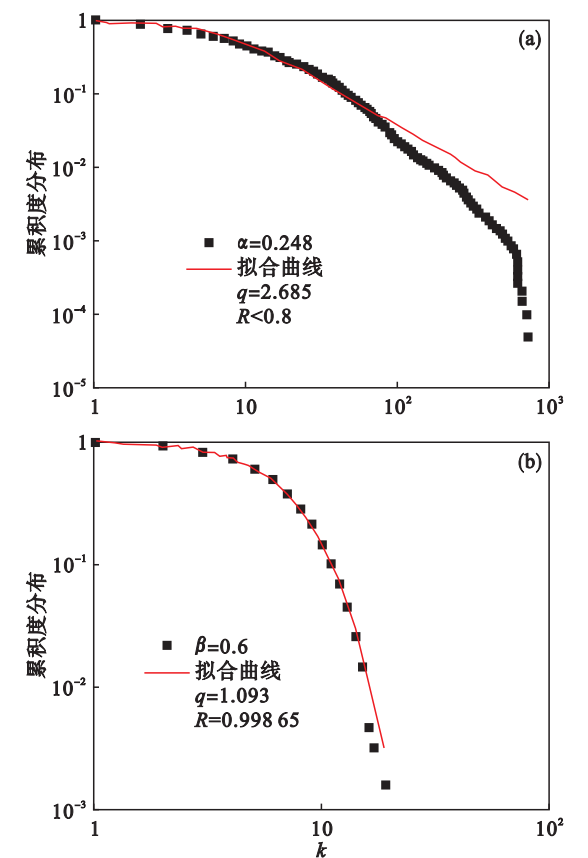


图 3 模拟地震网络节点的累积度分布
Fig. 3 Cumulative degree distribution of the nodes in the simulated earthquake networks
(a)—N1 网络; (b)—N2 网络.

4 结 语

本文根据真实地震发生情况, 对 2D-OFC 模型进行了改进, 改进后的 OFC 模型的底层网络是由真实地震数据抽象得到的时空域网络. 通过 (下转第 223 页)