

有向加权供应链网络演化模型

胡跃群¹, 何红英², 郭进利¹, 张宇³

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 西安市职工大学, 西安 710068; 3. 上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘要: 利用 BBV 加权网络的演化机制和 BA 模型的线性择优连接机制, 新节点进入网络时的入边和出边服从二项分布, 建立了子网络具有流量补偿的有向加权供应链网络模型。利用泊松过程理论分析了网络的出入强度分布, 结果表明, 有向加权供应链网络的稳态平均入强度分布和稳态平均出强度分布服从幂律指数在 $[1, 3]$ 之间的幂律分布。对有向加权供应链网络模型进行仿真研究, 仿真结果与理论预测相一致, 符合供应链网络的幂律特性。

关键词: BBV 模型; BA 模型; 供应链; 有向加权网络; 强度分布

中图分类号: F 224 文献标志码: A

Evolutionary Model for Directed-Weighted Supply Chain Networks

HU Yuequn¹, HE Hongying², GUO Jinli¹, ZHANG Yu³

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Xi'an Employees University, Xi'an 710068, China; 3. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The evolution mechanism of BBV weighted network and the linear preferential attachment of BA model were used to build a directed-weighted supply chain network model, including the nodes added, the compensation mechanism and the in-out links in accord with Bernoulli distribution in the sub-network. The theory of Poisson process was utilized to analyze the in-out strength distribution. The result shows that the node and network's in-strength and out-strength of supply chain network have a power law distribution with degree exponent γ, ω of $[1, 3]$. A simulation was carried out on the supply chain model, and its results are in line with the theoretical prediction results and consistent with the power law distribution of supply chain network.

Keywords: BBV model; BA model; supply chain; directed-weighted network; strength distribution

2000 年飞利浦公司在新墨西哥州的芯片工厂因雷击起火, 导致工艺污染, 工厂陷入瘫痪, 作为爱立信唯一的芯片供应商, 这次事件使爱立信

这个北欧最大移动电话制造商的地位不保, 最终导致爱立信退出手机市场, 与索尼成立合资公司, 而如今索尼爱立信公司已不复存在。2002 年 9 月

收稿日期: 2017-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71571119)

第一作者: 胡跃群(1991-), 男, 硕士研究生。研究方向: 复杂网络、供应链管理。E-mail: hyq91926@163.com

通信作者: 郭进利(1960-), 男, 教授。研究方向: 复杂网络、工业工程。E-mail: phd5816@163.com

美国西海岸发生工潮，港口关闭两周，作为中远集团进入美国的主要门户——美国西海岸，中远集团到达美国的集装箱船无法卸货返航，这使得中远集团两周内至少损失 2 400 万美元，同时中远集团的客户也因此损失惨重。2003 年美国与加拿大西、北部的大面积停电事故直接影响了美国 5 千万人口的用电。类似情况数不胜数，供应链网络的安全运行越来越关乎到世界经济和环境的安全。

供应链的概念是从扩大的生产概念发展而来，现代管理教育对供应链的定义为“供应链是围绕核心企业，通过对商流、信息流、物流、资金流的控制，从采购原材料开始到制成中间产品及最终产品、最后由销售网络把产品送到消费者手中的一个由供应商、制造商、分销商、零售商，直到最终用户所连成的整体功能网链结构”^[1]。为了缓和波动冲击、消费者的不确定性需求、不可预测的自然与人为灾害等供应链中断，许多学者提出各种各样的供应链管理策略和模型。目前对于供应链的研究大多基于系统动力学、经典运筹学的数学规划方法，建立的模型自上而下，对于供应链的研究过于局限，往往侧重于定性研究，在定量研究方面，对供应链网络的拓扑结构和内部演化规律等的研究则比较少^[2-5]。

随着 1998 年 Watts & Strogatz 提出小世界网络模型，Barabasi 和 Albert 提出了网络的无标度特性以及著名的 BA 模型，国际上掀起了利用复杂网络理论研究各类网络特性的热潮。Choi 等^[6]发表开创性文章，从复杂适应性系统角度研究供应链网络，探讨了将供应链网络视作复杂适应系统的必要性；Buldyrev 等^[7]以意大利地区的停电事故为例，研究了相互关联性供应网络灾难级联效应，从此引发了学者对相互关联性网络的各种研究；张纪会等^[8]提出了适应性供应链的复杂网络模型初步框架；李广等^[9]研究了供应链网络的无标度特性；Guo 等^[10]对无向网络提出节点到达过程服从更新过程的 G 增长模型，根据供应链网络的特点，引进了有向泊松模型^[11]。然而，这些文献在建立模型时采用的是无权网络，忽视了权重在供应链网络中的重要性。Barrat 等^[12]提出 BBV 加权网络模型，将复杂网络的研究引入一个新阶段；于海生等^[13]利用加权网络演化理论，提出了基于交易量的供应链网络演化模型；曹文彬等^[14]将节点企业间的合作所带来的边效益引入复杂供应链网络的演化模型中，解释了供应链网络的经济现

象；张勇等^[15]利用复杂网络理论研究了装备保障网络，发现该网络表现出小世界特征与无标度的特性；柳虹等^[16]对分层供应链复杂网络的局部演化进行了研究，层与层之间的企业节点连接体现了同行的竞争力。但是，这些研究均没有考虑供应链网络中物质流动的方向性，并且节点进入网络均是等时间间隔的，并不符合真实供应链网络的特性。

1 模型建立与解析

供应链是一种动态的、自适应性、自组织的复杂网络系统，链上每个企业构成复杂网络的一个节点，具有较小的平均路径长度和较高的集聚系数，符合复杂网络的小世界特征，平均路径长度表示产品的交付时间，集聚系数表示企业之间相互交流的程度。随着时间的更迭，供应链网络也不断在增长、演化。网络的演化过程是一个复杂的动态过程，不仅有新的企业加入，而且还有老企业的退出，有的企业则选择更换交易合作伙伴。一旦企业退出网络，那么，与该企业相连的节点企业之间的边就会发生断裂，如果企业更换交易伙伴，那么，网络中节点之间的边以及边的流量、权重就会发生相应变化。可见，在供应链网络的演化过程中，网络中的节点和边都是可以增加或者删除的，复杂网络中的 BA 模型是一种典型的基于点、边的网络演化模型，新加入的节点会引入新边连接到网络中已经存在的老节点。由于供应链网络是有向加权网络，而有向加权网络演化模型认为网络承载的业务与网络拓扑结构是一种共生演化关系，相互驱动，如 BBV 加权网络模型，通过将网络业务耦合入网络拓扑演化过程，不仅得到了网络的幂律分布，而且更加成功地刻画出真实技术网络的特性。经典的 BA 模型在研究实际网络的演化过程中考虑了两个重要的特性：a. 增长，网络的规模不断扩大，例如，每个月都会有大量的科研文章发表；b. 择优连接，新的节点更倾向于同那些具有较高连接度的节点相连，例如，新发表的文章更倾向于引用一些被广泛引用的重要文献等。加权网络通常用一个 N 阶方阵 $[w_{ij}]$ 来表示节点 i 和 j 之间连边的权重，其中 $i, j = 1, 2, \dots, N$ ， N 表示网络的规模，类似于世界航空网络中权重表示不同机场的航班飞机的可用座位数，科研合作网络中权重表示作者之间相互引

用文章的数量, 供应链网络权重可以表示节点企业之间交易量的大小等。

BBV 加权网络模型中考虑的是无向网络, 即 $w_{ij} = w_{ji}$, s_i 表示节点的强度, 定义 $s_i = \sum_{j \in v(i)} w_{ij}$, $v(i)$ 表示邻居节点 i 的集合。网络的节点强度是节点连接度和与节点相连的边的权值的综合体现, 一般而言, 强度越大, 节点在网络中的位置越重要。在 BA 模型的基础上, BBV 加权网络演化模型考虑了 3 个特性: a. 增长, 网络的初始规模为 N_0 , 边与边之间的初始权重为 w_0 , 在每个时间步, 一个含有 m 条边的新节点 n 随机加入到网络中; b. 择优连接, 新节点 n 加入到网络中, 与已经存在的节点 i 连接的概率 Π 不是取决于节点的度, 而是取决于节点的强度 s_i , 即

$$\Pi_{n \rightarrow i} = \frac{s_i}{\sum_j s_j}$$

c. 权重更新, 每一条新边的初始权重为 w_0 , 由于节点之间产生新边 (n, i) , 使得接受这条新边的节点 i 与其邻居节点 $j \in v(i)$ 之间连边的权重发生变化。权重的更新由以下规则来确定:

$$w_{ij} \rightarrow w_{ij} + \Delta w_{ij}, \Delta w_{ij} = \delta \frac{w_{ij}}{s_i}$$

这个权重更新规则考虑了初始权重为 w_0 的新边与节点 i 连接后带来的流量 δ 的变化, 被选中的节点的权重变化为 $s_i \rightarrow s_i + \delta + w_0$, 如图 1 所示。

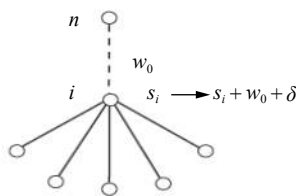


图 1 节点权重局部调整^[12]

Fig.1 Illustration of the strength construction rule^[12]

图 1 表示新节点 n 连接到节点 i 的概率取决于 $s_i / \sum_j s_j$, 被选中节点 i 的权重由变化前的强度、新节点进入网络带来的边的权重以及新节点进入网络后引起老节点连边的权重增量这 3 部分组成。

为了更好地描述真实供应链网络的特性, 本文在模型的建立过程中利用 BA 模型的线性择优连接机制, 综合考虑网络中节点的权重与方向性, 将方向性引入 BBV 加权网络, 在网络模型中引入流量补偿机制, 建立动态方程来研究供应链网络。

设 w_{ij} 表示相连的 2 个节点 i 和 j 之间边的权

重, 如果节点 i 和 j 不相连, 则 $w_{ij} = 0$ 。供应链网络 g 为有向加权网络, V 为 g 的节点集。定义 w_{ij} 为有向边 $\langle j, i \rangle$ 的权值; w_{ji} 为有向边 $\langle i, j \rangle$ 的权值, 一般地, $w_{ij} \neq w_{ji}$ 。节点 i 的入强度 $SI_i = \sum_{j \in V} w_{ji}$, 出强度 $SO_i = \sum_{j \in V} w_{ij}$, $SI_i(t)$ 表示 t 时刻节点 i 的入强度, $SO_i(t)$ 表示 t 时刻节点 i 的出强度。

a. 初始。网络 g 初始由 m_0 个节点组成, 节点之间的初始权重值为 w_0 , 不失一般性, w_0 的初始值取为 1。

b. Poisson 增长。节点的到达过程是具有强度为 λ 的 Poisson 过程。在时刻 t , 当 1 个具有 m 条边的新节点进入网络时, 连接到 m 个不同的网络中已经存在的节点 ($m \leq m_0$), 其中, 新节点的入边数服从二项分布 $B(m, p)$, 出边数服从二项分布 $B(m, 1-p)$, $p \in [0, 1]$, p 为概率, 新边的初始权重为 w_0 。

c. 择优连接。在供应链网络中, 节点的强度代表了企业的交易量的大小, 强度越大, 说明节点在网络中的位置越重要, 越容易吸引其他节点与之进行连接, 也就更容易吸引其他企业与它进行合作。根据 BBV 加权网络的特性, 新节点进入网络与老节点进行连接的概率取决于节点的强度, 由于新节点的边连接到网络中具有方向性, 所以, 新节点连入网络的概率具有以下两种情况:

(a) 当选择网络中已存在的节点 i 为终点时, 选择 i 的概率 Π_1 依赖于 i 的入强度。

$$\Pi_1 = \frac{SI_i}{\sum_{j \in V} SI_j} \quad (1)$$

(b) 当选择网络中已存在的节点 i 为起点时, 选择 i 的概率 Π_2 依赖于 i 的出强度。

$$\Pi_2 = \frac{SO_i}{\sum_{j \in V} SO_j} \quad (2)$$

在每个时间步内, 网络新加入 1 个节点, 与老节点进行连接产生新的边, 循环步骤 b 和 c, 当网络达到最大规模, 也就是达到网络的最大容量时, 节点停止增长, 网络不再继续演化。

d. 权值动态演化。

网络在演化的过程中, 节点新加入网络会引起节点 i 及相邻节点的边权值发生变化。每 1 条新边的初始权重为 w_0 , 更新规则如下:

(a) 如果新加入的边为入边, 即 $\langle n, i \rangle$, 则 i 及邻

居节点的边权值调整为

$$w_{ji} = w_{ji} + \Delta w_{ji}$$

式中, $\Delta w_{ji} = \delta \frac{w_{ji}}{SI_i}$, δ 为更新系数, 表示每次新增1条入边给节点*i*带来的入流量的变化。

(b) 如果新加入的边为出边, 即*i,n*, 则*i*及邻居节点的边权值调整为

$$w_{ij} = w_{ij} + \Delta w_{ij}$$

式中, $\Delta w_{ij} = \delta \frac{w_{ij}}{SO_i}$, 表示新增加1条出边给节点*i*带来的出流量的变化。

1.1 节点强度分析

在网络中, 设 t_i 为第*i*个节点进入网络的时刻, $w_{ij}(t)$ 为时刻*t*有向边*(j,i)*的权值, $w_{ji}(t)$ 表示时刻*t*有向边*(i,j)*的权值, $SI_i(t)$ 表示时刻*t*第*i*个节点的入强度, $SO_i(t)$ 表示时刻*t*第*i*个节点的出强度。

在模型的演化过程中, 不允许出现节点的自连和重边, 边的权重相应地增加。设每条边的初始权值为 w_0 , $\mu(t)$ 为时刻*t*添加到网络的节点总数, $N(t)$ 为时刻*t*网络的节点总数, 则有

$$N(t) = \mu(t) + m_0$$

由于节点的到达过程是具有参数 λ 的Poisson过程, 由Poisson过程理论可知, 在 $[0,t]$ 内到达网络的节点的平均数为 λt , 即到时刻*t*平均有 λt 个节点添加到网络, 则有

$$E(\mu(t)) = \lambda t \tag{3}$$

到*t*时刻新节点*n*加入网络, 节点的边连入网络有两种情况: 这条新边根据择优连接直接连接到节点*i*上, 或者连接到节点*i*的邻居上, 由更新过程可知, 节点*i*的入强度 $SI_i(t)$ 满足动态方程

$$\frac{\partial SI_i(t)}{\partial t} = (1-p) \left[m\lambda \sum_{j \in \Omega(i)} \frac{SI_j(t)}{SI_i(t)} (w_0 + \delta) + \sum_{j \in \Omega(i)} m\lambda \sum_L \frac{SI_j(t)}{SI_i(t)} \delta \frac{w_{ji}}{SI_j(t)} \right] \tag{4}$$

式中, $\Omega(i)$ 表示节点*i*的邻居节点集合。

特别地, 当 $p=1$ 时, 节点*i*的入强度变化为0, 表示网络中的老节点只有出边没有入边。

在每个时间步, 当网络中新增1条入边时, 总入强度的增量为 $m(1+\delta)$, 所以, $\sum SI_i = m(1+\delta)t$, 且当*t*充分大时, 网络的初始节点数与网络整体规模相比可以忽略不计, 故

$$\frac{\partial SI_i(t)}{\partial t} = \frac{(2\delta+1)(1-p)}{1+\delta} \frac{SI_i(t)}{t} \tag{5}$$

令 $\frac{(2\delta+1)(1-p)}{1+\delta} = A$, 则式(5)可以化为

$$\frac{\partial SI_i(t)}{\partial t} = A \frac{SI_i(t)}{t} \tag{6}$$

由于节点*i*在 t_i 时刻进入网络的强度为 $SI_i(t_i)$, 则解方程(6), 可得

$$SI_i(t) = \frac{SI_i(t_i)}{t_i^A} t^A \tag{7}$$

所以,

$$P(SI_i(t) \geq s) = P\left\{ \frac{SI_i(t_i)}{t_i^A} t^A \geq s \right\} = P\left\{ t_i \leq \left(\frac{SI_i(t_i)}{s} \right)^{\frac{1}{A}} t \right\}, \quad t \gg t_i \tag{8}$$

式中: L 为哑变量; P 为概率; s 为节点或网络的强度。

因为, 节点的到达过程是带参数 λ 的Poisson过程, 因此, 节点*i*的到达时间 t_i 服从参数为*i*与 λ 的Gamma分布 $\Gamma(i,\lambda)$, 因此,

$$P(SI_i(t) \geq s) = 1 - \exp\left(-\lambda t \left(\frac{SI_i(t_i)}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right) \cdot \sum_{L=0}^{i-1} \frac{1}{L!} \left(\lambda t \left(\frac{SI_i(t_i)}{s}\right)^{\frac{1}{A}} \right)^L \tag{9}$$

对于充分大的*t*, 当 $j > i > 0$ 时, 可得

$$P(SI_i(t) \geq s) = 1 - \exp\left(-\lambda t \left(\frac{SI_i(t_i)}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right) \cdot \sum_{L=0}^{i-1} \frac{1}{L!} \left(\lambda t \left(\frac{SI_i(t_i)}{s}\right)^{\frac{1}{A}} \right)^L > 1 - \exp\left(-\lambda t \left(\frac{SI_j(t_j)}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right) \cdot \sum_{L=0}^{j-1} \frac{1}{L!} \left(\lambda t \left(\frac{SI_j(t_j)}{s}\right)^{\frac{1}{A}} \right)^L = P(SI_j(t) \geq s) \tag{10}$$

可见供应链网络中存在“中枢”节点, 即网络中某一节点企业的业务量非常大, 随着时间的不断变化, 该类节点的业务量也会越来越大, 对应网络中的度也就更大, 体现出无标度网络中“富者越富”的现象。所以, Poisson连续增长的供应链网络节点*i*的瞬态入强度分布为

$$P(SI_i(t) = s) = \frac{\partial P(SI_i(t) < s)}{\partial s} = \frac{\lambda t \left(\frac{1}{s}\right)^{1+\frac{1}{A}} \sum_{L=0}^m \binom{m}{L} p^L (1-p)^{m-L} \cdot \exp\left[-\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right] \left[\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right]^{i-1} L^{\frac{1}{A}}}{(i-1)!} \tag{11}$$

同理, 可得节点*i*的出强度 $SO_i(t)$ 满足动态方程

$$\frac{\partial S O_i(t)}{\partial t} = p \left[m\lambda \sum_{j \in V} S O_j(t) (w_0 + \delta) + \sum_{j \in \Omega(t)} m\lambda \frac{S O_j(t)}{\sum_L S O_L(t)} \delta \frac{w_{ij}}{S O_j(t)} \right] \quad (12)$$

式(12), 可得

$$\frac{\partial S O_i(t)}{\partial t} = \frac{(2\delta + 1)p}{1 + \delta} \frac{S O_i(t)}{t} \quad (13)$$

令 $B = \frac{(2\delta + 1)p}{1 + \delta}$, 则式(13)可以化为

$$S O_i(t) = \frac{S O_i(t_i)}{t_i^B} t^B \quad (14)$$

特别地, 当 $p = 0$ 时, 节点 i 的出强度变化为 0, 表示网络中的老节点只有入边没有出边。整理

所以, 节点 i 的瞬态出强度分布为

$$P(S O_i(t) = s) = \frac{\partial P(S O_i(t) < s)}{\partial s} = \frac{\lambda t \left(\frac{1}{s}\right)^{1+\frac{1}{B}}}{B} \sum_{L=0}^m \binom{m}{L} p^{m-L} (1-p)^L \frac{\exp\left[-\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{B}}\right] \left[\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{B}}\right]^{i-1} L^{\frac{1}{B}}}{(i-1)!} \quad (15)$$

1.2 网络强度分析

从网络中单个节点的强度延伸到整个网络的强度, $V(t)$ 表示 t 时刻网络的节点集, 由初始条件

$S I_i(t_i) = mp$, $S O_i(t_i) = m(1-p)$ 可知, 网络的瞬态平均入强度

$$P(S I(t) = s) = \frac{1}{E[N(t)]} \sum_{i \in V(t)} P(S I_i(t) = s) = \frac{1}{m_0 + \lambda t} \sum_{i \in V(t)} \frac{\lambda t \left(\frac{1}{s}\right)^{1+\frac{1}{A}}}{A} \sum_{L=0}^m \binom{m}{L} p^L (1-p)^{m-L} \frac{\exp\left[-\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right] \left[\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right]^{i-1} L^{\frac{1}{A}}}{(i-1)!} \quad (16)$$

网络的稳态平均入强度

$$P(S I = s) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(S I(t) = s) \approx \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda t} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\lambda t \left(\frac{1}{s}\right)^{1+\frac{1}{A}}}{A} \sum_{L=0}^m \binom{m}{L} p^L (1-p)^{m-L} \frac{\exp\left[-\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right] \left[\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{A}}\right]^{i-1} L^{\frac{1}{A}}}{(i-1)!} = \frac{1}{A s^{1+\frac{1}{A}}} \sum_{L=0}^m \binom{m}{L} p^L (1-p)^{m-L} L^{\frac{1}{A}} \quad (17)$$

同理, 可得网络的瞬态平均出强度分布

$$P(S O(t) = s) = \frac{1}{E[N(t)]} \sum_{i \in V(t)} P(S O_i(t) = s) = \frac{1}{m_0 + \lambda t} \sum_{i \in V(t)} \frac{\lambda t \left(\frac{1}{s}\right)^{1+\frac{1}{B}}}{B} \sum_{L=0}^m \binom{m}{L} p^{m-L} (1-p)^L \frac{\exp\left[-\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{B}}\right] \left[\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{B}}\right]^{i-1} L^{\frac{1}{B}}}{(i-1)!} \quad (18)$$

网络的稳态平均出强度分布为

$$P(S O = s) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(S O(t) = s) \approx \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda t} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\lambda t \left(\frac{1}{s}\right)^{1+\frac{1}{B}}}{B} \sum_{L=0}^m \binom{m}{L} p^{m-L} (1-p)^L \cdot \frac{\exp\left[-\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{B}}\right] \left[\lambda t \left(\frac{L}{s}\right)^{\frac{1}{B}}\right]^{i-1} L^{\frac{1}{B}}}{(i-1)!} = \frac{1}{B s^{1+\frac{1}{B}}} \sum_{L=0}^m \binom{m}{L} p^{m-L} (1-p)^L L^{\frac{1}{B}} \quad (19)$$

综上分析可知, 网络的稳态平均入强度分布与稳态平均出强度分布服从幂律分布, 即 $P(S I = s) \sim s^{-\gamma}$, 幂律指数

$$\gamma = 1 + \frac{1}{A} = 1 + \frac{1 + \delta}{(1-p)(2\delta + 1)} \quad (20)$$

$P(S O = s) \sim s^{-\omega}$, 幂律指数

$$\omega = 1 + \frac{1}{B} = 1 + \frac{1 + \delta}{2\delta + 1} \tag{21}$$

式中， γ, ω 取值均在 $[1, 3]$ 之间。

2 数值模拟分析

针对上面的模型，为了检验数值分析的正确性，通过数值模拟来分析供应链网络的演化特性。取 $m_0 = 8$ ， $m = 2$ ， $w_0 = 4$ ， $p = 0.6$ ，网络规模 $N = 5\,000$ ，分别对供应链网络节点强度随网络增长演化，网络节点的入强度、出强度，节点的入强

度、出强度与权重的关系进行模拟仿真。
图2模拟了网络的节点强度随时间的演化过程，横坐标表示网络增长的时间，纵坐标表示节点的入强度、出强度。图2(a)表示了网络节点的入强度随着时间的演化过程，图2(b)表示网络节点的出强度随着时间的演化过程。从图中可以看出，节点的入强度和出强度随着网络的增长而逐渐增大，虽然从图像上来看，模拟演化过程中节点的入、出强度基本相同，但是，在数值上两者并不相同，模拟仿真说明了供应链网络随着时间的演化，核心节点企业的业务量会不断增多。

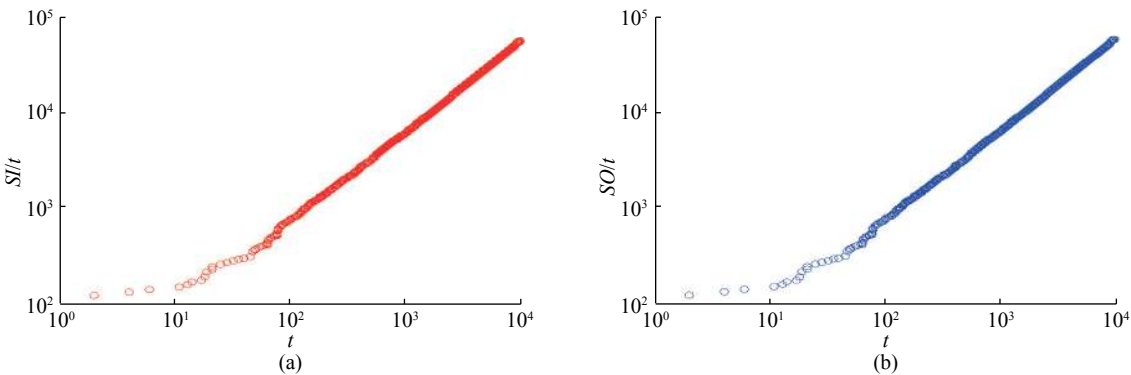


图2 节点权重演化
Fig.2 Time evolution of the strength of vertices

图3表示供应链网络的入强度、出强度分布图，横坐标表示权重，纵坐标表示节点恰好为对应权重的概率。图3(a)表示网络的入强度概率分布图，图3(b)表示网络的出强度概率分布图，从

图中可以看出，供应链网络在演化的过程中符合幂率特性，是一种典型的无标度网络，模拟结果与拟合直线吻合得较好^[17-18]。

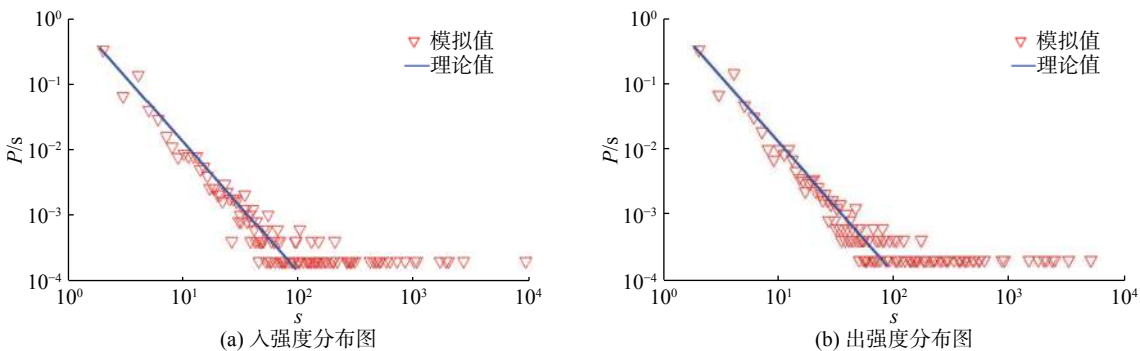


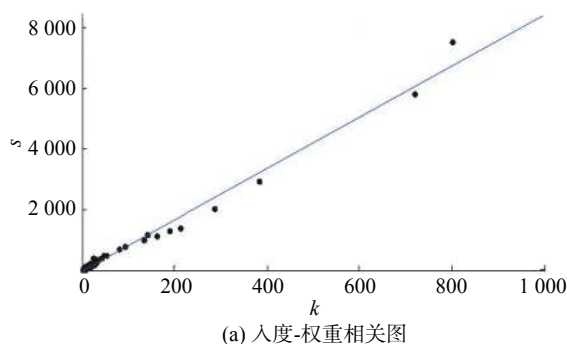
图3 网络的入强度、出强度与权重相关图
Fig.3 In-strength and out-strength probability distributions of the network

图4表示节点的入度和出度与节点权重在演化过程中的关系，横坐标表示节点的度，纵坐标表示节点的权重。图中，大量度比较低的节点聚集在一起，对应的权重也比较低，只有少量度比

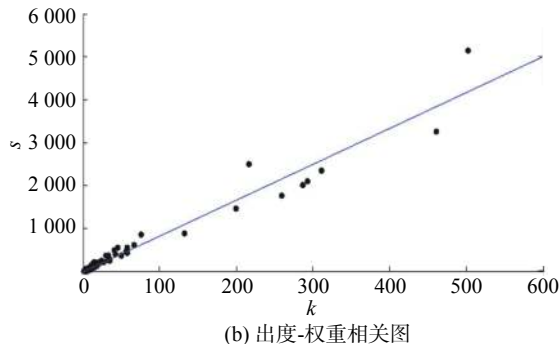
较高的节点对应着较高的权重。节点的权重越高，意味着交易量越大，交易量越大的企业在网络中的地位越重要，而这样的企业在供应链网络中也只是占少数，仿真结果与实际情况一致。

数值仿真结果说明,供应链网络中存在着业务量非常大、对应整个网络非常重要的“中枢”

节点,符合“富者越富”的特性,与理论分析相一致。



(a) 入度-权重相关图



(b) 出度-权重相关图

图4 度-权重相关图

Fig.4 Degree-strength distribution of the network

3 结束语

针对供应链网络的实际特点,建立了有向加权供应链网络模型。在模型中,利用泊松理论考虑了节点进入网络的情况,将权重和方向性引入网络中,比较真实地刻画了供应链网络的演化情况。研究表明,供应链网络的稳态平均入强度分布和稳态平均出强度分布服从幂律指数在1~3之间的幂律分布,仿真结果与理论分析吻合得较好。本文建立模型的过程并未考虑网络中节点企业因为资金断裂、破产、竞争等一系列原因而退出网络的情况,而节点又以何种方式退出网络,这将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 吴军,李健,汪寿阳. 供应链风险管理中的几个重要问题[J]. 管理科学学报, 2006, 6(9): 1-12.
- [2] DE BOER L, LABRO E, MORLACCHI P. A review of methods supporting supplier selection[J]. European Journal of Purchasing & Supply Management, 2001, 7(2): 75-89.
- [3] ZHANG D L, XU H F, WU Y. Single and multi-period optimal inventory control models with risk-averse constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199(2): 420-434.
- [4] 罗春林,黄健,柳键. 不同风险偏好下的供应链定价与订货策略[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(4): 859-864.
- [5] 叶笛. 基于复杂网络视角的供应链网络研究[J]. 现代管理科学, 2011(8): 111-113.
- [6] CHOI T Y, DOOLEY K J, RUNGTUSANATHAM M. Supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence[J]. Journal of Operations Management, 2001, 19(3): 351-366.

- [7] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025-1028.
- [8] 张纪会,徐军芹. 适应性供应链的复杂网络模型研究[J]. 中国管理学, 2009, 17(2): 76-79.
- [9] 李广,赵道致. 供应链网络的无标度特性研究[J]. 工业工程, 2012, 15(1): 28-32.
- [10] GUO J L, BAI Y Q. A note on mean-field theory for scale-free random networks[J]. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems Series B: Applications & Algorithms, 2006, 13(3/4): 523-531.
- [11] 郭进利. 供应链型网络中双幂律分布模型[J]. 物理学报, 2006, 55(8): 3916-3921.
- [12] BARRAT A, BARTHÉLEMY M, VESPIGNANI A. Modeling the evolution of weighted networks[J]. Physical Review E, 2004, 70(6): 066149.
- [13] 于海生,赵林度,来向红. 基于交易量的供应链网络演化模型研究[J]. 管理学报, 2009, 6(2): 187-191.
- [14] 曹文彬,熊曦. 边效益因素下复杂供应链网络局部演化机制[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(1): 75-77.
- [15] 张勇,杨宏伟,杨学强,等. 基于复杂网络理论的装备保障网络模型研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(5): 429-434.
- [16] 柳虹,周根贵,傅培华. 分层供应链复杂网络局部演化模型研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(2): 270-273.
- [17] NEWMAN M E J. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law[J]. Contemporary Physics, 2015, 46(5): 323-351.
- [18] GOLDSTEIN M L, MORRIS S A, YEN G G. Problems with fitting to the power-law distribution[J]. The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems, 2004, 41(2): 255-258.