

# 复杂网络中心性对灾害蔓延的影响\*

李泽荃<sup>1)†</sup> 张瑞新<sup>1)2)</sup> 杨墨<sup>1)</sup> 赵红泽<sup>1)</sup> 于健浩<sup>1)</sup>

1) (中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

2) (国家安全生产监督管理总局通信信息中心, 北京 100013)

(2012年4月28日收到; 2012年6月18日收到修改稿)

基于一个普适性的灾害蔓延动力学模型, 在三种网络拓扑结构(随机网、小世界网和无标度网)下, 仿真分析了网络中心性对灾害蔓延速度和扩散趋势的影响. 通过改变初始蔓延条件来分析网络初始状态对蔓延效率的影响, 并着重讨论了在四种初始崩溃节点选取策略下灾害蔓延最终状态的差异. 结果表明: 对于四种攻击策略, 网络最终状态有着明显的差异, 网络对随机攻击具有较强的抵御能力, 而对于目标, 攻击却显示较强的脆弱性, 或许, 三种网络表现出不同的脆弱程度. 最后, 在一个实际网络上对理论分析结果进行了验证.

**关键词:** 复杂网络, 灾害蔓延, 网络中心性

**PACS:** 89.75.-k, 05.10.-a

## 1 引言

复杂网络是近年来出现的一个新的研究方向, 特别是在1998年Watts和Strogatz发现“小世界网络”<sup>[1]</sup>和1999年Barabasi和Albert发现“无标度网络”<sup>[2]</sup>以来, 复杂网络的研究吸引了一大批学者. 并且复杂网络的研究已经渗透到物理学、岩石力学、信息学、生物学、神经学、灾害学、经济学及社会学等各个领域<sup>[3-12]</sup>. 真实世界中存在的大量复杂系统都可以通过网络来描述, 这些网络由许多节点与连接两节点的边所组成, 其中节点用来表示组成真实系统中的个体, 而节点间的边用来表示个体间的关系.

灾害事件严重地危害人类生命财产和生存条件, 给人类社会造成巨大的冲击. 随着复杂网络研究的深入, 为建立灾害系统及蔓延普适性模型提供了思路. 虽然灾害事件经常是突发性的, 但大部分的灾害事件具有一些共性特征: 一个微小扰动能造成整个系统(网络)的连锁反应, 从而导致系统中的大部分产生崩溃<sup>[10,13-15]</sup>.

然而到目前为止, 关于复杂网络上灾害蔓延的研究不多. 根据灾害系统及灾害动力学的特征, Buzna等<sup>[10]</sup>建立了灾害蔓延的普适性动力学模型, 这个模型考虑了网络节点的自修复功能、灾害蔓延机理和内部随机噪声, 通过仿真分析认为在灾害蔓延过程中存在相变, 即存在一个传播临界值, 这个临界值的大小与节点参数及网络拓扑结构有关系, 并且讨论了节点自失效时网络的鲁棒性. 翁文国等<sup>[14]</sup>对网络在随机扰动下的灾害蔓延进行了分析, 研究了自修复因子、延迟时间因子和噪声强度三个参数对三种网络(随机网络、无标度网络和小世界网络)节点修复率和崩溃节点数的影响. 欧阳敏等<sup>[16]</sup>介绍了几种已存在的复杂网络上的灾害蔓延模型, 并对各模型进行了优缺点评价, 给出了一种存在冗余系统的改进模型, 最后在不同的网络结构下, 仿真分析了灾害蔓延过程的差异以及修复因子的影响, 认为大规模灾害事件很少发生的原因是系统中存在冗余. Buzna等<sup>[17]</sup>分析了随机攻击下灾害蔓延的各种有效应急策略, 认为初始节点所受扰动会持续一段时间, 在此期间分配给它的资源没有发挥作用, 得到了无标度网络下在任意节点受到

\* 国家自然科学基金(批准号: 91024029)资助的课题.

† E-mail: lzquancumtb@126.com

扰动时, 灾害得以控制所需要的最少资源数量随应急时间增加而减少的结论. 张振文等<sup>[15]</sup>对无标度网络中灾害蔓延的应急响应进行了分析, 提出使用应急响应时间和资源数量的调用曲线来描述外部资源的调用, 为分配资源, 根据网络的拓扑结构和灾害的蔓延现状制定了不同的应急策略.

当网络中某些节点受到攻击时, 节点发挥自我修复功能或灾害蔓延机理, 随着时间演化, 网络最终会产生不同状态. 文献[14]中复杂网络受到外界冲击的网络节点是随机选取的, 这样选取的节点不能完全体现网络的实际情况, 存在一定的局限性. 而网络中节点所处的状态不同, 攻击不同的节点, 会有不同的效果. 为考察网络的初始状态对灾害传播的影响, 本文选取了四种不同初始状态, 即通过选取不同的节点进行攻击, 分别为随机选取网络节点和选择网络的三种中心节点作为初始传播节点, 对比网络中传播过程和最终状态, 为保证初始节点的随机性, 本文对随机选取初始节点的网络进行一个多次取平均值的办法.

本文将关注关键节点(度中心度最大点、紧密中心度最大点或介数中心度最大点)受到攻击时灾害网络传播的动力学特征. 具体组织如下: 第2节介绍了一个普适性的灾害蔓延动力学模型; 第3节介绍了本文仿真模拟中将用到的三种网络的结构特性及网络中心性; 在第4节中通过选取不同类型的节点进行攻击, 然后对三种网络进行仿真模拟, 并对模拟结果进行分析; 在第5节中, 选了一个符合无标度特性的实际网络对理论分析结果进行了验证; 在第6节中, 提出了一些重要的结论.

## 2 灾害蔓延动力学模型

考虑一个有向网络  $G = (N, S)$ , 其中包含节点  $i \in N := \{1, 2, \dots, n\}$  和边  $(i, j) \in N \times N$ , 分别代表系统的节点和各节点之间的相互关系. 每个节点的属性值用  $x_i$  表示, 当  $x_i = 0$  时表示该节点处于稳定状态; 反之, 当  $x_i$  偏离零时表明该节点产生崩溃. 自然界系统都存在着自我修复功能和灾害蔓延机理. 自我修复功能是指当节点产生崩溃时, 随着时间的推移, 有些节点能自我修复. 灾害蔓延机理是指当某个或者某些节点出现崩溃时, 灾害会在网络上进行传播蔓延, 直至大部分网络节点产生崩溃. 以属性值表示就是假设开始时刻  $x_i$  有个小

扰动, 但随着时间进程, 节点发挥自我修复功能或灾害蔓延机理,  $x_i$  会趋向于零或者网络中大部分节点的属性值趋向于无穷<sup>[14]</sup>. 因此, 对于节点的时间演化动力学公式可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\frac{dx_i}{dt} = -\frac{x_i}{\tau} + \Theta(x_i) \left( \sum_{j \neq i} \frac{M_{ij} x_j (t - t_{ij})}{f(o_i)} e^{-\beta t_{ij}/\tau} \right) + \xi_i(t), \quad (1)$$

$$\Theta(x_i) = \frac{1 - \exp(-\alpha x_i)}{1 + \exp(-\alpha(x_i - \theta_i(t)))}, \quad (2)$$

$$f(o_i) = \frac{a o_i}{1 + b o_i}, \quad (3)$$

该动力学方程有三个部分组成. (1) 式等号右边第一项表示节点的自我修复功能, 第二项表示节点的灾害蔓延机理, 第三项表示节点的内部随机噪声;  $1/\tau$  表示节点的自我修复速度;  $M_{ij}$  表示节点  $i$  对节点  $j$  的影响程度;  $t_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的影响延迟时间;  $\beta$  表示传播过程中的阻尼作用. (2) 式为  $S$  型函数,  $\alpha$  为定值,  $\theta_i$  为节点  $i$  的阈值. (3) 式为节点  $i$  的出度函数,  $o_i$  表示节点  $i$  的出度值, 出度函数反映的是节点  $i$  对其他节点的影响程度, 其中  $a$  和  $b$  为定值.

## 3 网络演化模型及网络中心性

### 3.1 网络演化模型

本文在模拟计算中考虑三种理想的网络拓扑结构: 随机网络、无标度网络和小世界网络. 这三种网络均为有向网络, 节点数都为 100, 平均度为 3.5. 网络具体的生成参数如下.

1) 随机网络: 采用典型的 ER 模型, 即随机产生  $N$  个节点, 每个节点与其他节点建立连接的概率为  $p = 2n/N(N-1)$  (其中  $n$  是给定的总边数). 用 Pajek 软件产生该网络.

2) 无标度网络: 采用优先连接的方法产生, 即在网络增长中, 边所连接的两个节点是在所有的节点中以某个概率来选择, 该概率的大小可表示为<sup>[18]</sup>

$$\Pr(v) = \alpha \frac{\text{in deg}(v)}{|E|} + \beta \frac{\text{out deg}(v)}{|E|} + \gamma \frac{1}{|v|}, \quad (4)$$

其中,  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  都为常数, 且  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ;  $\text{indeg}(v)$  和  $\text{outdeg}(v)$  分别为节点  $v$  的入度和出度;  $|E|$  为网

络总的边数;  $|v|$  为节点数. 同样采用 Pajek 软件产生无标度网络, 首先产生一个 100 个节点的 ER 随机网络, 线连接概率设为 0.3, 之后分别设参数  $\alpha, \beta$  为 0.3 和 0.23 进行依附连接.

3) 小世界网络: 首先产生一个无向规则网络, 然后将无向边设置成有向边, 其方向包括顺时针、逆时针和双向, 比例分别为 0.45、0.45 和 0.1, 最后以概率 0.3 随机重新连接该网络.

### 3.2 网络中心性描述

中心性指采用定量方法对每个节点处于网络中心地位的程度进行刻画, 从而描述整个网络的核心<sup>[19]</sup>. 通常对网络中个体的中心度测量采用三个指标, 即度中心度、紧密中心度和介数中心度.

1) 度中心度: 网络中度最大的节点就是中心点, 体现该节点与其周围节点之间建立直接联系的能力.

2) 紧密中心度: 依据测量网络中各节点之间的距离而得, 表达的是节点到达其他节点所需要的最少连接; 紧密中心点是所有其他节点到此节点总距离最小(总边数最少)的节点, 该节点是网络的拓扑中心, 但并不一定度最大.

3) 介数中心度: 该中心点是信息、物质或能量在网络上传输时负载最重的节点, 即介数(经过此点的测地线条数)最大的节点; 它并不一定度最大, 也不一定是网络的拓扑中心. 从概念上来说, 介数可以理解通过网络上通过所关心节点或者边的流通量<sup>[20]</sup>.

## 4 仿真结果与分析

在仿真之前, 首先采用 Pajek 软件计算三种网络的中心度节点. 在仿真时, 在初始三种网络中分别按照一定策略选择一个目标节点  $i$ , 并且设该节点的状态为大于零的小量, 本文赋值为 0.5. 四种具体的攻击策略如下: ①随机选取目标节点(A); ②选取度中心度最大点(B); ③选取紧密中心度最大点(C); ④选取介数中心度最大点(D). 依据(1)式建立的模型, 重点考察关键节点崩溃对灾害蔓延的影响. 网络模拟过程中, 假设自修复因子  $\tau$  为  $\chi^2$  分布, 其均值和方差均为 2; 延迟时间因子  $t_{ij}$  为

常数 2; 内部随机噪声  $\xi_i$  为正态分布, 其均值为 0, 方差为 0.01. 本文将三种网络都视为同质网络, 即设  $M_{ij}$  为常数 0.5. 其他参数的假设如下:  $\alpha = 10, \beta = 0.01, a = 1, b = 10$ . 为了保证仿真精度, 随机节点的仿真模拟 10 次, 以确定崩溃节点数的平均值.

### 4.1 网络中心性角度

图 1 至图 3 分别描述的是在随机网络、小世界网络和无标度网络上基于上述四种策略的灾害蔓延演化结果, 纵坐标为网络中崩溃节点数, 横坐标为灾害演化时间. 所有的崩溃节点数的增加曲线呈现“S”形增长, 最后趋于某种平衡状态, 即达到崩溃节点数的最大值. 从图 1 可以看出, 在随机网

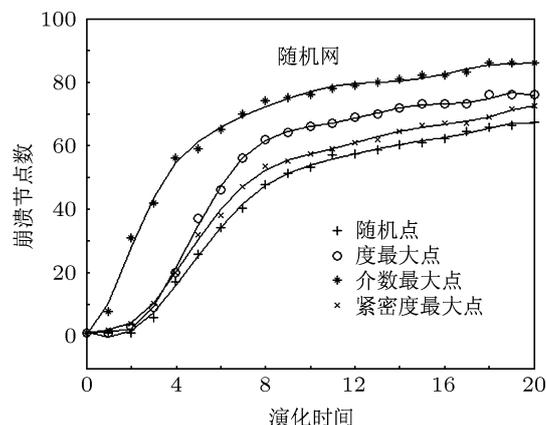


图 1 随机网下灾害蔓延过程(考虑了四种初始破坏节点: 随机点、度最大点、紧密度最大点和介数最大点;  $\theta_{ij} = 0.5, M_{ij} = 0.5$ ; 初始扰动量 0.5)

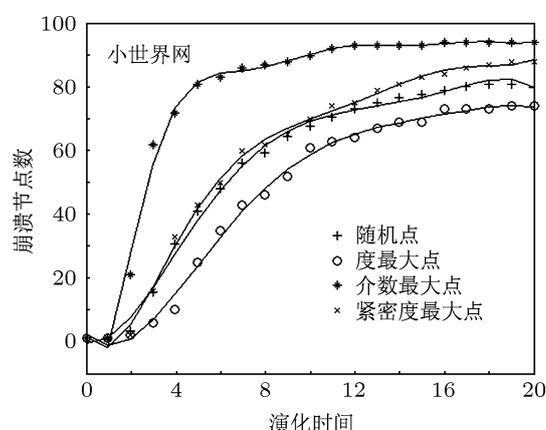


图 2 小世界网下灾害蔓延过程(考虑了四种初始破坏节点: 随机点、度最大点、紧密度最大点和介数最大点;  $\theta_{ij} = 0.5, M_{ij} = 0.5$ ; 初始扰动量 0.5)

下网络中介数最大的节点破坏后,节点的崩溃速度较快,崩溃节点数在最短的时间内达到较大值,而且随着时间的增长,最后崩溃的节点数也最大;在该网络下,节点度最大的节点比紧密度最大的节点对网络的影响较大,而随机选取初始破坏节点对网络的影响最小,在该策略下最终崩溃节点的数目最少.网络脆弱性排序如下: $D \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ .图2中,同样在小世界网下,网络中介数最大的节点破坏后,崩溃节点数在最短的时间内达到较大值,而且最终的崩溃节点数也最大;随机选取和选取紧密度最大初始崩溃节点对网络的影响基本一致,而在该网络下,选取节点度最大的节点进行灾害演化时,崩溃节点数的增加速度最小,平衡时的崩溃节点数也最少.网络脆弱性排序如下: $D \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B$ .图3中,在无标度网下,四种攻击策略对灾害传播的影响程度(网络脆弱性)顺序从高到低为: $D \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ ,与随机网相似,但四种策略对网络的影响差异较大,选取介数最大点作为初始崩溃节点这种策略下,网络中基本所有的节点产生崩溃,相反随机选取节点时,网络中只有少量的节点崩溃.

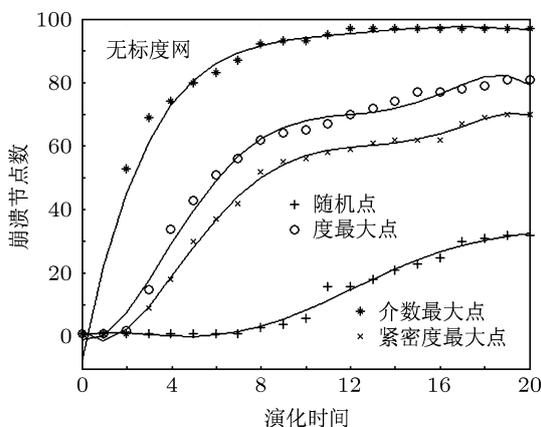


图3 无标度网下灾害蔓延过程(考虑了四种初始破坏节点:随机点、度最大点、紧密度最大点和介数最大点; $\theta_{ij} = 0.5, M_{ij} = 0.5$ ;初始扰动量0.5)

从以上分析可以看出,三种网络中选取关键节点作为初始扰动节点比随机选取节点对网络的影响程度更深.因为拓扑结构的不同,网络中节点表现出的性质也不一样.而介数最大节点破坏后对网络造成的影响远比其他三种节点大,可以看出,在三种网络中选取该类节点进行攻击,在灾害蔓延过程中,崩溃节点数的增长最快,最终的崩溃节点数也最多,特别在无标度网下,网络中95%的节点产生崩溃.由于介数是表征网络最短路径的量,因此

该节点破坏,网络上特征路径长度与直径将遭受很大影响,在很大程度上改变了网络结构及功能.

要彻底阻断灾害在网络上的蔓延就是寻找阻止灾害进一步扩散的关键节点——中枢节点,通过以上的模拟情况可以给我们很好的启示和思考,在复杂网络中,连通度大的节点往往是信息流通的中枢节点,如介数和紧密度较大的节点,而且可以看出,复杂网络对随机攻击具有较强的抵御能力,而对目标攻击却显示出较大的脆弱性.据统计,只要将网络少量的拥有高连接度的中心节点(不超过5%的节点)进行攻击,可以导致整个网络陷入瘫痪状态.反之,对灾害进行阻断时,可以采用以上分析结果进行目标恶意攻击.

### 4.2 网络拓扑结构角度

我们采用上面的仿真数据从网络拓扑结构方面来考虑何种初始攻击最有效.图4至图7分别描述的是在三种网络状态下采用不同的初始攻击方式表现出的网络最终状态,纵坐标为网络中崩溃节点数,横坐标为灾害演化时间.

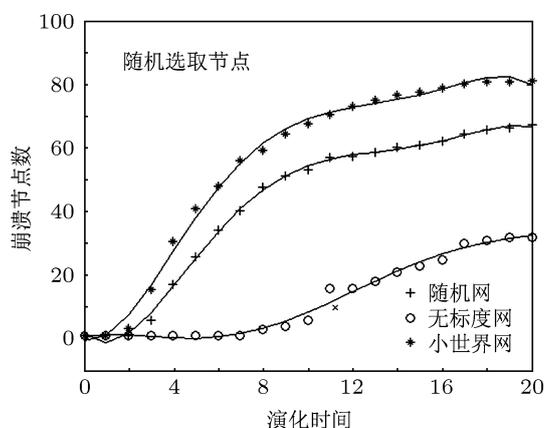


图4 随机选取初始攻击节点时灾害蔓延过程(考虑了三种拓扑结构:随机网、无标度网和小世界网; $\theta_{ij} = 0.5, M_{ij} = 0.5$ ;初始扰动量0.5)

图4为在随机网、无标度网和小世界网上随机选取初始崩溃节点进行灾害蔓延模拟的结果.可以看出,随机网和小世界网下最后的崩溃节点数远比在无标度网下大很多,无标度网下仅仅有30%的节点产生崩溃,而且崩溃的临界时刻相对于其他两种网络有明显的延迟现象.以上结果也验证了无标度网的极度不均匀性,即少数节点有很高的度,而大部分节点度很小,或者说,少数节点占用了绝大部分的网络连通度.

图 5 为在随机网、无标度网和小世界网上选取节点度最大的节点作为初始崩溃节点进行灾害蔓延模拟的结果. 从图可以看出, 三种网络在崩溃的临界时刻及最后的崩溃状态基本表现出同样的结果. 或者可以认为, 在随机网、无标度网和小世界网上选取节点度最大的节点进行牵制控制时并没有明显差别.

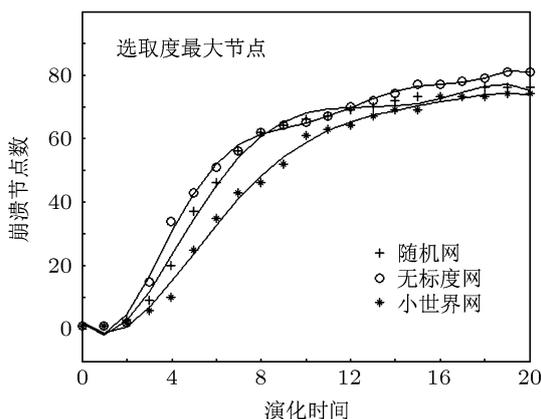


图 5 选取度最大节点为初始攻击节点时灾害蔓延过程 (考虑了三种拓扑结构: 随机网、无标度网和小世界网;  $\theta_{ij} = 0.5, M_{ij} = 0.5$ ; 初始扰动量 0.5)

图 6 为在随机网、无标度网和小世界网上选取节点紧密度最大的节点作为初始崩溃节点进行灾害蔓延模拟的仿真结果. 我们发现, 和小世界网相比, 随机网和无标度网下最后的崩溃节点数较少, 而且小世界网上, 近 90% 的节点产生崩溃. 紧密度中心点描述的是其他节点到此点总距离最小的节点, 而小世界网络具有较小的平均最短路径长度和较大的群集系数, 可以看出, 紧密度中心点在小世界网上占有较高的连通度, 这种现象在该图中得到了验证.

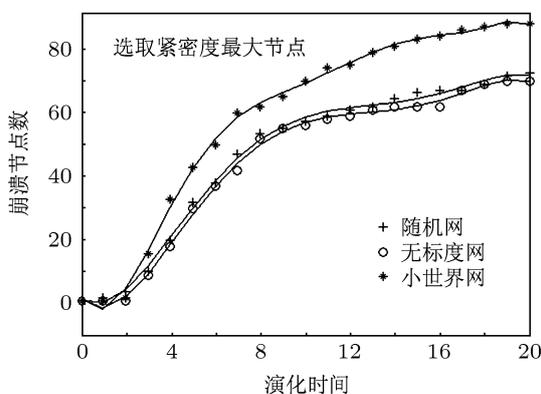


图 6 选取紧密度最大节点为初始攻击节点时灾害蔓延过程 (考虑了三种拓扑结构: 随机网、无标度网和小世界网;  $\theta_{ij} = 0.5, M_{ij} = 0.5$ ; 初始扰动量 0.5)

图 7 为在随机网、无标度网和小世界网上选取网络上节点介数最大的节点作为初始崩溃节点进行灾害蔓延模拟的仿真结果. 可以看出, 在该三种网络上初始节点的崩溃均对网络产生了较大的影响, 崩溃的临界时间较短, 最终的崩溃节点数也较大, 特别是在无标度网上基本所有的节点产生了崩溃, 而在随机网上也有 85% 的节点崩溃. 我们发现, 在任何网络上以节点介数作为牵制控制的策略能达到有效控制整个网络的目的.

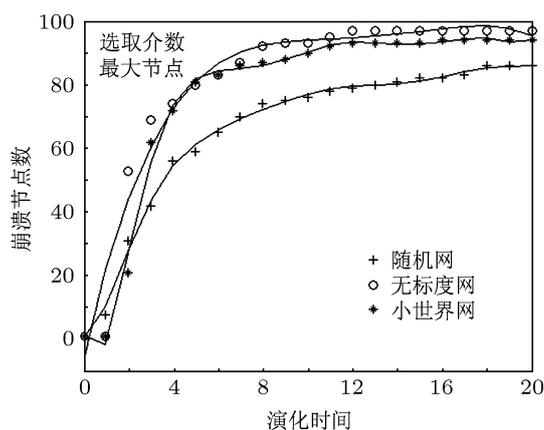


图 7 选取介数最大节点为初始攻击节点时灾害蔓延过程 (考虑了三种拓扑结构: 随机网、无标度网和小世界网;  $\theta_{ij} = 0.5, M_{ij} = 0.5$ ; 初始扰动量 0.5)

### 5 实际网络验证

以上叙述均采用 Pajek 软件产生的理论数据进行分析, 为了验证理论分析的正确性, 本章节将选用一个实际网络进行分析. 理论已经证明, 现实世界的网络大部分为无标度网络, 节点度服从幂律分布. 限于篇幅, 而且为了说明无标度的这种普适性, 本文仅选用一种无标度网络进行验证. 本文选用潘启东<sup>[21]</sup>所构建的煤矿灾害网络. 该网络拓扑结构的基本属性见表 1.

表 1 煤矿灾害网络的基本属性<sup>[21]</sup>

指标名称	指标数值	指标名称	指标数值
节点个数	288	边数	2244
平均度	7.792	密度	0.0271
集聚系数	0.27	度中心度	9.51%(out) 16.16%(in)

同样, 在该网络上分别按照上文所描述的策略选择出目标节点进行攻击, 仿真结果如图 8 所示. 结果显示, 实际网络的崩溃过程基本和理论分析符

合, 在该无标度网下介数最大的节点破坏后, 节点的传播速度最快, 崩溃节点数在很短的时间内达到了总节点数的 80%, 而且随着时间的增长, 最后崩溃的节点数超过总节点数的 95%, 基本上网络中所有节点产生破坏; 在该网络下, 选取节点度最大的节点进行攻击比选取紧密度最大的节点攻击对网络的影响大, 而随机选取初始破坏节点对网络的影响最小, 在该策略下最终崩溃节点的数目最少, 仅 30% 的节点产生破坏. 按照仿真结果, 在防范煤矿灾害时优先选择介数和度数较高的节点进行蓄意攻击可有效降低事故发生率. 比如, 我们可以保证诸如瓦斯爆炸等关键灾害因子处于安全范围内而不被激发.

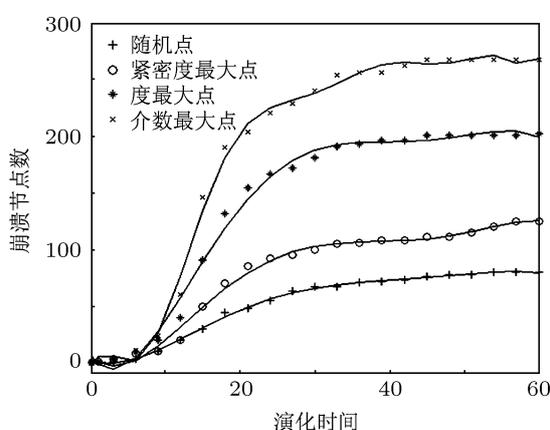


图 8 煤矿灾害网络下灾害蔓延过程 (考虑了四种初始破坏节点: 随机点、度最大点、紧密度最大点和介数最大点; 初始扰动量 1)

## 6 结论

本文以 Lubos Buzna 等建立的灾害蔓延动力学方程作为数学模型研究了在随机网、无标度网和小世界网上灾害的蔓延过程, 而且对于初始崩溃节点的选取, 考虑了网络上的随机节点、度最大节点、紧密度最大节点和介数最大节点. 模拟结果表明, 崩溃节点曲线均有一个相变过程, 即存在一个临界值, 以区分系统的稳定或者崩溃状态. 具体结论如下: 1) 在不同的网络结构下, 对于四种攻击策略, 网络最终状态有着明显的差异, 网络对随机攻击具有较强的抵御能力, 而对目标攻击却显示较强的脆弱性; 2) 在不同的攻击策略下, 网络的拓扑结构往往对灾害蔓延有较大影响, 非均匀网络对于随机错误具有较强的鲁棒性. 以往的研究中都是单纯依靠网络的拓扑结构来检验网络的脆弱性和鲁棒性的, 而网络的各种统计特性往往更重要. 正像复杂网络研究学者 Barabasi 所说<sup>[22]</sup>: “若要想真正理解网络的复杂性, 我们应该着眼于网络链节上发生的变化 (流量). 网络不仅是错综复杂的骨架, 那些在这些骨架上流动的过程才是让世界运转起来的动力.”

本文中动力学模型仅仅考虑的是在理想情况下的模型, 与实际系统相比有较大的差别. 在下一步的研究中, 将考虑进一步改进该动力学灾害模型. 而且本文是在同质网络上进行仿真模拟, 与现实世界的异质网络相比也存在较大的不同, 这也将是下一步的工作重点.

- [1] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **440** 442
- [2] Barabasi A L, Albert R 1999 *Science* **509** 512
- [3] Albert R, Barabasi A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [4] Steven H, Strogatz 2001 *Nature* **410** 268
- [5] Bianconi G, Barabasi A L 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5635
- [6] Valentini L, Perugini D, Poli G 2007 *Physica A* **377** 323
- [7] Lambiotte R, Blonel V D, de Kerchove C, Huens E, Prieur C, Smoreda Z, Dooren P V 2008 arXiv:0802.2178
- [8] Drossel B, McKane A 2003 *Handbook of Graphs and Networks* (Berlin: Jclin Wiley and Sons)
- [9] Beggs J M, Plenz D 2003 *Journal of Neuroscience* **23** 11167
- [10] Buzna L, Peters K, Helbing D 2006 *Physica. A* **363** 132
- [11] Goyal S 2007 *Connections: An Introduction to the Economics of Networks* (Princeton: Princeton University)
- [12] Ormerod P, Roach A P 2004 *Physica A* **339** 645
- [13] Helbing D, Kuhnert C 2003 *Physica A* **328** 584
- [14] Weng W G, Ni S J, Shen S F, Yuan H Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **55** 1943 (in Chinese) [翁文国, 倪顺江, 申世飞, 袁宏永 2007 物理学报 **55** 1938]
- [15] Zhang Z W, Tan X, Ouyang M 2011 *J. Mat. Pra. Theo.* **75** 84 (in Chinese) [张振文, 谭欣, 欧阳敏 2011 数学的实践与认识 **75** 84]
- [16] Ouyang M, Fei Q, Yu M H 2008 *Acta Phys. Sin.* **56** 6763 (in Chinese) [欧阳敏, 费奇, 余明晖 2008 物理学报 **56** 6763]
- [17] Buzna L, Peters K, Hendrik A 2007 *Phys. Rev.* **107** 114
- [18] David M P, Gary W F 2002 *PNAS* **4**(3) 5211
- [19] He D R, Liu Z H, Wang B H 2008 *Complex Systems and Complex Networks* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [何大韧, 刘宗华, 汪秉宏 2008 复杂系统与复杂网络 (北京: 高等教育出版社)]
- [20] Chen G L 2008 *Adva. Mech.* **6** 53 [陈光荣 2008 力学进展 **653** 662]
- [21] Pan Q D 2011 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: China University of

Mining and Technology) (in Chinese) [潘启东 2011 博士学位论文 (北京: 中国矿业大学)]

[22] Barabasi A L 2003 *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What it Means* (New York: The Penguin Group)

# Influence complex network centrality on disaster spreading\*

Li Ze-Quan<sup>1)†</sup> Zhang Rui-Xin<sup>1)2)</sup> Yang Zhao<sup>1)</sup> Zhao Hong-Ze<sup>1)</sup> Yu Jian-Hao<sup>1)</sup>

1) (School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

2) (Communication and Information Center, State Administration of Work Safety, Beijing 100013, China)

(Received 28 April 2012; revised manuscript received 18 June 2012)

## Abstract

Based on a general dynamical model for disaster spreading, in different network structures, i.e. in Erdos-Renyi network, scale-free network and small world network, the influences of network centrality on the speed and trend of disaster spreading are analyzed by simulation. By changing the initial spreading condition, the influence of initial state on the spreading efficiency is analyzed. In this paper the differences between final disaster spreading state are mainly discussed based on four initial vertex-choosing strategies. For the four strategies, it is shown that there are apparent differences. Complex network has a strong ability to resist random attacks but is fragile to resist intentional attacks. However, the three networks show different degrees of fragility. And then, the theoretical analysis results are verified in an actual network.

**Keywords:** complex network, disaster spreading, network centrality

**PACS:** 89.75.-k, 05.10.-a

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91024029).

† E-mail: lzquancumtb@126.com