

基于创新合作网络的 产业集群知识扩散研究

黄玮强¹, 庄新田¹, 姚爽²

1 东北大学 工商管理学院, 沈阳 110819

2 沈阳化工大学 经济管理学院, 沈阳 110142

摘要: 创新合作网络是产业集群内部主体为适应创新复杂性的一种自组织涌现, 创新合作网络结构决定了网络功能并进而影响发生于网络上的集群知识扩散过程。建立基于创新合作网络的知识扩散模型, 在具有不同拓扑结构特征的规则网络、随机网络、小世界网络和无标度网络上, 运用仿真方法研究集群知识扩散规律。将知识扩散效率与创新合作关系距离相联系, 考虑知识的全局扩散效应。研究结果表明, 具有无标度特征的创新合作网络能最大限度地提升集群知识扩散深度、知识扩散速度、整体知识水平增长效率以及具有最高的知识资源配置效率, 创新合作网络中存在空间聚集的集群主体间倾向于具有相近的知识水平。最后给出促进最优创新合作网络安排的相关政策建议。

关键词: 产业集群; 创新合作网络; 知识扩散; 无标度网络

中图分类号: F263

文献标识码: A

文章编号: 1672-0334(2012)02-0013-11

1 引言

迈克尔·波特认为, 产业集群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的集合, 如美国硅谷的IT业、德国生物医药BioRiver集群、意大利利摩德纳生物谷、台湾新竹的微电脑芯片业、浙江温州的制鞋业等。产业集群本身是个创新系统, 集群内部的创新活动是集群发展的动力源泉。集群创新系统中的知识创造、知识学习及扩散是集群企业提升其自身创新能力的主要途径, 同时也是创新成功的先决条件。为应对创新活动中所需知识、技能和资源的多元化、复杂化发展趋势, 产业集群内部主体之间存在广泛的创新合作安排^[1], 如各种正式和非正式的合作关系。合作形式包括共建实验室或工程技术中心模式、技术联盟合作创新模式、以重大工程为依托的合作创新模式、以共建创新企业的方式引进外部先进技术和所需产品的企业孵化

器模式等。这些关系及其结构模式的总和构成产业集群创新合作网络。出于合作关系下的信任, 集群主体之间存在广泛的个体或组织知识学习和交流, 其中包括可编码的知识和隐含经验类知识。因此, 集群创新合作网络是知识传播扩散的载体, 它响应集群主体对知识的需求, 并使其能够接触新市场以及获取创新活动所需的新技术^[2-3]。

集群创新系统是个复杂系统, 它由集群主体、关系以及属性组成。集群主体包括核心企业、关联企业、科研机构、中介机构和金融机构等, 关系是主体之间的联系, 属性是指主体及其关系的特点^[4], 本研究局限于由合作属性构成的主体关系。集群创新合作网络是集群创新系统的网络化描述方式, 其中网络节点代表集群主体, 节点间的连边表示主体之间的创新合作关系。根据复杂性理论, 集群创新合作网络结构决定网络功能, 并进而影响发生在网络上

收稿日期: 2011-07-21 **修返日期:** 2011-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(71001022, 70871022, 70901017, 71001021); 教育部人文社会科学研究资助项目(09YJC630029); 中国博士后科学基金(20100471460); 中央高校基本科研业务费专项资金(N090406009)

作者简介: 黄玮强(1982-), 男, 福建长汀人, 毕业于东北大学, 获博士学位, 现为东北大学工商管理学院讲师, 研究方向: 复杂社会网络和产业集群等。E-mail: wqhuang@mail.neu.edu.cn

的动力学行为,如集群企业或机构间的知识扩散。本研究将知识扩散效率与合作关系距离相联系,建立知识的全局扩散机制,在具有不同拓扑结构特征的合作网络上,运用仿真方法研究产业集群的知识扩散规律。

2 相关研究评述

大量研究表明,集群创新合作网络具有普遍的拓扑结构特征,如小世界性和无标度性。蔡宁等^[5]通过对温州鞋革业和北京IT业集群的分析发现,集群中各成员之间的连接关系具有典型的小世界特征,同时发现小世界网络比规则网络具有更高的资源流动性和更广的资源整合范围,即更强的资源整合能力;龚玉环等^[6]通过对复杂网络结构分析发现,中关村产业集群具有短平均路径、高异质度分布、高聚集系数的结构特征。此外,英国剑桥和德国慕尼黑生物技术集群的职业联系网络^[7]以及中国杭州手机产业集群的企业网络^[8]都具备小世界网络的性质。Gay等^[9]研究发现,由于对核心能力的偏好依附,生物技术集群创新合作网络是个具有无标度特征的小世界网络;Powell等^[1]的研究也得出相似的结论。

一些学者研究网络结构与知识扩散之间的关系。Kim等^[10]基于社会网络分析方法研究创新合作网络结构对知识扩散绩效的影响,发现对于知识扩散,小世界网络是最公平且高效的网络结构类型;Cowan等^[11]研究发现,对于默示知识且技术机会较大时规则网络结构会产生较高的集群知识增长,当知识是编码化的且技术机会较小时无特定结构的交流会更好,他们的结论表明有益于高绩效的网络类型取决于集群本身的性质;Lin等^[12]的研究表明,无标度网络上的知识增长和扩散最快,同时可获得最优的知识转移绩效;王晓娟^[13]通过对浙江黄岩模具产业集群的实证研究发现,网络开放度和网络中心度对集群企业创新绩效存在正向影响;李志刚等^[14]基于小世界网络模型对集群知识增长过程进行建模,仿真研究发现,对于集群知识创新绩效而言,存在一个最优的网络节点局域世界规模;万幼清等^[15]从产业集群知识的流动机制、网络的联结机制和集群知识扩散的实现机制三方面对基于知识网络的产业集群知识扩散进行综合性研究;冯锋等^[16]用小世界网络模型分析产业集群,并运用特征路径长度和集团化系数表征集群成员间知识转移频率和聚集程度,旨在为促进产业集群发展提供一种新的分析思路。除网络结构外,影响产业集群知识扩散的因素很多,如知识的粘性^[17]、知识接收方的吸收能力^[18]以及集群环境^[19]等。

在知识扩散机制设计中,现有研究仅考虑了创新主体对其直接合作方的局部知识扩散,忽略了在集群创新合作背景下的知识间接扩散效应,进而没有考虑集群主体间的合作关系距离对知识扩散的影响。事实上,由于默许知识的不易传播性,合作关系距离直接影响知识扩散的效率,如直接合作关系下

的知识扩散显然要比通过第三方的间接合作知识扩散更高效。本研究建立的知识扩散模型将知识扩散效率与创新合作关系距离相联系,考虑知识的全局扩散效应,在产业集群创新合作网络载体上研究集群知识扩散规律,以期制定产业集群创新政策提供一定的参考和借鉴。

3 产业集群创新合作网络

3.1 网络描述

考虑一个由有限个集群主体(企业和机构)组成的产业集群,集群主体之间存在创新合作关系。将这些集群主体及它们之间的相互关系看做一个网络,其中网络的节点代表主体,全部节点的集合记为 $V, V = \{1, 2, \dots, n\}$, n 为集群主体数量;节点 i 与节点 j 之间的连线或者边代表它们相互之间存在的创新合作关系,记为 ij ;网络全部边的集合记为 g ,有 $ij \in g$ 。此时可将该网络记为 $G, G = \{V, g\}$,创新合作关系 ij 的确立是集群主体 i 和 j 的共同意愿,因此边 ij 没有方向,相应的创新合作网络 G 称为无向网络。在非空的创新合作网络 G 中,一条连接节点 i 和节点 j 的路径是由连通这两个节点之间的一组头尾相接的边组成的集合,路径的长度是该组边的个数。在网络 G 中连接节点 i 和 j 的所有路径的集合记为 $i \leftrightarrow j$ 。在 $i \leftrightarrow j$ 中的最短路径定义为节点 i 和 j 的合作关系距离,记为 $d(i, j)$ 。如果在网络 G 中节点 i 和 j 之间不存在连通的路径,则令 $d(i, j) = \infty$ 。特别地,节点 i 的直接合作邻居集合记为 $\Gamma_i, \Gamma_i = \{j \in V - \{i\} | d(i, j) = 1\}$ 。

产业集群创新合作网络拓扑结构特征主要包括网络平均路径长度、平均聚集系数和度分布。经典图论倾向于用规则的拓扑结构模拟真实网络,20世纪中叶,Erds等^[20]建立随机网络的基本模型。最近几年,学者们发现大量的真实网络(包括产业集群创新合作网络)既不是规则网络,也不是随机网络,而是具有与前两者皆不同的统计特征的网络,这样的网络被称为复杂网络,其诸多统计特征中最重要的是小世界效应和无标度特性^[20]。把网络中所有节点对的距离 $d(i, j)$ 求平均,得到网络的平均距离。用聚集系数衡量节点聚集成团的情况,单个节点的聚集系数被定义为它所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例。类似的,网络的平均聚集系数是所有节点聚集系数的平均值。何大韧等^[21]的研究表明,规则网络具有大的聚集系数和大的平均距离,随机网络具有小的聚集系数和小的平均距离,小世界网络介于规则网络和随机网络之间,它同时具有大的聚集系数和小的平均距离。

假设在网络 G 中,节点 i 的直接合作邻居集合 Γ_i 的规模为 k_i ,表示该节点所对应的主体 i 与其他 k_i 个主体存在合作关系,此时称 k_i 为主体 i 的度,网络中所有主体的度的平均值称为网络的平均度。在规则网络中,每个节点 i 具有相同的度且 $2 \leq k_i \leq n-1$;在随机网络和小世界网络中,节点的度分布是以某个均值 \bar{k} 为中心的对称分布;在无标度网络中,节点的

度分布符合幂律分布,因此将网络的幂律度分布特征称为网络的无标度性。

3.2 网络生成演化算法

为了比较分析不同的网络拓扑结构特征对产业集群知识扩散的影响,下面将基于规则网络、随机网络、小世界网络和无标度网络4种典型的网络模型进行研究,各网络的生成演化算法如下^[20]。

(1) 规则网络

在规则网络中, n 个节点依次排列于一维环形网络中,该网络具有周期边界条件。每个节点与其左右邻近的各 $\frac{\bar{k}}{2}$ 个节点存在连边, \bar{k} 为偶数,即每个节点具有相同的度(\bar{k})。

(2) 随机网络

根据 ER 随机网络模型生成随机网络。在一个具有 n 个节点的网络中,以概率 p 连接网络中的任意2个节点,此时网络约有 $\frac{pn(n-1)}{2}$ 条边。为了便于4种网络的横向比较,应使各网络具有相同的平均度 \bar{k} ,因而 $p = \frac{\bar{k}}{n-1}$ 。

(3) 小世界网络

根据 WS 小世界网络模型生成小世界网络。在上述的规则网络基础上,以概率 P 随机地重新连接网络中的每个边,即将边的一个端点保持不变,另一端点取为网络中随机选择的一个节点。规定任意两个不同的节点之间至多只能有一条边,并且每一个节点都不能有边与自身相连。当 P 较小时生成的网络具有小世界性,设 $P = 0.10$ 。为了保证网络的稀疏性和连通性,需要满足条件 $n \gg \bar{k} \gg \ln(n) \gg 1$ 。

(4) 无标度网络

根据 BA 无标度网络模型生成无标度网络。从一个具有 m_0 个节点的网络开始,在每一时期引入一个新的节点,并且连接到 $\frac{\bar{k}}{2}$ ($\frac{\bar{k}}{2} \leq m_0$) 个已存在的节点上。一个新节点与一个已经存在的节点 i 相连接的概率 Π_i 与节点 i 的度 k_i 之间满足如下关系,即

$$\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_{j=1}^n k_j} \tag{1}$$

在经过 T 步后,形成一个具有 $n = T + m_0$ 个节点和 $\frac{\bar{k}T}{2}$ 条边的无标度网络,该网络的平均度约为 \bar{k} 。

4 知识扩散模型和绩效度量

4.1 基本模型

作为一个开放的体系,产业集群创新系统的知识创造、知识学习和扩散同时受到内外部环境的影响。因此,集群主体知识增长的来源有3个,即依靠自身研发投入的知识创造、通过与其他主体的合作关系获取和吸收利用知识、主体从集群外部获取知识。由于驱动集群知识增长的动力主要来源于集群内部,因此在建模过程中只考虑前两种知识增长来源。

随着产业集群的发展,集群主体的知识储量及其分布也在不断变化。假设在 t 时期,主体 i 的知识储量为 $s_i(t), i = 1, 2, \dots, n$ 。集群主体的知识按如下方式演化。

(1) 知识创造

若在 t 时期,集群主体 i 完成创新活动,则在 $(t+1)$ 时期其知识增长为

$$s_i(t+1) = (1 + \alpha_i) s_i(t) \tag{2}$$

其中, α_i 为主体 i 的研发创新能力系数, $\alpha_i > 0$ 。从集群整体看,各主体的研发创新能力系数是独立同分布的随机变量。

(2) 知识扩散

在创新合作网络背景下,集群内部存在个体间、个体与组织间以及组织与组织间的知识扩散。在知识扩散过程中,知识接收方首先基于对知识发送方知识资源的理解,运用自有的知识挖掘能力识别出对自身有价值的部分;然后,通过运用各种正式或非正式的沟通渠道获取知识发送方的有益知识资源;最后,知识接收方将获得的有价值的知识在主体内部消化吸收,将学习到的知识内化为主体自身的知识资源。集群主体间知识扩散的效率取决于众多因素,如主体间的知识或技术差距和文化差距、知识接收方的知识吸收能力、合作网络结构、集群主体在网络中的合作关系距离等。

由上可知,两个主体的合作关系距离是相应网络节点间的最短路径。可以将节点间的最短路径看做是主体间知识扩散的最佳通路,如节点 i 和 j 的最短路径长度为 $d(i, j)$,说明集群主体 i 和 j 之间的知识流动至少要经过 $d(i, j) - 1$ 家不同的集群主体。两家集群主体间的最短路径越小,它们之间的知识扩散越便利,效率越高。极端情况下,若两家集群主体存在直接合作关系 ($d(i, j) = 1$),其知识扩散效率最高;若两家集群主体不存在知识扩散的通路 ($d(i, j) = \infty$),则它们之间不存在合作意义下的知识扩散。若集群主体 i 在 t 时期完成创新活动,则在 $(t+1)$ 时期它将作为知识发送方,集群内的其他主体作为知识接收方。知识发送方和知识接收方以特定的创新合作网络为载体完成知识扩散过程,在 $(t+1)$ 时期,集群主体 j 的知识水平变化为

$$s_j(t+1) = \begin{cases} s_j(t) + \delta^{d(i,j)} [s_i(t+1) - s_j(t)] & \text{若 } s_i(t+1) > s_j(t) \text{ 且 } d(i, j) \neq \infty \\ s_j(t) & \text{若 } s_i(t+1) < s_j(t) \text{ 或 } d(i, j) = \infty \end{cases} \tag{3}$$

其中, δ 为知识扩散的合作关系距离衰减系数(以下简称距离衰减系数), $0 \leq \delta \leq 1$ 。(3)式表明,若集群主体 i 在 $(t+1)$ 时期的知识水平高于主体 j 在知识扩散之前的知识水平,则后者可以通过合作关系最多获取前者比自己多的那部分知识,否则后者从前者处获取的知识量为零,这体现了集群创新合作中的知识互补。随着知识发送方与其直接或间接合作伙伴的合作关系距离的增大,后者从前者吸收的知

识呈指数递减,且 δ 越小,递减的速度越快。因而,距离衰减系数 δ 反映了集群主体间知识扩散的效率, δ 越小效率越低。(3) 式中 $j \in V - \{i\}$, 表示除知识发送方外的其他所有集群主体,它刻画了在创新合作背景下集群的全局知识扩散特征。

4.2 知识扩散绩效度量

集群主体的知识创造和知识扩散过程将提升集群的整体知识水平,同时改变主体的知识分布状况。下面从集群整体知识水平、知识水平分布均匀性、知识扩散速度以及知识的空间分布特征等方面度量集群知识扩散绩效。

(1) 整体知识水平

用集群主体的平均知识水平反映集群整体知识水平。在 t 时期,集群主体的平均知识水平为 $S(t)$, 即

$$S(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i(t) \tag{4}$$

(2) 知识扩散速度

在 t 时期,用集群主体平均知识水平的增长速度(相对于 $(t-1)$ 期) 衡量知识扩散速度 $\rho(t)$, 即

$$\rho(t) = \frac{S(t)}{S(t-1)} - 1 \tag{5}$$

(3) 知识水平分布均匀性

用集群主体知识水平的标准差度量知识水平分布的均匀性,标准差越大知识水平分布越不均匀,主体间的差距越悬殊。随着集群整体知识水平的提高,知识水平标准差也会增大。为了便于比较不同平均知识水平下的标准差大小,引入 t 时期的知识水平标准差系数 $c(t)$ 来衡量知识水平分布的均匀性,即

$$c(t) = \frac{\sigma(t)}{S(t)} \tag{6}$$

其中, $\sigma(t)$ 为 t 时期集群主体知识水平标准差。

(4) 知识水平的空间分布

知识的空间分布是指集群主体的知识水平与其空间位置之间的关系,即在空间位置上聚集的集群主体其知识水平的相似性或相异性。Moran 系数可以用来度量这种特征,定义如下^[12]。

$$M(t) = \frac{1}{\sigma^2(t)} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} \omega_{ij} [s_i(t) - S(t)] [s_j(t) - S(t)] \tag{7}$$

$$\omega_{ij} = \frac{X(i,j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} X(i,j)} \tag{8}$$

其中, $M(t)$ 为 Moran 系数,它是空间自相关分析中的常用指标,用于检验某一要素的属性值是否与其相邻空间点上的属性值相关联,该系数为相关系数公式的空间推广。 X 为采用邻接标准定义的空间权重矩阵, $X(i,j)$ 为节点 i 和 j 是否有直接连边,若有则 $X(i,j)$ 等于 1,反之为 0。Moran 系数取值范围介于 -1 和 1 之间,若其值接近于零则说明知识的空间分布

具有随机性,其值为正数说明具有相近知识水平的集群主体倾向于产生空间聚集,其值为负数说明知识水平差异较大的集群主体易产生空间聚集。

5 数值仿真过程和结果

数值仿真参数设计如下。产业集群主体数量 $n = 500$, 创新合作网络平均度 $\bar{k} = 6$, 初始时刻 ($t = 0$) 集群主体的知识水平服从 $(0, 1)$ 均匀分布。集群主体的研发创新能力系数 $\alpha = a\bar{\alpha}$, 其中 a 为服从 $(0, 1]$ 均匀分布的随机变量, $\bar{\alpha}$ 为系数上限,这里假设 $\bar{\alpha} = 1$ 。下面将研究不同网络类型下的知识扩散规律,同一组参数重复仿真运算 20 次,取它们的平均值作为最终的结果,仿真计算通过 Matlab 7.3 软件编程实现。

5.1 集群整体知识水平增长

随着时间的推移,企业不断从事创新活动,完成知识创造,并在一定的集群创新合作网络载体上实现知识的全局扩散。在这一过程中,集群主体的平均知识水平变化反映了集群整体知识水平的动态变化。图 1 为当距离衰减系数 $\delta = 0.20$ 时,4 种不同网络类型下集群整体知识水平的演化情况。 δ 取其他值时结论与此类似,限于篇幅不再赘述。从图 1 可以看出,不同网络类型下的集群知识水平增长差异较大,且随着距离衰减系数的增大,这种差异也在不断扩大。在同一时期,集群整体知识水平从高到低排列依次为无标度网络、随机网络、小世界网络和规则网络。这说明在相同条件下(网络规模和节点平均度相等),相对于其他网络类型,具有无标度特征的集群创新合作网络能最大限度地提升集群知识扩散深度,使集群整体知识水平达到一个较高的水平。

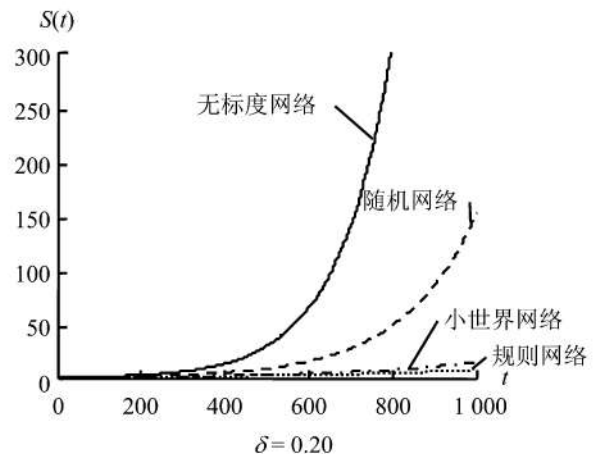


图 1 不同网络类型下集群整体知识水平演化情况
Figure 1 Integral Knowledge Level Evolutions of Industry Clusters under Different Networks

图 1 是在既定的参数条件下 20 次仿真运算结果的平均值。下面运用单因素方差分析法检验在每一个演化时期 (t), 基于不同的网络类型得出的结论(均值)是否存在显著性差异。具体地,在每一个演化时期,每种网络类型下的集群整体知识水平有 20

个不同的样本值,通过这些样本值计算相应的 F 统计量(服从 $F(k-1, n-k)$ 分布, $k=4, n=20$) 及其相伴概率值,进而判断各均值是否有显著差异,这意味着需要进行 T (总演化时期数) 次独立的方差分析。图2为当 $\delta=0.20$ 和 $\delta=0.80$ 时,不同演化时期下方差分析的 F 统计值和相伴概率 p (内嵌小图)。从图2可以看出,当 $\delta=0.20$ 时,不同演化时期下方差分析 F 统计值的相伴概率均小于显著性水平0.05,这说明在演化的全过程中,4种不同类型网络下集群的整体知识水平具有显著差异。当 $\delta=0.80$ 时,在演化的很大一部分时期内, F 统计值的相伴概率大于显著性水平0.05,说明此时4种不同网络类型下集群的整体知识水平没有显著差异。

上述方差分析结果表明,不同网络下集群整体知识水平演化的差异性与 δ 有关。通过进一步分析发现,当 $\delta \geq 0.67$ 时,他们之间不存在显著性差异(至少

在演化的某些时期);当 $\delta < 0.67$ 时,在演化的全过程中他们之间均存在显著性差异。

集群整体知识水平的增长速度反映了知识扩散的速度,图3为当 $\delta=0.20$ 时,不同网络类型下集群整体知识水平的增长速度演化情况。当 δ 取其他值时结论与此类似,不再赘述。从图3可以看出,在各演化时期,不同网络类型下的集群整体知识水平增长速度在一定的区间范围内上下波动。每一时期,无标度网络下集群整体知识水平增长速度大约为0.70%~1%,随机网络下的增长速度约为0.50%~0.70%,小世界网络下的增长速度约为0.35%~0.40%,规则网络下的增长速度约为0.25%~0.35%,说明集群整体知识水平的增长速度较为稳定。此外,在相同条件下相对于其他网络类型,具有无标度特征的集群创新合作网络能最大限度地提升集群知识扩散速度和集群整体知识水平增长效率。

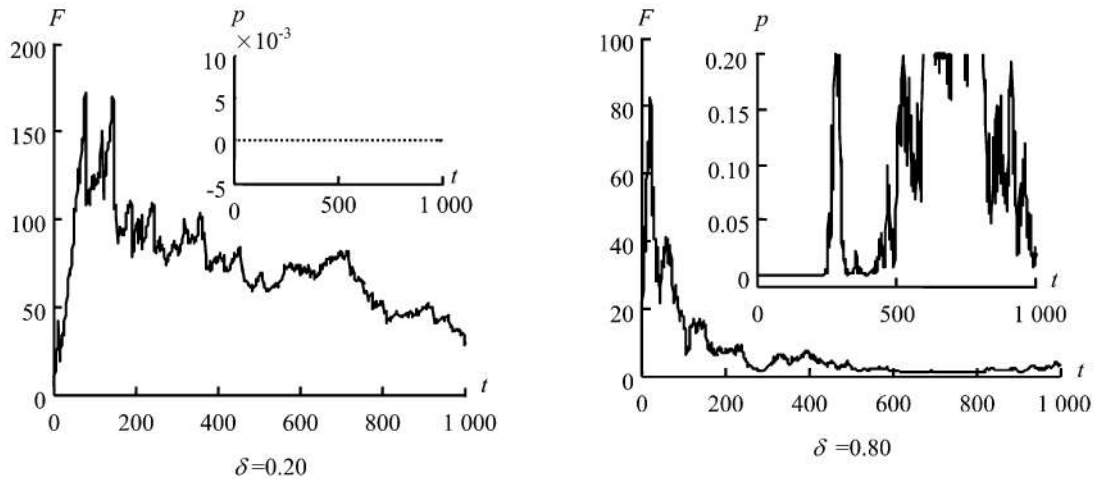


图2 不同网络类型下集群整体知识水平演化的差异显著性检验
Figure 2 Analysis of Variance of Integral Knowledge Level Evolutions of Industry Clusters under Different Networks

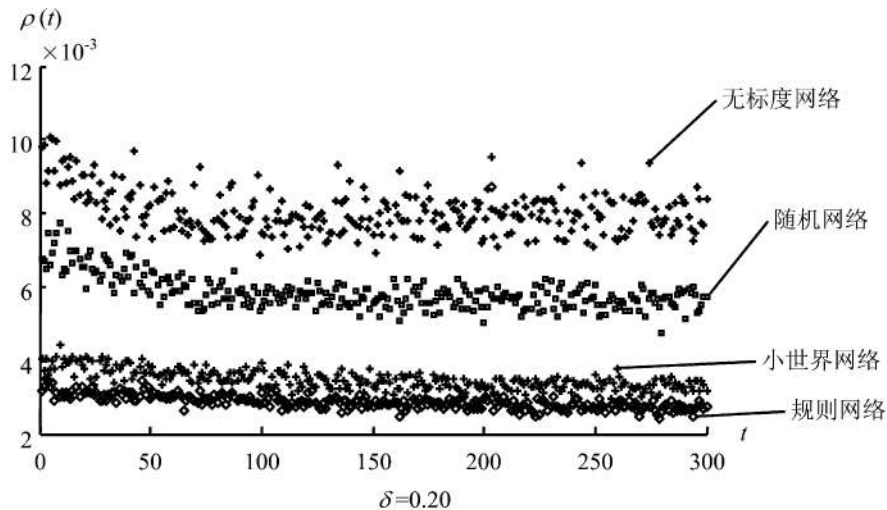


图3 不同网络类型下集群整体知识水平增长速度演化情况
Figure 3 Integral Knowledge Level Growth Rate Evolutions of Industry Cluster under Different Networks

在不同网络类型和距离衰减系数下,记集群主体平均知识水平增长到特定值 S^* 所需的时期数为 t^* ,即满足 $S(t^*) = S^*$ 。 t^* 数值大小反映集群整体知识水平的增长速度, t^* 越大说明集群整体知识水平增长到 S^* 所需时间越长,增长速度越慢,反之增长速度越快。图4给出在不同网络类型和距离衰减系数下,集群整体知识水平达到数值100所需的时期数,即 $S(t^*) = 100$ 。当 S^* 取其他值时结论与此类似,不再赘述。从图4可以看出,在同一个网络中随着距离衰减系数的增大, t^* 呈指数函数形式递减,即集群整体知识水平增长速度呈指数递增。在距离衰减系数相同的情况下,各网络类型 t^* 数值从大到小排列依次为规则网络、小世界网络、随机网络和无标度网络,说明无标度网络下的集群整体知识水平增长速度最快,验证了图3的结论。

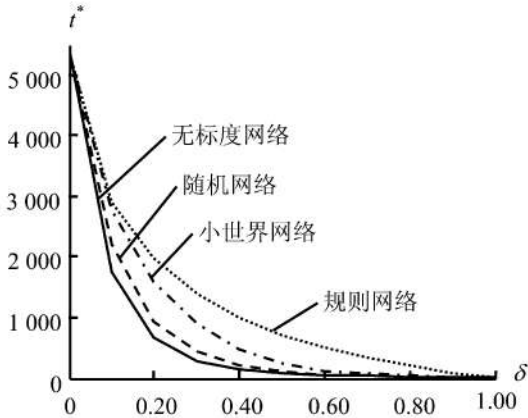


图4 不同 δ 值下集群整体知识水平达到数值100所需的时期数变化

Figure 4 Least Time Step Number as Integral Knowledge Level of Industry Cluster Arrives at 100 under Different δ

图5给出对于不同的 δ 值,4种网络类型下集群整体知识水平达到数值100所需时期数(均值)的差异显著性检验。从图5可以看出,除 $\delta=0$ 或 $\delta=1$ 外, F 统计值的相伴概率(内嵌小图)均小于显著性水平0.05,说明此时不同网络下的结果具有显著性差异。

综上,无标度集群创新合作网络下的知识扩散是最高效的。根据知识扩散机制,网络中知识发送方和知识接收方的合作关系距离越小后者的知识吸收越充分。规则网络具有较强的局部耦合性,网络节点间的距离较大,不利于知识的扩散。小世界网络和随机网络虽然聚集程度较低,但它们拥有一些长程捷径连接,大大缩小了节点间的合作关系距离,因而相对于规则网络具有更高的知识扩散效率。无标度网络拥有大量度值小的节点和少量度值大的节点,后者称为关键节点,关键节点的中枢性拉近了网络节点间的距离。当关键节点所代表的集群主体进行创新活动时,它可以迅速地将知识扩散到其他主体。当非关键节点所代表的集群主体进行创新活动时,它会以一个较大的可能性与关键节点有连接,这样可通过与关键节点的合作关系将知识间接地扩散给其他主体。因此,无标度网络的这种特殊拓扑结构特征使其拥有最高的知识扩散效率。

5.2 集群主体知识水平分布均匀性

集群主体平均知识水平代表集群的整体知识水平,但其无法刻画集群主体间的知识分布状况。集群整体知识水平能够用来反映集群创新合作网络上的知识扩散效率,而集群主体知识水平分布均匀性则反映了网络的知识资源配置效率。分布越均匀,网络的知识资源配置效率越高,越具公平性。图6为当 $\delta=0.20$ 时,不同网络类型下的集群主体知识水平标准差系数演化情况。当 δ 取其他值时结论与此类似,不再赘述。从图6可以看出,随着时间的演进,

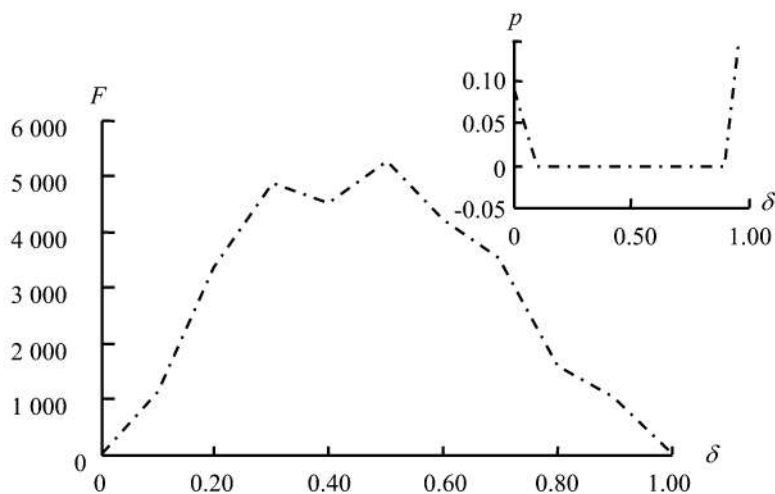


图5 不同 δ 值下集群整体知识水平达到数值100所需时期数的差异显著性检验

Figure 5 Analysis of Significance of Least Time Step Number as Integral Knowledge Level of Industry Cluster Arrives at 100 under Different δ

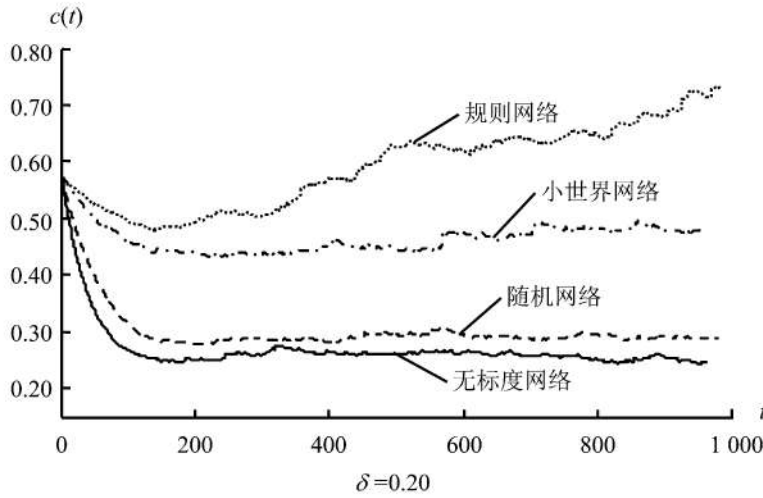


图 6 集群主体知识水平标准差系数演化情况

Figure 6 Standard Deviation Coefficient Evolutions of Knowledge Level of Industry Cluster

规则网络下的集群主体知识水平标准差系数不断增加,小世界网络、随机网络和无标度网络下的集群主体知识水平标准差系数在先经历短暂的下降后保持在一个稳定的水平。在整个演化时期,无标度网络下的集群主体知识水平标准差系数始终低于其它 3 种网络类型。这说明具有无标度特征的集群创新合作网络的知识资源配置效率越高,各集群主体均能较为公平地、稳定地享受集群整体知识增长带来的好处。

图 7 为当 $\delta = 0.20$ 时,不同演化时期下方差分析的 F 统计值和相伴概率 p (内嵌小图)。

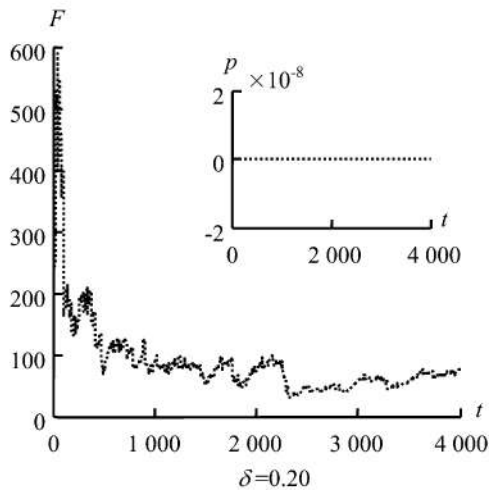


图 7 集群主体知识水平标准差系数演化的差异显著性检验

Figure 7 Analysis of Significance of Standard Deviation Coefficient Evolution of Knowledge Level of Industry Cluster

从图 7 可以看出,相伴概率 p 均小于显著性水平 0.05,说明对于不同的演化时期,不同网络类型下集

群主体知识水平标准差系数具有显著性差异。进一步分析发现,当 δ 取其他值时结论与此类似,不再赘述。

为了更好地了解不同 δ 值下各网络类型集群主体知识水平标准差系数的平均变动情况,计算一定演化时期 (T) 内的标准差系数平均值 \bar{c} , $\bar{c} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T c(t)$,如图 8 所示,其中 $T = 4000$ 期。

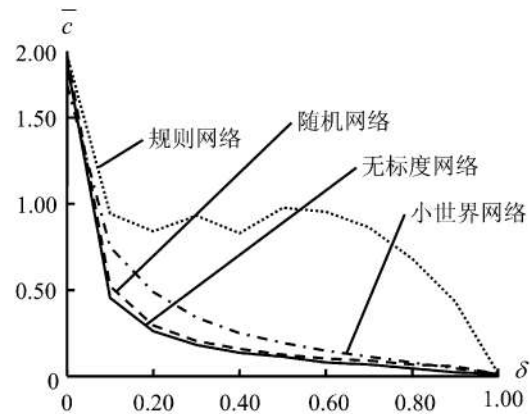


图 8 不同 δ 值下集群主体知识水平标准差系数平均值变化

Figure 8 Average Standard Deviation Coefficients of Knowledge Level Industry Cluster under Different δ

从图 8 可以看出,随着距离衰减系数的增大,无标度网络、随机网络和小世界网络下的标准差系数平均值呈指数递减,规则网络下的标准差系数平均值呈缓慢下降趋势,这说明集群主体间知识扩散效率的提高(增大距离衰减系数)可以迅速提升集群的知识资源配置效率。图 8 同时也验证了相对于其他网络类型,无标度集群创新合作网络在提高集群

主体知识水平分布均匀性方面的优势。

图9为对于不同的 δ 值,4种网络类型下集群主体知识水平标准差系数平均值的差异显著性检验。从图9可以看出,除 $\delta=0$ 或 $\delta=1$ 外, F 统计值的相伴概率(内嵌小图)均小于显著性水平0.05,说明此时不同网络下的结果具有显著性差异。

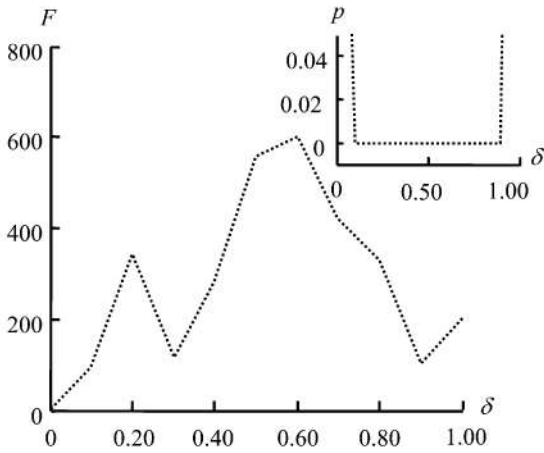


图9 不同 δ 值下集群主体知识水平标准差系数平均值的差异显著性检验

Figure 9 Analysis of Significance of Average Standard Deviation Coefficients of Knowledge Level of Industry Cluster under Different δ

5.3 集群主体知识水平的空间分布

Moran 系数用于衡量集群主体知识水平的空间分布状况,(7)式表明 Moran 系数随着演化时期的变化而变化。为了解在整个演化时期(T)内 Moran 系数的平均变化情况,计算该时期内 Moran 系数的平均值 \bar{M} , $\bar{M} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T M(t)$,如图10所示, $T = 2000$ 期。

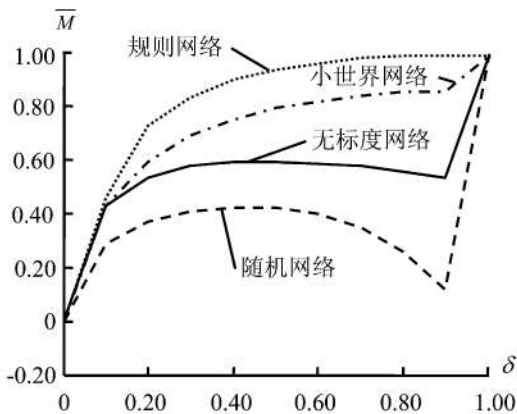


图10 不同 δ 值下各网络的 Moran 系数平均值变动

Figure 10 Average Moran Coefficient of Each Network under Different δ

从图10可以看出,当 $\delta=0$ 时各网络类型的 Moran

系数平均值等于零,知识的空间分布具有随机性,这是因为此时不存在集群主体间的知识扩散效应;当 $\delta=1$ 时各网络类型的 Moran 系数平均值等于1,此时集群主体间可实现完全知识扩散,它们的知识水平没有差异;当 $\delta \neq 0$ 和 $\delta \neq 1$ 时,各网络类型的 Moran 系数平均值均处于(0,1)区间,说明在集群创新合作网络中存在空间聚集的集群主体间具有相近的知识水平。当 $\delta \in (0,1)$ 时,随着 δ 的增大,规则网络和小世界网络中产生空间聚集的集群主体间的知识相近程度也在不断增大;随着 δ 的增大,无标度网络和随机网络中的知识相近程度先增大后减小。此外由图10可知,不同 δ 值下,各类型网络的 Moran 系数平均值从大到小排列依次为规则网络、小世界网络、无标度网络和随机网络,说明规则网络中产生空间聚集的集群主体间知识水平的相近程度要大于其他3种类型的网络。

图11为对于不同的 δ 值,4种网络类型下 Moran 系数平均值的差异显著性检验。从图11可看出,除 $\delta=1$ 外, F 统计值的相伴概率(内嵌小图)均小于显著性水平0.05,说明此时不同网络下的结果具有显著性差异。

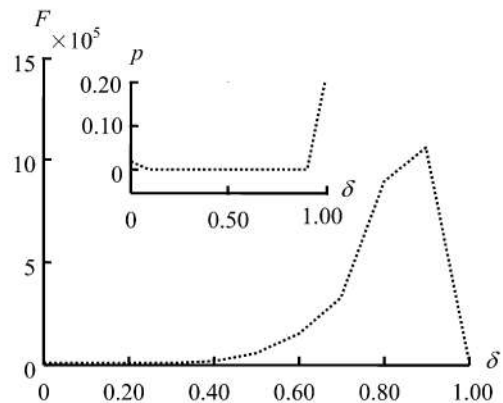


图11 不同 δ 值下各网络类型的 Moran 系数平均值的差异显著性检验

Figure 11 Analysis of Significance of Average Moran Coefficient of Each Network under Different δ

5.4 集群主体知识水平的动态演化机制

下面通过分析集群主体知识水平的动态演化机制进一步理解集群创新合作网络中的知识扩散过程。图12为在不同类型的网络中,集群主体知识水平在不同演化时期的变化情况,横轴表示各集群主体的网络编号($n=500$),纵轴为各集群主体在不同时期的知识水平,包括 $t=0$ 、 $t=100$ 、 $t=1000$ 和 $t=10000$ 共4个时期。在初始时期($t=0$),各网络类型中的集群主体知识水平均呈随机均匀分布。在接下来的演化过程中,由于各网络类型的拓扑结构特征差异,集群主体知识水平的演化情况也有所不同。

规则网络具有较强的局部聚集性和较长的网络

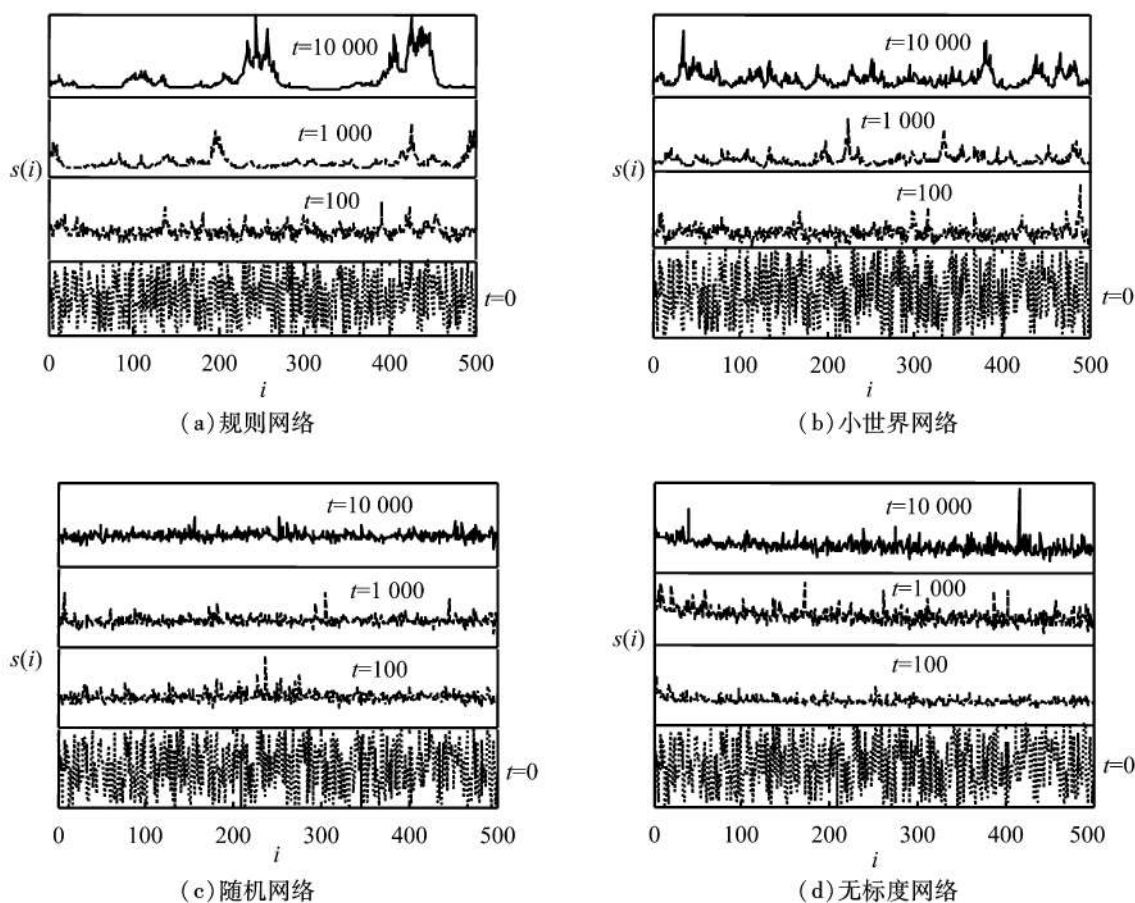


图12 不同时期各网络中的集群主体知识水平演化

Figure 12 Knowledge Level of Industry Cluster under Different Networks

路径长度,知识被创造出来后一般在局部区域内扩散,“外围”主体获得的知识溢出量较少,使得在整个知识扩散过程中集群主体的知识水平逐渐分化。如图12(a)所示,当 $t=10\,000$ 时规则集群创新合作网络中出现明显的知识聚集现象,即一部分相邻主体具有较高的知识水平,另外一部分相邻主体的知识水平较低。

小世界网络具有一定的局部聚集性,同时拥有一定数量的“长程捷径”连接。当知识被创造出来后,除了在局部区域内扩散外,还通过这些“捷径”连接迅速扩散给“外围”集群主体。这使得在知识扩散过程中,集群主体间虽然仍存在一定程度的知识聚集,但总体来看主体间的知识水平差异较小,如图12(b)所示。

随机网络中的节点连接具有完全随机性,节点的度值几乎相同,节点之间的网络距离也较小。当知识被创造出来后随机地在网络成员中扩散,知识扩散的选择性较弱,进而使集群主体知识水平差异较小,如图12(c)所示。

无标度网络的关键拓扑结构特征是它存在少量的度值大的节点,在知识扩散过程中,这些节点能够优先便捷地获取新知识,进而也使新知识能够迅速

有效地扩散给与其相连接的其他度值小的节点。因此,无标度网络中的集群主体间知识水平差异也较小,但存在少量集群主体(度值较大)具有较高的知识水平,如图12(d)所示。

6 结论

本研究通过建立基于集群创新合作网络的知识扩散模型,在具有不同拓扑结构特征的4种典型网络中,运用仿真方法研究产业集群的知识扩散规律。为便于网络间的横向比较,考虑4种网络具有相同条件,即网络规模和网络节点平均度相等。在知识扩散机制设计中,将知识扩散效率与集群主体间的合作关系距离相联系,并考虑知识的全局扩散效应,得到如下研究结论。

(1)在相同条件下相对于其他网络类型,具有无标度特征的集群创新合作网络能最大限度地提升集群知识扩散深度,使集群整体知识水平达到一个较高的水平。当集群主体间知识扩散效率小于特定的临界值时($\delta \leq 0.67$),各网络类型下的集群知识扩散深度具有显著差异。

(2)在相同条件下相对于其他网络类型,具有无标度特征的集群创新合作网络能最大限度地提升集

群知识扩散速度和集群整体知识水平增长效率。当知识扩散效率不等于0或1时,各网络类型下的集群知识扩散速度具有显著差异。在同一网络中,集群整体知识水平增长速度随集群主体间知识扩散效率的提高呈指数递增。

(3)在相同条件下相对于其他网络类型,具有无标度特征的集群创新合作网络的知识资源配置效率最高,此时各集群主体均能较为公平、稳定地享受集群整体知识增长带来的好处。方差分析结果表明,不同网络类型下的知识资源配置效率具有显著差异。在同一网络类型中,集群主体间知识扩散效率的提高可以迅速提升集群的知识资源配置效率。

(4)一般情况下,集群创新合作网络中存在空间聚集的集群主体间倾向于具有相近的知识水平,规则网络中产生空间聚集的集群主体间知识水平的相近程度大于其他3种类型的网络。从总体上看,不同网络类型下的集群主体知识水平的空间分布状况具有显著差异。

从集群知识扩散的深度、速度和知识资源配置效率看,具有无标度特征的集群创新合作网络是最优的网络安排。由无标度网络生成演化算法可知,网络节点的连续增加以及合作关系的偏好依附是网络产生无标度特征的必要条件。无标度性的直接体现就是网络中存在少量中枢节点,它们具有相对较大的度值。因此,在产业集群创新政策制定中,应通过内部鼓励和外部吸引相结合的方式,鼓励集群边缘企业和机构以及吸引外部主体积极参与到集群创新合作中来,以促成合作网络节点的持续动态增长。还应扶持和培育若干家具有较大影响力的重点企业和机构,以这些企业和机构为龙头并依托大型合作项目,吸引集群内其他主体与之展开各种形式的创新合作,形成合作中强者愈强的马太效应,尤其是“核心-边缘”型的合作关系应是网络发展的重点。

参考文献:

- [1] Powell W W, White D R, Koput K W, Owen-Smith J. Network dynamics and filed evolution: The growth of interorganizational collaboration in the life sciences [J]. *American Journal of Sociology*, 2005, 110(4): 1132-1205.
- [2] Hagedoorn J, Duysters G. Learning in dynamic inter-firm networks: The efficacy of quasi-redundant contacts [J]. *Organization Studies*, 2002, 23(4): 525-548.
- [3] Ge Z, Hu Q. Collaboration in R&D activities: Firm-specific decisions [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(2): 864-883.
- [4] 李文博,张永胜,李纪明. 集群背景下的知识网络演化研究现状评介与未来展望[J]. *外国经济与管理*, 2010, 32(10): 10-19.
Li Wenbo, Zhang Yongsheng, Li Jiming. Research present status and development tendency of knowledge network evolutions in the industrial clusters [J]. *Foreign Economics & Management*, 2010, 32(10): 10-19. (in Chinese)
- [5] 蔡宁,吴结兵,殷鸣. 产业集群复杂网络的结构与功能分析[J]. *经济地理*, 2006, 26(3): 378-382.
Cai Ning, Wu Jiebing, Yin Ming. The structure and function of industrial clusters' complex networks [J]. *Economic Geography*, 2006, 26(3): 378-382. (in Chinese)
- [6] 龚玉环,卜琳华,孟庆伟. 复杂网络结构视角下中关村产业集群创新能力分析[J]. *科学与科学技术管理*, 2009, 30(5): 56-60.
Gong Yuhuan, Bu Linhua, Meng Qingwei. An analysis of Zhongguancun industrial cluster's innovation ability based on complex network structure [J]. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2009, 30(5): 56-60. (in Chinese)
- [7] Casper S, Murray F. Careers and clusters: Analyzing the career network dynamic of biotechnology clusters [J]. *Journal of Engineering and Technology Management*, 2005, 22(1/2): 51-74.
- [8] 杨锐,黄国安. 网络位置和创新: 杭州手机产业集群的社会网络分析[J]. *工业技术经济*, 2005, 24(7): 114-118.
Yang Rui, Huang Guoan. The network position and innovation: A social network analysis on Hangzhou mobile telephone industry cluster [J]. *Industrial Technology & Economy*, 2005, 24(7): 114-118. (in Chinese)
- [9] Gay B, Dousset B. Innovation and network structural dynamics: Study of the alliance network of a major sector of the biotechnology industry [J]. *Research Policy*, 2005, 34(10): 1457-1475.
- [10] Kim H, Park Y. Structural effects of R&D collaboration network on knowledge diffusion performance [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(5): 8986-8992.
- [11] Cowan R, Jonard N, Ozman M. Knowledge dynamics in a network industry [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2004, 71(5): 469-484.
- [12] Lin M, Li N. Scale-free network provides an optimal pattern for knowledge transfer [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2010, 389(3): 473-480.
- [13] 王晓娟. 知识网络与集群企业创新绩效: 浙江黄岩模具产业集群的实证研究[J]. *科学学研究*, 2008, 26(4): 874-879, 867.
Wang Xiaojuan. The relationship between knowledge network and innovation performance for cluster firms: Evidence from Huangyan mould cluster in Zhejiang [J]. *Studies in Science of Science*, 2008, 26(4):

- 874-879,867. (in Chinese)
- [14] 李志刚, 汤书昆, 梁晓艳, 肖伟科. 基于网络结构的产业集群知识创新和扩散绩效[J]. 系统工程, 2007, 25(5): 1-8.
Li Zhigang, Tang Shukun, Liang Xiaoyan, Xiao Weike. Performance of knowledge innovation and diffusion in the industry clusters based on network structure [J]. Systems Engineering, 2007, 25(5): 1-8. (in Chinese)
- [15] 万幼清, 王战平. 基于知识网络的产业集群知识扩散研究[J]. 科技进步与对策, 2007, 24(2): 132-134.
Wan Youqing, Wang Zhanping. Research on network-based knowledge diffusion of industrial cluster [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2007, 24(2): 132-134. (in Chinese)
- [16] 冯锋, 王凯. 产业集群内知识转移的小世界网络模型分析[J]. 科学学与科学技术管理, 2007, 28(7): 88-91.
Feng Feng, Wang Kai. Analysis on knowledge transfer based on small-world network model in the industrial cluster [J]. Science of Science and Management of S. & T., 2007, 28(7): 88-91. (in Chinese)
- [17] Zander U, Kogut B. Knowledge and the speed of the transfer and imitation of organizational capabilities: An empirical test [J]. Organization Science, 1995, 6(1): 76-92.
- [18] Cohen W M, Levinthal D A. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation [J]. Administrative Science Quarterly, 1990, 35(1): 128-152.
- [19] Simon B L. Ambiguity and the process of knowledge transfer in strategic alliances [J]. Strategic Management Journal, 1999, 20(7): 595-623.
- [20] Erdos P, Renyi A. On the evolution of random graphs [J]. Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960, 5: 17-61.
- [21] 何大韧, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 147-158.
He Daren, Liu Zonghua, Wang Binghong. Complex systems and complex networks [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 147-158. (in Chinese)

Study on Knowledge Diffusion of Industry Clusters Based on the Innovation Cooperation Network

Huang Weiqiang¹, Zhuang Xintian¹, Yao Shuang²

1 School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110819, China

2 School of Economics and Management, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China

Abstract: The innovation cooperation network is a kind of self-organization and emergence of industry clusters for adapting to innovation complexity. The structure of innovation cooperation network determines cooperation network functions and then influences the knowledge diffusion process of industry clusters. By building the knowledge diffusion model based on innovation cooperation network, we study on the industry clusters knowledge diffusion rules on different networks, such as regular network, stochastic network, small world network and scale-free network by simulations. The study connects knowledge diffusion efficiency to the distance of innovation cooperation relationship and considers the whole-network diffusion effects. The results demonstrate that the scale-free network has a most fast knowledge diffusion rate, highest average knowledge level and highest allocation efficiency of knowledge resource. The space clustering bodies in the innovation cooperation network tend to have similar level of knowledge. At last, we present some policy proposals on how to facilitate best innovation cooperation network arrangements.

Keywords: industry clusters; innovation cooperation network; knowledge diffusion; scale-free network

Received Date: July 21st, 2011 **Accepted Date:** December 3rd, 2011

Funded Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China (71001022, 70871022, 70901017, 71001021), the Humanities and Social Sciences supported by the Ministry of Education of China (09YJC630029), the China Postdoctoral Science Foundation (20100471460) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (N090406009)

Biography: Dr. Huang Weiqiang, a Fujian Changting native (1982 -), graduated from Northeastern University and is a lecturer in the School of Business Administration at Northeastern University. His research interests include complex social network and industry cluster, etc.

E-mail: wqhuang@mail.neu.edu.cn

□