

doi:10.11835/j.issn.1008-5831.2015.05.001

欢迎按以下格式引用:李晓青. 复杂网络视角下的产业集群网络演化模型研究[J]. 重庆大学学报:社会科学版,2015(5):1-8.

Citation Format: LI Xiaoqing. Study on the evolution model of industrial cluster networks from the perspective of complex networks[J]. Journal of Chongqing University: Social Science Edition,2015(5):1-8.

# 复杂网络视角下的产业集群 网络演化模型研究

李晓青

(厦门理工学院 管理学院,福建 厦门 361024)

**摘要:**文章从复杂网络视角研究产业集群的演化,通过细致考察产业集群演化机理和机制,增加退出和补偿两种动力学机制,构造一个基于BA无标度网络的改进产业集群网络演化模型,整体上解释了产业集群网络的演化特征和演化过程。研究着重解释和分析退出机制和补偿机制对产业集群网络演化过程的影响。研究表明,演化过程中如果不存在退出机制,改进模型退化为经典BA模型,如果存在退出机制,补偿机制一定程度地保护了模型的度分布无标度特性。将两种演化机制相结合,可以反映集群网络演化过程中的生命特征。最后,由模型数理分析出发,给出了产业集群网络演化过程中的内因解释和治理对策建议。

**关键词:**复杂网络;BA无标度模型;退出机制;补偿机制;演化模型

**中图分类号:**F269.23

**文献标志码:**A

**文章编号:**1008-5831(2015)05-0001-08

## 一、研究基础

在当今世界经济版图上,产业集群逐渐成为最为突出的经济地理特征<sup>[1]</sup>。Porter认为,产业集群(industrial cluster)是在某一特定领域内互相联系的、在地理位置上集中的公司和机构集合,包括一批对竞争起着重要作用的、相互联系的产业和其他实体,经常向下延伸至销售渠道和客户,并侧面扩展到辅助性产品的制造商,以及与技能技术或投入相关的产业公司,还包括专业化培训、教育、信息研究和技术支持的政府和其他机构<sup>[2]</sup>。产业集群本质上作为介于科层制组织形式与纯市场组织形式之间的中间体网络组织,并非大量企业或机构的简单聚集,更重要的是这些行为主体进行资源交换和传递活动所形成的网络关系,产业集群中的各类主体在各种产业关系及协同创新的基础上,基于共同的社会文化背景,彼此逐渐建立起相对稳定的、能够促进创新以及产业集群协调稳定发展的各种关系网络。换言之,产业集群本质上是一个以资本、技术、合作的契约与协议、企业信誉、人际关系、传统习惯等为纽带联结而成的复杂关系网络系统<sup>[3]</sup>。

研究表明,产业集群是一个动态的、开放的复杂网络。一方面,产业集群具有典型的网络形态特征:产业集群行为主体之间是相互关联的。Porter关于竞争优势的钻石模型强调了产业间相互依赖的关系是集群竞争优势的重要构成<sup>[4]</sup>。雷如桥等基于网络结构视角提出了集群的三层次网络结构(图1)<sup>[5]</sup>:一是由产业链处于中心地位的企业、为其提供服务的上下游供应商、客商、合作企业及竞争企业所构成的“核心网络”,核心网络各成员间通过垂直联系(产业链上企业间联系)和水平联系(知识、信息、技术的传递与扩散)相互作用,体现为合作与竞争关系;二是由政府及公共部门、研发机构、中介、金融机构及其他企业组成的“辅助

修回日期:2015-05-20

基金项目:福建省科技计划软科学项目(2013R0099);厦门理工学院高层次人才引进项目(YSK12015R);全国统计科研计划重点项目(2012LZ027);国家留学基金委资助项目

作者简介:李晓青(1976-),女,湖北京山人,厦门理工学院副教授,博士,主要从事产业集群管理与复杂网络研究。

网络”,主要负责不断从辅助网络向核心网络进行知识、信息和资源的交流与传递;三是由集群和外部环境所形成的“外部网络”,外部环境通过与集群内部各主体之间持续的信息与能量交换,促进整个集群的成熟。

另一方面,产业集群网络运行过程中,网络节点、网络联结关系和网络结构会随时发生改变,使产业集群网络呈现出复杂性的特征:(1)网络节点的复杂性。产业集群中单个企业、政府机构以及非盈利机构都可以视作网络节点,这些节点都是高度智能化的个体或组织,每个节点本身可能就是具有分岔或混沌等复杂非线性行为的动力系统;(2)网络联结关系的复杂性。产业集群网络节点通过正式或非正式的、甚至是随机的接触和沟通形成盘根错节的关系网,包括企业间垂直的分工协作关系,同类企业间的水平合作或竞争关系,政府、科研机构和企业间的产学研合作关系,企业与中介机构、金融机构等支持部门之间的关系,群内企业共享有形或无形资源形成的关系等。这些节点间的关系在建立

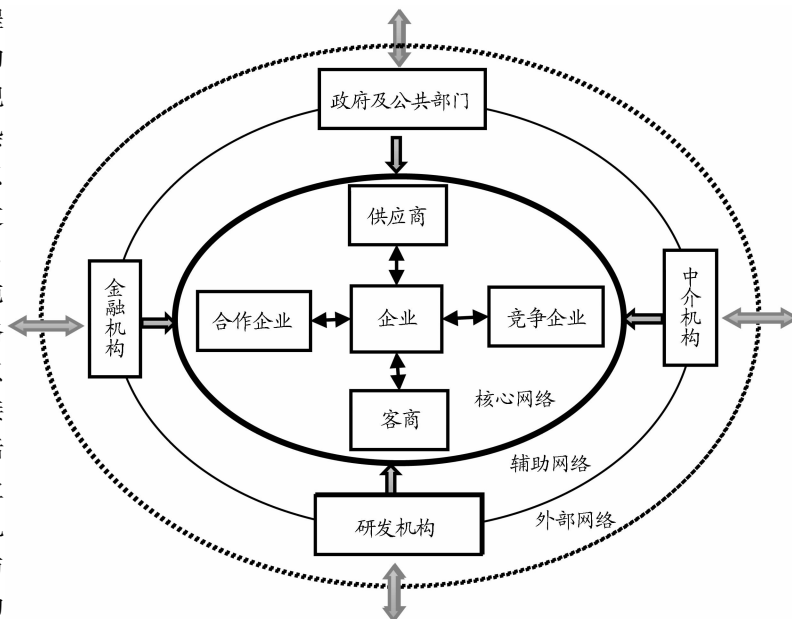


图1 产业集群网络结构图

方式、权重或方向上均不同,而且随着时间不断发生变化或转换;(3)网络结构的复杂性。产业集群网络结构组成要素是复杂的,随着产业集群演化过程中节点的进入和退出,以各种不同方式连接的网络结构发生变动。同时,各种子网络之间存在相互作用,一个子网络的任何变化都可能触发其他子网络的变化。

显然,产业集群是一种由多种要素、多种主体、多种联系协同形成的复杂社会网络。传统产业理论运用的新古典经济学研究范式限制了其有效处理产业集群现象复杂性的能力<sup>[6]</sup>。目前,复杂性理论已经逐渐成为产业集群研究领域的重要新视角,例如 Brenner 发现,在系统经济学中对产业集群演化过程缺乏动态解释方法,而复杂性理论对产业集群内的两个重要机制(促进集群临界规模的超越和集群本地的共生作用)研究方面具有显著的优越性<sup>[7]</sup>。在复杂性理论中,复杂网络理论是研究具有复杂拓扑结构和动力学行为的大规模网络诸如从电力网络、全球交通网络、生物体大脑到各种新陈代谢网络、信息网络以及社会网络等的强有力工具。近年来,国外学者开始将这一新兴理论应用于产业集群研究,Baum 等人通过研究 1952 - 1990 年间加拿大投资银行集团网络演化拓扑结构,证实集群网络具有典型的小世界网络特征<sup>[8]</sup>;Uzzi 和 Spiro 研究发现了百老汇音乐产业形成过程中的小世界特性<sup>[9]</sup>。国内学者对这一跨学科研究也开始关注,如范如国等运用扩展的 BA 无标度网络模型模拟产业集群的演化过程<sup>[3]</sup>;李昊等应用一个小世界演化模型与选择价值函数演化模型相结合的双重网络演化模型,研究集群网络的演化特征和集群网络的演化过程<sup>[10]</sup>。目前,复杂网络视角的产业集群研究处于起步阶段,对产业集群网络的演化机制以及演进过程中的状态研究尚不充分,例如,研究证明产业集群具有小世界特征<sup>[8-10]</sup>,而产业集群的无标度网络特征研究不足。

产业集群无标度网络特征研究的关键问题在于产业集群网络中企业伙伴选择是否遵循择优连接机制。企业网络嵌入理论倾向于从企业在网络结构中的位置来解释企业构建新网络关系的能力<sup>[11]</sup>,也有研究认为企业间相互关系的建立可能是地位相仿的行动者之间的选择<sup>[12]</sup>。Powell 等学者对美国生物科技产业网络(482 家企业样本)12 年(1988 - 1999)网络演变进行拓扑分析、Pajek 网络呈现和统计分析等实证研究<sup>[13]</sup>,综合考察了产业内组织间链接关系的四种机制:累积优势(accumulative advantage)、趋同性(homophily)、跟随潮流(follow-the-trend)和多样连通性(multiconnectivity)。这一大规模产业网络的研究结果显示,尽管没有任何一种机制贯穿始终地单独主导网络关系变迁过程,但这四种机制所强化的择优连接现象在网络演化全过程中显著存在。

## 二、复杂网络理论与 BA 无标度网络

复杂网络是一种研究复杂性科学及系统的有效手段,它借助数学图论和统计物理等方法,研究复杂系统的演化机制及规律,其原理在于面对一类复杂性问题时,提炼最基础的单位为基本元素,研究各元素之间

的关联关系以及系统的结构特征,进而研究结构与功能之间的关系及系统行为<sup>[10]</sup>。图是网络的基本表达方法,复杂网络在数学上可以用图来描述,一个网络可以抽象为一个二元组  $G = (V, E)$ , 其中,  $V$  是网络中节点的集合,  $E$  是连接节点的边的集合,  $E$  中每条边  $e_{ij}$  都对应于  $V$  中的一对节点  $(i, j)$ , 如果连接节点  $(i, j)$  和  $(j, i)$  是同一条边时, 则称该网络为无向网络, 否则为有向网络。大量的节点(点集  $V$ ) 通过边(边集  $E$ ) 的相互连接构成图  $G = (V, E)$ 。点集  $V$  元素的个数及边集  $E$  元素的个数分别称为该网络的阶数及边数, 节点连接强度的不同可以通过对边赋权来实现。在统计物理中, 网络是一个包含大量不同个体(节点)的系统, 个体之间相互作用(边)。统计物理学可以将复杂网络的宏观、微观性质紧密联系在一起。在复杂网络中, 通常涉及三组基本统计指标: 度和度分布、聚类系数以及最短路径和平均路径长度。

早期的网络研究主要集中在小规模的规则网络(regular network)上, 网络中任意两个节点之间的联系遵循既定的规则, 最常见的为最近邻耦合网络, 每个节点的度和集聚系数相同。大多数规则网络表现出较大的平均距离长度和集聚系数, 无法反映现实中结构的异质性及动态增长性。复杂网络的研究始于 20 世纪 60 年代由 Erdős 和 Rényi 建立的随机图理论(random graph theory), 在其后的 40 年中, 随机图理论一直是复杂网络研究的基本理论, 人们认为随机网络(random network)是描述真实系统最适宜的网络, ER 随机网络模型一直是复杂网络研究的基本模型。然而, 随着计算机数据处理及运算能力的迅速提高, 科学家们发现真实世界大部分网络既不是规则网络, 也不是随机网络, 而是复杂网络(complex network)。

1998 年, Watts 和 Strogatz 构造出小世界网络(small world network)<sup>[14]</sup>, 该模型反映了社会关系网络的一种特性: 较短的平均路径长度和较高的聚类系数。1999 年, Barabási 和 Albert 在合作开展 WWW 研究项目时发现<sup>[15]</sup>, WWW 并非是预期的随机网络, 而是少数高链接性的页面串联起来的, 80% 以上的页面的链接数不到 4 个, 只占节点总数不到万分之一的极少数节点, 却有 1 000 个以上的链接。紧接着, 研究者们发现, 很多其他网络包括 Internet、科学合作网、食物网和蛋白质网络都不同程度地具有共同的重要特性: 大部分节点只有少数几个链接, 而某些节点(集散节点)却拥有与其他节点的大量链接, 其度分布表现为幂律形式。由于这类网络的节点的度没有明显的特征长度, 故称为无标度网络(scale-free network)。

Barabási 和 Albert 认为, 现实复杂系统经过自组织最终生成无标度网络, 主要是因为现实系统拥有生长(growth)和择优连接(preferential attachment)这两个关键因素。一方面, 大部分网络是开放的, 通过不断加入其中的新节点而不断扩大, 而新加入的节点又与网络中已存在的老节点进行连接; 另一方面, 这些新节点更倾向于与那些具有较高度值的“大”节点相连接, 例如在 Internet 中, 新建立网站显然倾向于与有高知名度的网站链接, 如新浪、网易、搜狐等。基于这两个因素, Barabási 和 Albert 构建了一个简单的无标度网络模型——BA 模型。

在复杂网络中, 度定义为网络中与节点  $i$  连接的其他节点的个数, 也即与之相关联的边的条数, 记为  $k_i$ 。

度分布  $p(k)$  表示随机选取一个节点, 其度为  $k$  的概率, 即  $\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ 。

BA 模型具有两个基本演化机制: (1) 生长, 始于一个具有  $m_0$  个节点的网络, 每一个时间步长增加一个新节点, 与  $m$  个网络已存在的节点相连,  $m < m_0$ ; (2) 择优连接, 新加入的节点在连接一个已有节点  $i$  时, 与节点  $i$  相连接的概率  $\Pi_i$  取决于该节点的度  $k_i$ , 即  $\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ 。经过  $t$  步后, 这种算法产生一个具有  $N = t + m_0$  个节点、 $mt$  条边的网络, 这个网络最终演化成一个标度不变的状态, 即网络的度分布不随时间而改变, 服从幂律分布:  $P(k) \sim 2m^2 k^{-3}$ 。

### 三、基于 BA 无标度网络的产业集群网络演化模型

复杂网络是真实复杂系统的拓扑抽象, 也可以说是复杂系统相互作用结构的本质抽象。产业集群网络结构反映了群内企业及机构之间的连接方式、连接多寡及方向, 因此, 复杂网络分析方法将群内企业和机构主体抽象为节点, 将主体之间的联系(中间产品、劳动力、信息、知识、技术、资源等)抽象为节点间的边(连接), 以复杂网络中的相关概念作为产业集群网络的结构变量, 分析在不同演化规则下产业集群网络演化机制。目前, 在复杂网络理论中, 小世界网络和无标度网络能够反映大多数现实系统基本的复杂网络特性, 在建模问题上获得突破性进展。其中, 小世界网络模型虽然能够在一定程度上描述实际系统的小世界效应, 但是却忽略了网络的增长特性, 而以 BA 模型为代表的无标度网络模型所展现的生长与择优连接的动力学

机制能够更好地刻画现实复杂系统的演化过程。因此,本文将着重建立基于 BA 无标度网络的产业集群演化模型,研究产业集群演化机制。

### (一) 产业集群网络演化机理

产业集群网络演化是一个动态复杂的过程。Anderson 等人认为,集群网络在生命周期的不同阶段,群内网络联系经历着动态的变化过程(图 2)<sup>[16]</sup>。图中圆圈和星形节点代表不同类型的组织。由图可见,在产业集群萌芽期,网络内只有少量企业或其他组织聚集,节点间基本上没有建立联系;进入形成期,企业之间在一定程度上开始出现专业化分工,节点之间出现少量连接;到了发展期,大量中小企业迁入集群(同时也会有少数企业迁出),随着企业的继续衍生,分工进一步细化,企业与其他行为主体如政府、中介组织等发展联系,网络内节点连接显著增加;进入成熟期,此时新节点的加入速度放缓,网络内节点数目众多,集群内各类行为主体之间交流合作频繁,产业联系和非经济联系逐渐增强,各类网络连接逐步确立并加强;随着市场、技术、环境等发生改变,集群网络进入调整转换期,部分企业退出集群,一些网络关系变弱,集群可能裂变为几个新的产业群落。

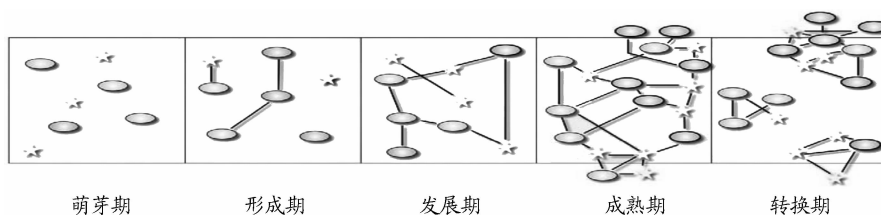


图 2 产业集群网络结构演化图

来源: Anderson, Schwaag - Serger, Sörvik, Hansson (2004) .

### (二) 产业集群网络演化机制

如上所述,在产业集群演化不同阶段,网络结构发生着显著而有规律的变化。在集群开放系统中,群内成员是自适应主体(adaptive agent),具有较强的目的性、主动性和积极的“活性”,能根据所处环境调整自身行为,能动地与环境及其他主体进行交互作用(合作或竞争),争取最大的利益空间并延续自己的生命。产业集群整个宏观网络系统的演变都是在此基础上逐步派生出来的。本文将基于此演化机理与动因的分析,提取产业集群网络演化机制。

#### 1. 生长机制(Growth)

在集群发展初期,企业数量较少,随着专业化分工趋势凸显,集群聚集经济效应日益显著,集群网络吸引力增强,不断有新企业成员受到集群发展潜力的吸引迁入网络,与其他主体建立不同类型的联系,或嵌入上下游产业价值链,或参与同类产品的竞争,或与政府、中介机构建立互动关系等。群内企业数量和质量持续变化和更新,节点间联系呈现动态生长趋势,促进集群网络的演化。

#### 2. 择优连接机制(Preferential Attachment)

新成员进入网络进行合作伙伴选择及原有成员之间新建联系时遵循择优连接规则。一方面,新成员倾向于与集群内拥有较多合作关系的核心网络成员进行合作;另一方面,成员之间的竞争促使企业在建立联系时更加倾向于与拥有核心技术及产品、高水平研发团队、资金实力雄厚及市场竞争能力强的伙伴开展合作。

#### 3. 退出机制(Nodes Deletion)

事实上,由于产业集群内部的激烈竞争,一方面,网络内竞争能力较弱的成员面临巨大的生存压力和挑战,遭遇失败后如果无法有效根据内外部动态环境调整自身行为,会选择或者被迫退出集群网络。另一方面,与之合作的其他网络成员会在优先附着规则下谨慎考虑甚至解除彼此间的合作关系,以降低自身的经营风险,网络内节点连接出现断裂情况(或称之为断键)。

#### 4. 补偿机制(Compensatory Rewiring)

根据复杂系统理论,产业集群网络具有一定的自组织能力,会对自身或者外界的变化作出反应。企业退出网络或者企业间联系断裂后,此前的业务联系虽然暂时中止,但仍留在群内企业的业务需求(断键的另一端)仍然存在,这些企业将重新在群内企业池内或者集群外部寻找节点进行补偿,重新建立链接,链接遵循择优偏好规则。值得指出的是,补偿机制与 Dorogovtsev 等人提出的两端择优连接机制(double preferential

attachment scheme, DPA)①<sup>[17-20]</sup>本质上是相同的,换言之,补偿规则以更为自然的方式引入了两端择优连接机制<sup>[21]</sup>。

### (三) 基于改进的 BA 无标度网络的产业集群演化模型描述

一般来说,现实网络与外界存在节点交换,在演化过程中不断有节点加入或退出,节点间连接关系也发生着断裂或重连,网络自身具有一定的自组织能力,能对自身或外界的变化发生反应。BA 模型尽管能很好地描述许多真实网络,但其主要动力学过程是节点生长和择优连接,过于简单和笼统,没有考虑到节点的删除和补偿连接问题。如前所述,在现实的产业集群网络演化过程中,不仅有新节点的加入和择优连接偏好这两种演化机制,还有企业节点的退出机制,以及节点间连接关系的断裂及补偿重连机制(即内部企业合作关系的中止与重新调整过程)。因此,本文考虑以下改进模型。

在每个时间步长内,(1)有一个新节点嵌入产业集群网络,这个新节点以正比于目标节点度的概率选择网络中  $m$  个目标节点建立连接关系;(2)以概率  $c$  随机选择网络内一个节点及其所有链接进行删除,  $0 \leq c \leq 1$ ;(3)如果某节点丢失一个链接,那么该节点将会补偿获取  $n$  个链接( $n < n_{crit}(c)$ ,这里  $n_{crit}(c)$  是与删除概率  $c$  有关的上限,将在后文定义),补偿链接并非随意连接,而是遵循择优偏好原则选取目标节点。

本文采用 Dorogovtsev 和 Mendes 的分析方法<sup>[17]</sup>,网络中每一个节点以其被嵌入网络的时间来标识,网络中第  $i$  个节点指在第  $i$  个时间步长嵌入的节点, $k(i, t)$  表示第  $i$  个节点在  $t$  时刻的度,其中  $t > i$ ;  $S(t)$  表示  $t$  时刻网络中所有节点的度数总和;  $N(t)$  表示  $t$  时刻网络中所有节点数之和;  $t$  时刻网络中所有节点的度的平均值称为网络的平均度,记为  $\langle k(t) \rangle$ ,  $\langle k(t) \rangle = S(t)/N(t)$ 。根据演化规则和改进网络的动力学特征,对于网络中节点  $i$  而言,其度  $k(i, t)$  的速率方程由如下几个部分构成。

(1)新节点加入时择优选择节点  $i$  时度的增加为  $m \frac{k(i, t)}{S(t)}$ ;

(2)在节点及链接删除过程中,节点  $i$  失去一个链接的概率为  $\frac{ck(i, t)}{N(t)}$ ;

(3)网络内每失去一个链接(边),将产生  $n$  个新的补偿链接(边)。一方面,节点  $i$  因失去链接而得到的补偿边数为  $\frac{nk(i, t)}{N(t)}$ ;另一方面,每个丢失一条链接的节点(期望有  $c \langle k(t) \rangle$  个节点)均获得  $n$  个新的补偿链接(边),这些边择优选择目标节点,节点  $i$  从这些新链接中捕获的边数为  $n \langle k(t) \rangle \frac{k(i, t)}{S(t)}$ 。

$$\text{因此,速率方程 } \frac{\partial k(i, t)}{\partial t} = m \frac{k(i, t)}{S(t)} - \frac{ck(i, t)}{N(t)} + \frac{nk(i, t)}{N(t)} + n \langle k(t) \rangle \frac{k(i, t)}{S(t)} \quad (1)$$

为了获得  $S(t)$  的表达式,令  $\varepsilon(t) = S(t)/2$  表示  $t$  时刻网络中的总边数,

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = m - (c - nc) \langle k(t) \rangle \quad (2)$$

将  $\langle k(t) \rangle = \frac{S(t)}{N(t)}$  和  $N(t) = (1 - c)t$  代入式(2),可得

$$S(t) = \frac{2m(1 - c)}{1 + c - 2nc} t \quad (3)$$

$$\langle k(t) \rangle = \frac{2m}{1 + c - 2nc} \quad (4)$$

进一步,将式(3)和(4)代入速率方程(1)得到

$$\frac{\partial k(i, t)}{\partial t} = \frac{k(i, t)}{2(1 - c)t} (1 - c + 2nc) \quad (5)$$

初始条件  $k(i, t_0) = m$ , 因此,有  $k(i, t) = m (t/t_0)^\beta$ ,  $\beta = (1 - c + 2nc)/[2(1 - c)]$ 。

利用平均场方法可以推导得到网络稳定度分布,即当网络演化到无限时,  $t \rightarrow \infty$ ,  $p(k) = \frac{k^{-1-(1/\Gamma(1-c)\beta)}}{(1 - c)m^{-1/\Gamma(1-c)\beta}}$ 。可见,改进模型的度分布是一个幂率分布,幂指数为

①DPA 是指在网络内现存两节点之间建立连接时,两端同时以择优偏好选择目标节点,即“强强联合”,这是很多现实网络中显著存在的机制。文献[17-20]对此有较为深入的研究。

$$\gamma = 1 + \frac{1}{(1-c)\beta} = 1 + \frac{2}{1+(2n-1)c} \quad (6)$$

上述结果表明,产业集群网络度分布  $p(k)$  具有幂律特性,与 BA 经典模型类似,改进模型所生成的网络仍将自组织演化成一个幂指数为  $\gamma$  的无标度复杂网络。

#### 四、产业集群网络演化模型的演化分析

已有研究表明,复杂网络的拓扑结构性质以及复杂网络上的动力学行为等均紧密依赖于复杂网络的度分布<sup>[22]</sup>。由于产业集群复杂网络的无标度特性,网络的度分布服从幂指数分布,因此,其度分布完全由幂指数(度分布指数)所确定。从式(6)可见,幂指数与退出机制( $c$ )和补偿机制( $n$ )有关。如果没有节点删除(也就不存在补偿),即  $c = 0$ ,模型退化为经典 BA 无标度网络,  $\gamma = 3$ ,与 BA 无标度网络模型的幂指数一致。因此,改进的产业集群网络演化模型可以看作是 BA 经典模型的一般化。

进一步,根据  $S(t)$  的有效性要求,式(3)中分母应该大于0,即  $1 + c - 2nc > 0$ 。因此  $1 + (2n - 1)c < 2$ ,  $\gamma > 2$ 。这一范围符合实际网络的情形<sup>②</sup>。当然,这也同时意味着限定了补偿率的取值范围  $0 < n < n_{crit} = (1 + c)/2c$ 。

如果产业集群中存在退出机制,  $c \neq 0$ ,幂指数还取决于链接补偿率  $n$ 。有趣的是,根据式(6)可知,当  $n = 0.5$ ,网络丢失链接的补偿率达到50%时,无论删除率取值多大,网络都将退化为经典 BA 无标度网络。从式(6)也不难看出,补偿机制的存在一定程度地保护了模型的度分布无标度特性。无论删除率  $c$  如何取值,当补偿率足够大时( $n > 0.5$ ),  $2 < \gamma < 3$ ,度分布呈现明显无标度特性;当补偿率  $n$  降低至50%以下时,幂指数  $\gamma > 3$ ,且随着补偿率的降低和删除率的提高,幂指数迅速增大,度分布无标度特性将逐渐消失,网络结构从异质向均质过渡。

接下来,本文进一步根据网络演化周期分析产业集群网络退出机制和补偿机制对幂指数及网络拓扑结构的影响。在产业集群网络发展前段(萌芽期、形成期和发展期),网络以节点生长为主,节点嵌入现象较为频繁,虽然有少量企业节点退出网络,但因节点退出导致的丢失链接能迅速得到补偿,补偿资源丰富,补偿率较高。此时,可以设定  $n > 0.5$ ,有  $2n - 1 > 0$ ,因此根据式(6),  $2 < \gamma < 3$ ,且  $\gamma$  与  $c$  形成反比关系。根据复杂网络理论,当  $2 < \gamma < 3$ ,这类幂律分布网络为典型的异质网络,存在大量度值很小的节点,也存在数量较少的度值很高的节点(HUB节点),随着网络规模的增加,HUB节点有所增加,但增加速度极为缓慢。如前所述,这一网络拓扑特性与产业集群实际发展机理相符。

在产业集群网络发展后段(成熟期和转换期),网络节点增长缓慢,因优胜劣汰或外部吸引而退出网络的节点增多,产业发展的成熟度一定程度限制了企业利润空间,链接断键补偿动力不如发展期充足。此时,可以设定  $n < 0.5$ ,有  $2n - 1 < 0$ ,因此根据式(6),  $\gamma > 3$ ,且  $\gamma$  与  $c$  形成正比关系。此时,复杂网络中绝大多数节点度值接近,网络 HUB 节点即使存在,数量也极少,且不会随着网络规模的增加而增加。随着  $\gamma$  增大,这类网络逐渐接近随机均质网络。

可见,在网络演化前段,产业集群复杂网络无标度特征明显,随着退出规则和补偿规则作用的强弱变化,幂指数  $\gamma$  在(2,3)区间内取值。无标度网络具有异质性、鲁棒性和脆弱性。首先,在具有无标度特性的产业集群网络中,网络资源并非平均分配到每个节点上,实际情况是 HUB 节点拥有更多的资源,其规模和优势都要强于其他众多小节点。产业集群中这些数量不多的 HUB 节点一般是在整个网络中占据主体地位的企业或者科研机构,他们拥有关键技术、资本或者信息优势,起着通信枢纽作用,因此相比于随机均质网络,无标度网络具有较高的通信效率。其次,产业集群复杂网络的无标度性保证了网络的鲁棒性——面对攻击或者异常情况的稳健性,网络内众多度值小的节点在实际情况中是那些实力较弱的小企业(供应商、分销商或者中介机构等),他们很难掌握一定的核心技术或关键资源,即使被删除,链接的另一端也可以在网络上其他线路迅速寻找到到达另一节点的路线,因此,他们的退出或破产不会对整个网络运行产生大的影响,因此产业集群网络对各种不确定的内外部干扰和攻击具有较好的稳定性(鲁棒性),这一特性也保证了产业集群网络演化的稳定性。最后,如前所述,为数不多的 HUB 节点在网络中占据核心地位,其重要性不言而喻,如果这些中心节点受到恶意攻击或者出现故障,例如由于市场预期错误、资金链断裂、严重违法诉讼、技术

<sup>②</sup>事实上,实际的大型复杂网络都属于稀疏网络,网络中 HUB 点(度值很高的点)数目不多。王林和戴冠中(2006)在研究中指出,当  $0 \leq \gamma \leq 2$ ,网络规模趋于无穷大时,一阶矩和二阶矩均发散,方差亦发散,网络中 HUB 点偏多。绝大多数人造网络不应位于这个范围。

更新换代等问题导致核心企业运行障碍甚至停摆时,整个网络将面临崩溃的危险,这体现为产业集群无标度网络的脆弱性。因此,在产业集群网络演化前段,一方面,必须十分重视对核心节点的培育和保护,增强关键企业的核心竞争力和带动能力,保证产业集群网络的正常运行和壮大;另一方面,应该注重产业集群内部各种协会、金融、标准制定和法律服务等中介机构的建设与发展,提升网络的通信效率,企业可以在失去链接后迅速高效地获得补偿关系,进一步保证网络结构的无标度性。

本文重点阐述产业集群网络在发展后期可能面临的演化瓶颈。在产业集群网络演化后段,断键的补偿能力降低,网络的无标度特性开始减弱。一种极端情况是,在完全没有节点补偿的情况下,随着删除率  $c$  越来越大,幂指数  $\gamma$  逐渐趋近于无穷大,无标度特性将完全消失,这样的网络一方面因为接近随机网络,不能抵御网络的随机故障;另一方面,HUB 点非常罕见,通信枢纽奇缺,通信效率极低。产业集群进入平庸阶段,作为 HUB 节点的核心企业投资回报率降低,市场份额减少,甚至产值下降,节点数量不再增加,带动能力弱化,网络分化程度增加。同时,群内资源日渐短缺,成本攀升,例如土地涨价、劳动力短缺、基础生产资料(水、电、煤等)供应紧张等,众多小企业利润空间日渐收缩。占比极少的核心企业在面临针对核心企业的协同式影响或攻击时,群内核心企业的链接关系断裂(或弱化)严重,加上网络补偿功能不足,核心地位进一步下降甚至消失,产业网络甚至会溃散成彼此没有关联的小型孤岛。例如,一些传统劳动密集型产业集群在发展一定程度后,面临成本上升、同质化竞争激烈、价格战愈演愈烈的严峻形势,当核心企业面临品牌危机、外贸冲击、恶性竞争等打击时,核心企业收缩生产规模,大量减产或裁员,与众多配套小企业的关系链接严重丢失。产业网络内小企业生存处境进一步恶化,网络内链接补偿动力不足,产业集群很可能陷入衰退境地。因此,为避免这样的演化瓶颈,主要可以从两个关键方面入手:一是集群治理须重视利益分享机制的建设,防止环境或核心企业对大多数小企业利润的过度侵蚀,降低节点间关系断裂风险,提高连接的补偿重连概率;二是着重提升核心企业创新能力和抗风险能力,或培养新的核心企业,推进产业升级,防止集群因绩效下滑而走向解体。

## 五、结语

将产业集群视为复杂网络系统,能够从拓扑特性到网络结构及演化对集群系统进行较为深入的研究。本文通过构造一个基于 BA 无标度网络的改进的产业集群网络演化模型,整体上解释了产业集群网络演化过程,并提出了产业集群治理的相关对策。

本文重点考察产业集群网络演化机制对演化过程的影响,因此,为简化模型,假定所有企业均为同质节点,假定个体间的某一关系随时间发展没有强弱变化。没有考虑个体企业的节点异质性问题,也没有考虑链接关系在演化中的强度变迁问题,事实上,现实网络节点数量和种类繁多,链接关系复杂,且处于动态变化中。这些不足也是将来模型研究的若干方向。

## 参考文献:

- [1] KRUGMAN P. Geography and trade[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
- [2] PORTER M E. Clusters and the new economics of competition[J]. Harvard Business Review, 1998(12): 77-99.
- [3] 范如国, 许焯. 基于复杂网络的产业集群演化及其治理研究[J]. 技术经济, 2008, 27(9): 76-81.
- [4] 波特. M. 国家竞争优势[M]. 李明轩, 邱如美, 译. 北京: 华夏出版社, 2002.
- [5] 雷如桥, 陈继祥, 刘芹. 产业集群网络作用机制研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2004(12): 61-63.
- [6] 王涛. 复杂适应系统视角下中国产业集群演化研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2011.
- [7] BRENNER T, GREIF S. The dependence of innovativeness on the local firm population: An empirical study of German patents, industry and innovation[J]. Taylor & Francis Journals, 2006, 13(1): 21-39.
- [8] BAUM J, SHIPILOV A, ROWLEY T. Where do small worlds come from? [J]. Industrial and Corporate Change, 2003, 12: 697-725.
- [9] UZZI B, SPIRO J. Collaboration and creativity: The small world problem [J]. American Journal of Sociology, 2005, 111(2): 447-504.
- [10] 李昊, 曹宏铎. 集群演化网络模型与仿真研究[J]. 管理学报, 2010, 7(3): 453-461.
- [11] GULATI R. Social structure and alliance formation patterns: A longitudinal analysis[J]. Administrative Science Quarterly, 1995, 40(4): 619-652.
- [12] AHUJA G, POLIDORO F, MITCHELL W. Structure homophily or social asymmetry? The formation of alliances by poorly embedded firms[J]. Strategic Management Journal, 2009, 30(9): 941-958.

- [13] POWELL W W, WHITE D R, KOPUT K W, OWEN - SMITH J. Network dynamics and field evolution: The growth of interorganizational collaboration in the life sciences[J]. *American Journal of Sociology*, 2005, 110(4): 1132 - 1205.
- [14] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of "small world" networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440 - 442.
- [15] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509 - 512.
- [16] ANDERSON T, SERGER S S, SÖRVIK J, HANSSON E W. The cluster policies whitebook[M]. Holmbergs: IKED, 2004.
- [17] DOROGOVITSEV S N, MENDES J F F. Scaling behaviour of developing and decaying networks[J]. *Europhysics Letters*, 2000, 52(1): 33 - 39.
- [18] AIELLO W, CHUNG F, LU L Y. Random evolution in massive graphs[C]//Proceedings of the 42nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 2001: 510 - 519.
- [19] CHUNG F, LU L. Coupling online and offline analyses for random power law graphs[J]. *Internet Mathematics*, 2003 - 2004, 1(4): 409 - 461.
- [20] COOPER C, FRIEZE A, VERA J. Random deletion in a scale-free random graph process[J]. *Internet Mathematics*, 2003 - 2004, 1(4): 463 - 483.
- [21] SARSHAR N, ROYCHOWDHURY V. Scale - free and stable structures in complex ad hoc networks[J]. *Physical Review*, 2004, 69(2): 357 - 368.
- [22] 王林, 戴冠中. 复杂网络的度分布研究[J]. *西北工业大学学报*, 2006, 24(4): 405 - 409.
- [23] 唐芙蓉, 蔡绍洪, 李朝辉. 无标度网络的嵌入—删除—补偿模型的建立及分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(3): 390 - 393.
- [24] 胡平, 王文, 刘志华. 综合节点异质性、删除及 DPA 的网络演化模型[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(8): 1 - 7.
- [25] 高长元, 张树臣. 基于复杂网络的高技术虚拟产业集群网络演化模型与仿真研究[J]. *科学学与科学技术管理*, 2012, 33(3): 48 - 56.
- [26] 蔡宁, 黄纯. 集群风险与结构演化的复杂网络仿真研究[J]. *重庆大学学报: 社会科学版*, 2012, 18(1): 5 - 11.

## Study on the evolution model of industrial cluster networks from the perspective of complex networks

LI Xiaoqing

(School of Management, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, P. R. China)

**Abstract:** From the perspective of complex networks, this paper studies the evolution of industrial clusters through detailed research on the evolution mechanism and dynamics. That is, an improved industrial cluster network evolution model based on Barabási - Albert scale-free network model is constructed to depict the industrial cluster network evolution characteristics and process on a whole. This study focuses on the effect of nodes deletion dynamic and compensatory rewiring dynamic on industrial cluster network evolution process. The result shows that the improved model is degraded to classic Barabási - Albert scale-free network model if there is no nodes deletion dynamic in the evolution process and compensatory rewiring dynamic can protect the characteristic of scale-free to certain extent if nodes deletion dynamic exists in the process. The life cycle characteristic of industrial cluster network evolution process can be explained with the combination of these two dynamics. Finally, it provides the inside factors and management strategies of the industrial cluster network evolution from the mathematical analysis of the improved model.

**Key words:** complex networks; Barabási - Albert scale-free network model; nodes deletion dynamic; compensatory rewiring dynamic; evolution model

(责任编辑 傅旭东)