

高技术企业联盟知识扩散研究^①

——基于小世界网络的视角

孙耀吾, 卫英平

(湖南大学工商管理学院, 长沙 410082)

摘要: 知识通过网络可以加快扩散. 作者基于 NW 小世界网络视角, 构建高技术企业联盟知识扩散模型, 揭示联盟的知识扩散特性, 并运用 MATLAB 软件进行模拟仿真. 研究发现, 减小网络的特征路径长度、增大网络的集聚系数和提高成员间的知识交流频率是促进高技术企业联盟知识扩散、提高创新效率、加快知识创新的有效途径.

关键词: 小世界网络; 高技术企业联盟; 知识扩散; 特征路径长度; 集聚系数; 知识交流频率
中图分类号: F204 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2011)12-0017-10

0 引言

以知识资源为基础的竞争是知识经济时代企业竞争的重要特征, 持续地获取创新性知识是企业提高创新能力和核心竞争力的重要基础. 知识创新及扩散水平已成为衡量国家创新能力的关键指标. 高技术企业联盟具有较大的知识存量和较强的知识创新能力, 企业通过联盟网络可以加快获得创新性知识. 研究高技术企业联盟知识扩散特性与规律对提高企业知识创新效率、探索国家创新系统建设途径具有重要意义.

知识通过网络可以加快扩散, 但是人们对网络性质、网络中的知识扩散效果及影响因素等尚少研究. 基础网络结构会显著影响社会系统行为, 尤其是知识扩散^[1]. Zakharov^[2]认为基于因特网的社会网络服从指数为 3.45 的幂律分布, 是节点高度集聚的小世界网络. 杨玉兵和胡汉辉^[3]分析了社会网络情景中的知识转移活动, 指出不同的网络结构对知识转移的作用是不同的. Hsu 和 Shih^[4]构建了基于时间、流动性和接近性的模型研究国际航空联盟的网络连接能力和效率, 应用

小世界网络的捷径对联盟航线做了概念性分析. Guseo 和 Guidolin^[5]提出了创新扩散过程的二阶段模型, 认为沟通网络对创新意识是必要的. 专利引用是衡量技术扩散的重要有效指标, 某一专利的引用次数越多, 相关技术就扩散得越多^[6]. 复杂知识不易扩散, 即使是在产生它的社会圈子内也是这样, 但是适度的复杂知识随着社会网络进行高保真性扩散, 并允许接收者吸收和创新所扩散知识^[7]. 赵正龙等^[8]利用反协调博弈刻画了个体的差异化选择特征, 分析了复杂社会网络上的扩散过程及其影响因素. 结论表明, 网络结构特征变化能够显著影响采用者数量.

近来学者们尤为关注网络中空间距离因素对知识扩散的影响. Wong 等^[9]将空间因素引入随机网络, 认为两个节点连接的可能性依赖于节点之间的空间距离, 符合社会网络的一般性质, 包括小世界性质和社区结构等性质. Kilduff 等^[10]从 4 种不同的组织中分析 116 个能感知到的友谊网络, 发现能感知到的网络比实际网络表现出更大的小世界性质, 人们感知到的比实际存在的网络具有更高的集聚性. Carayol 和 Roux^[11]在网络联

① 收稿日期: 2009-12-21; 修订日期: 2011-01-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70572058); 国家社会科学基金资助项目(06BJY022); 教育部人文社会科学研究资助项目(09YJA790066).

作者简介: 孙耀吾(1963—), 女, 湖南湘乡人, 博士, 教授. Email: sunyaowu731@hotmail.com

系模型中引入空间变量来描述不同代理人联系的战略构建,发现对于中等水平的知识转移能力,网络表现出小世界性质。

综上,国内外学者大多是从网络的空间距离、知识扩散效果等方面研究小世界网络的特性,而对网络中企业的知识扩散问题研究较少,对网络性质的研究结论尚需进一步检验;并且未涉及高技术企业联盟的知识扩散问题,后者恰恰是知识经济中创新管理的重要研究主题。

1 研究方法 with 模型

1.1 研究方法

小世界网络是指具有较小的特征路径长度又具有较大的集聚系数的网络,它是近年来复杂性网络研究的新成果,在现实网络中广泛存在,主要用于研究信息技术和传染病扩散等问题。基于人类社会关系的小世界模型由 Watts 和 Strogatz^[12] 于 1998 年提出(简称 WS 模型),具体从一个包含 N 个节点的环状规则网络开始,每个节点向与它最近邻的 K 个节点连出 K 条边,并假定 $N \gg K \gg \ln N \gg 1$,每条边的一个端点保持不变,另一个端点以概率 p 重新进行连接,通过调节 p 值就可以完成从完全规则网络 ($p = 0$) 向完全随机网络 ($p = 1$) 的过渡。Newman 和 Watts^[13] 进一步指出当网络的随机度趋于 0 时,特征路径长度出现临界点(简称 NW 模型)。WS 小世界网络是通过改变网络的某个节点连接形成的;NW 小世界网络则是在开始时无直接联系的节点间建立新的联系,而并不改变原有节点的联系,并通过引入捷径加强网络之间的联系。现实中,企业联盟的网络联系特征与 NW 小世界网络更为接近,尤其是高技术企业联盟,随着信息技术的发展,处于不同地理位置的企业通过网络进行技术合作和知识交流等,地理位置不再成为联盟的障碍,联盟呈现出小世界特征,即联盟网络中,各企业之间的间隔实际很“近”。凭借合作研发使不同空间的企业紧密联系在一起,联系的增强会促进联盟成员创新知识的快速扩散。所以,发轫于“小世界”研究的网络化方法,在解决知识扩散与传播速度、平均知识水平,以及系统关联的有效性等方面比其他网络模型有明显优势^[14-15]。

本文应用 NW 小世界网络理论构建高技术企业联盟知识扩散模型,研究网络的知识扩散特性,揭示网络的集聚系数、特征路径长度以及交流频率对知识扩散的影响机理,并通过模拟仿真进行测试分析,探索提高企业和联盟知识创新效率、促进知识增长的新途径。

1.2 基于小世界网络的高技术企业联盟知识扩散模型

高技术企业是高知识积累和快速知识创新兼具型企业,快速的知识创新能力是他们长期竞争优势的最重要源泉。他们具有较强的吸收外界扩散知识的能力,能够将吸收的知识快速融合成自身知识并创造出新知识,并进入知识扩散循环。联盟成员通过合作、共享和扩散新知识,加快知识的创新速度,从而提高整个联盟的知识水平。同时,由于联盟成员大多是同行业或相近行业,知识具有较大的同质性,科技人员素质较高,而扩散知识大多与联盟合作相关,因此,企业对联盟扩散知识的吸收能力差距不大。借鉴 Moukarzel^[16] 关于小世界网络多维系统的传播原理,假设高技术企业联盟网络的某一企业 A 以速度 $v = 1$ 向开放系统中扩散知识,企业建立新联系的节点密度为 $\rho = 2p$, p 为开始无直接联系的企业建立新联系的概率。高技术企业对知识的扩散具有周期性,不同时期企业所扩散的知识量是有差异的,即使企业与外界的交流频率较高,但让外部知识融入企业自身的知识库并创造出新知识也是需要时间的,同时知识扩散具有非排他性,即系统中的扩散知识不因某个企业的吸收而消失或减小。如果保持网络中各企业联系的畅通性,则知识在网络中的扩散一般是连续的。由于网络的复杂性和多维性,取高技术企业联盟网络的维度为 d ,因此,网络中接收到企业 A 所扩散知识的企业量 $V(t)$ 近似为以 A 为圆心,以时间 t 为半径的球体 $\Gamma_d t^{d-1}$,其中 Γ_d 是企业的知识吸收能力系数,对于不同的企业会有所差异,对于同一企业在不同的时期也存在差异,但在某一特定时期为常数。现实中,由于企业的地理位置的差异,高技术联盟网络的知识扩散呈现极不规则的形态。知识扩散源在知识扩散过程中碰到新联系节点的概率为 ρ 从而接受到知识扩散的企业增加量为 $\rho \Gamma_d t^{d-1}$ 。因此,高技术企业联盟网络中接收到扩散知识的平均企业量

$V(t)$ 可表示为

$$V(t) = \Gamma_d \int_0^t [1 + 2pV(t - \tau)] d\tau \quad (1)$$

对上式作标度变换和微分后可得

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t^d} = 1 + V(t) \quad (2)$$

解得

$$V(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{t^{dk}}{(dk)!}, \quad d = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式(3)反映接收到扩散知识的企业量 $V(t)$ 与时间 t 的关系。 $V(t)$ 随着时间 t 的增大而逐渐增大, 即知识扩散的范围随着时间 t 的延长而逐渐扩大。由于知识在扩散过程中存在时滞, 同时, 联盟成员之间的竞争、联盟对成员的筛选以及网络的畅通性等都会对知识扩散过程产生影响。因此, 高技术企业联盟知识扩散方程^[10] 可以修正为

$$\frac{d^d V(t)}{dt^d} = \xi + V(t - \delta) - \mu \xi V^2(t - \delta) \quad (4)$$

其中, $\xi = 1/(2pkd)^{1/d}$, μ 为知识扩散的阻碍系数, 由式(4)可以看到, 联盟知识扩散不仅与企业之间建立新联系的概率有关, 而且与知识扩散的时滞有关。随着信息与网络技术的发展, 知识扩散的时滞 δ 会逐渐减小。联盟通过成员间的互利共赢, 加强知识共享与信息联系以及建立信任机制等减小知识扩散的阻碍因素。

2 基于小世界网络的高技术企业联盟知识扩散特性

联盟本身所具有的小世界网络特性, 是分析联盟合作创新的基础, 它会影响知识扩散的效率和程度。联盟知识扩散特性是针对某种网络结构下知识扩散机理和规律的描述, 由联盟结构和成员性质决定。现实中, 成员流动性大, 企业相互之间的联系极其复杂和多变^[17], 本文主要通过网络特征路径长度、集聚系数和知识交流频率等特性分析, 揭示联盟知识扩散的机理和规律。

2.1 特征路径长度

在高技术企业联盟网络中, 单个企业(亦即知识主体)是网络中的节点, 企业之间的技术交流与信息联系即是网络中的边, 单个企业知识存

量的增长依赖于自身的知识创新能力、近邻企业的知识外溢以及对网络中扩散知识的吸收能力。假设高技术企业联盟网络可表示为由知识主体节点集 V 和节点间联系组成的边集 E 组成的图 $G = (V, E)$ ^[18], 其中, 知识主体数量记为 $N = |V|$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$, 节点连接边数即联盟中某个知识主体与其他成员的联系数记为 $M = |E|$, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_l\}$ 。知识主体进行联系的边集 E 中每条边都有 V 中一对知识主体与之相对应。网络中任意两个知识主体 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点最短路径上的边数, 即知识主体 i 和 j 发生联系必须与其中间成员进行联系的次数的最小值。任意两个知识主体之间的距离最大值称为网络的直径 D , 即

$$D = \max_{i,j} d_{ij} \quad (5)$$

高技术企业联盟网络的特征路径长度 L 定义为任意两个知识主体间距离的平均值, 即

$$L = \frac{1}{N(N-1)/2} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (6)$$

假设每个知识主体都与它左右相邻的 $K/2$ 个企业进行联系 (K 为偶数), 联盟成员为了获得网络中扩散的大量知识, 以概率 p 选取新的知识主体进行直接联系。由于任何两个不同的知识主体之间只会存在 1 条边, 并且每一个知识主体都不能有边与自身相连, 因此, 基于 NW 小世界模型, 通过在规则网络随机加边, 把修正后的特征路径长度^[19] 表示为

$$L(p) = \frac{2N}{K} f(NKp/2) \quad (7)$$

其中, $f(u)$ 为普适标度函数, 满足

$$f(u) = \begin{cases} \text{常数}, & u \ll 1 \\ (\ln u)/u, & u \gg 1 \end{cases} \quad (8)$$

在实际的高技术企业联盟网络中, 虽然知识主体很多, 但网络的特征路径长度却很小。特征路径长度 L 的增加速度最多与网络规模 N 的对数成正比。因此, 知识主体之间较短的特征路径长度表明各知识主体之间的联系比较紧密, 即使两个企业之间不存在直接联系, 也可以通过中间企业存在着较为便捷的间接联系, 从而促进知识在网络中的扩散。保持网络的稳定性, 则有利于知识扩散的畅通性。若网络中存在大量的扩散知识, 较小的

特征路径长度减小了企业接受扩散知识的时滞, 较快增加自身的知识存量, 并通过知识创新向网络中扩散新知识, 最终提高整个联盟的知识水平。

2.2 集聚性

在高技术企业联盟网络中, 与某一知识主体直接联系的两个企业间很可能也存在直接联系, 这种属性称为网络的聚类特性。假设联盟中一个知识主体 i 有 k_i 条边将它和其他知识主体相连, 这 k_i 个知识主体就称为 i 的邻居, 它们最多可能有 $k_i(k_i - 1)/2$ 条边。将这 k_i 个知识主体之间实际存在的边数 E_i 和总的可能的边数 $k_i(k_i - 1)/2$ 之比定义为联盟网络中知识主体 i 的聚类系数 C_i , 即

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (9)$$

整个网络的聚类系数 C 就是所有知识主体 i 的聚类系数 C_i 的平均值, 用来描述网络的局部特征, 其中, $0 \leq C \leq 1$ 。 $C = 0$, 当且仅当所有的知识主体均为孤立节点, 即各企业之间没有任何联系; $C = 1$, 当且仅当网络是全局耦合的, 即网络中任意两个知识主体都直接相连。然而, 现实的高技术企业联盟网络既不是完全随机的, 也不是完全规则的, 而是在某种程度上具有类似于社会关系网络中“物以类聚, 人以群分”的特性。

基于 NW 小世界模型, 将修正后的高技术联盟网络聚类系数^[20] 表示为

$$C(p) = \frac{3(K - 2)}{4(K - 1) + 4Kp(p + 2)} \quad (10)$$

网络聚类系数的大小表明联盟成员之间的相似化程度, 聚类系数越大, 表明高技术企业的相似化程度较高, 即拥有的知识是同质化的, 企业之间的知识交流较为容易; 反之, 相似化程度较低, 企业之间的知识交流较为困难。高集聚系数使企业容易吸收网络中的扩散知识, 在短时间内提高自身的知识存量并通过自身创新扩散新知识, 但也可能造成企业只关注本行业企业的联系, 忽视与其他行业的联系。由于差异性知识是企业获取知识创新的重要来源, 因此, 高技术企业联盟网络除保持适度的集聚水平外, 还应加强与其他行业的弱联系, 引入具有不同类型知识的成员, 在知识扩散的同时不断创造出新知识。因此, 在联盟中, 某个知识主体与其他企业建立新联系可以显著提高网络的集聚水平, 促进联盟成员大量、频繁的知识

交流, 加快知识在网络中的扩散。

将知识主体 i 的度 k 定义为与其直接相连的其他企业的数目。在高技术企业联盟网络中, 一个知识主体的度越大意味着它在网络中的地位越重要, 是网络中的关键节点。知识主体的度分布情况可以用分布函数 $P(k)$ 来描述, 所有知识主体 i 的度 k_i 的平均值称为网络的平均度, 记为 $\langle k \rangle$ 。在 NW 小世界模型中, 每个知识主体至少有 K 个企业与之相连, 当 $k \geq K$ 时, 一个随机选取的知识主体的度为 k 的概率为

$$P(k) = \binom{N}{k - K} \left(\frac{Kp}{N}\right)^{k-K} \left(1 - \frac{Kp}{N}\right)^{N-k+K} \quad (11)$$

当 $k < K$ 时 $P(k) = 0$ 。在高技术企业联盟网络中, 保持网络的畅通性, 提高知识扩散的效率, 就必须增强关键节点的稳定性。网络中任何一个或几个关键节点的丧失, 都会对网络的稳定性造成巨大冲击。因此, 联盟应鼓励具有较小节点度的企业之间积极建立新的联系, 以参与网络的巨大收益约束关键节点, 减小网络运行的潜在风险。一个高效的联盟既要保持知识在网络中有较快的扩散速度, 又要保持知识分布具有一定的不均匀性。企业之间的知识势差是联盟知识扩散的重要原因, 不仅有利于保持知识网络的稳定性, 也使网络中存在一定的竞争压力, 促使企业不断的吸收网络中的扩散知识并通过自身创新扩散新知识, 从而保持联盟较高的知识水平。

2.3 知识交流频率

邓丹等^[21] 发现, NPD 团队成员之间的相似程度越高, 他们之间的交流频率越大, 交流频率 ϵ_{ij} 与最短路径长度 d_{ij} 之间近似存在倒数关系, 即

$$\epsilon_{ij} = \frac{k}{d_{ij}} \quad (k \text{ 为常数}) \quad (12)$$

随着时间的变化, 联盟成员之间可能会建立新联系, 使两企业之间的最短路径长度 d_{ij} 减小, 加快知识的传播和扩散。企业之间的新联系不会影响联盟的原有联系, 但会减小某些节点的最短路径长度 d_{ij} 。因此, 最短路径长度 d_{ij} 具有随时间 t 而减小的特性, 式 (12) 可修正为

$$\epsilon_{ij}(t) = \frac{k}{\min d_{ij}(t)} \quad (13)$$

上述关系如图 1、图 2 所示。

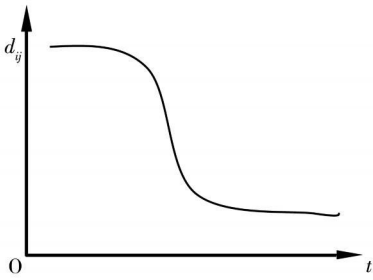


图 1 最短路径长度 d_{ij} 与时间 t 的关系

Fig. 1 Relationship between minimum path length d_{ij} and time t

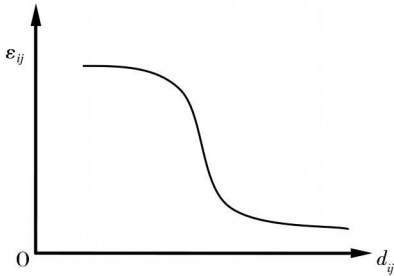


图 2 交流频率 ϵ_{ij} 与 d_{ij} 的关系

Fig. 2 Relationship between communication frequency ϵ_{ij} and d_{ij}

由图 1 可以看出,最短路径长度 d_{ij} 与时间 t 成反向 S 关系,开始时平坦曲线表示网络中某两个企业虽然建立了新联系,但他们之间的知识交流存在时滞.经过一段适应期后,企业之间的知识交流进入实质性阶段,最短路径长度 d_{ij} 逐渐减小.由于企业对自身的核心知识会严加保护, d_{ij} 随时间 t 会逐渐趋于平坦,此时,企业的知识交流频率达到最高水平.图 2 表示,随着两节点间 d_{ij} 的增大,交流频率 ϵ_{ij} 会逐渐减小,并且 ϵ_{ij} 随 d_{ij} 的增大也呈反向 S 曲线.交流频率 ϵ_{ij} 越大,企业之间的知识扩散越容易,即网络的平均路径长度 L 越短,知识在网络中的扩散越容易.因此,联盟中单个企业 i 扩散的知识量 F_i 与企业自身的知识存量 A_i 成正比,与企业间的交流频率 ϵ_{ij} 成正比,与最短路径长度 d_{ij} 成反比,即

$$F_i = \frac{cA_i \epsilon_{ij}}{d_{ij}} \tag{14}$$

式中 c ($0 \leq c \leq 1$) 为比例常数,表示企业知识扩散的意愿大小.由式 (14) 可知,企业知识扩散的意愿越强,自身的知识存量越大,交流频率 ϵ_{ij} 越大,最短路径长度 d_{ij} 越小,则企业的知识扩散量越多.高技术企业联盟网络的知识扩散量是各知识主体所扩散的知识量的叠加,可近似表示为

$$F = \sum_{i \neq j} F_i = \sum_{i, j \in G} \frac{c_i A_i \epsilon_{ij}}{d_{ij}} \tag{15}$$

在高技术企业联盟网络中,单个企业的知识吸收量 B 与网络中的知识扩散量 F 成正比,与自身的知识吸收能力成正比,与网络的平均路径长度 L 成反比,可以表示为

$$B = \frac{\alpha F}{L} \tag{16}$$

其中, α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 为知识吸收系数,表示企业的知识吸收能力大小,由于企业不可能吸收网络中扩散的所有知识,因此, α 通常小于 1,但在某一特定时期保持不变.由式 (16) 可知,高技术企业联盟网络的平均路径长度越短,知识扩散量越多,则企业的知识吸收量越多.由于网络的平均路径长度和知识扩散量是由联盟成员决定,单个企业的影响比较有限,因此,企业应不断提高知识吸收能力,增大自身的知识存量.

3 数值分析

运用 MATLAB 软件对上述基于小世界网络的高技术企业联盟知识扩散模型与特性进行数值模拟与分析检验.

3.1 模型检验

若不考虑时滞 δ 高技术企业联盟中接收到扩散知识的企业量 $V(t)$ 与时间 t 的变化关系如图 3 所示, $V(t)$ 随知识主体近邻数 K 和时间 t 的变化趋势如图 4 所示.由图可知, $V(t)$ 随 t 的增大而增加,同时,与知识扩散源相联系的知识主体近邻数 K 越多,知识扩散的速度越快. K 越大, t 越大,知识在联盟网络中的扩散速度越快,接收到扩散知识的企业就越多.

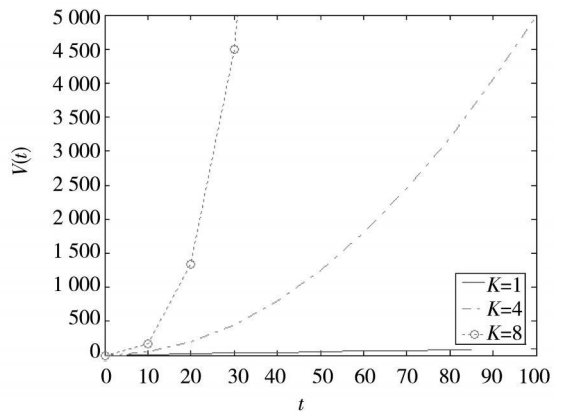


图 3 $\delta=0, K=1, 4, 8$ 时, $V(t)$ 随 t 的变化曲线

Fig. 3 When $\delta=0, K=1, 4, 8$, change curves of $V(t)$ with t

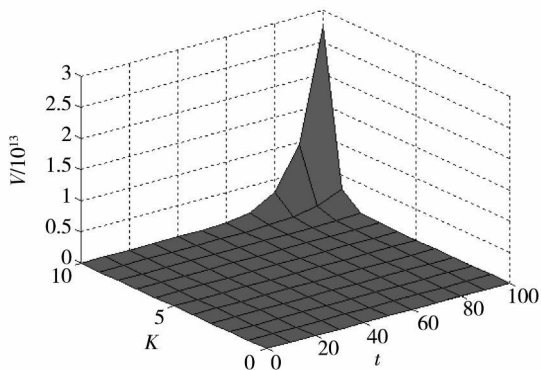


图4 $\delta=0$ 时, $V(t)$ 与 K, t 的关系

Fig.4 When $\delta=0$, relationship between $V(t)$ and K and t

考虑时滞的情形如图5、图6和图7所示。从图5可知,当 K 一定时,对于不同的 $\delta V(t)$ 随时间 t 的增大而增大,但 $V(t)$ 曲线的形状大致相同,即时滞 δ 只影响联盟网络中企业接受扩散知识的时间,影响联盟网络中知识扩散的速度,而不会改变曲线 $V(t)$ 的形状。图6表明,当时滞 $\delta=2$ 时, $V(t)$ 随着 K 的增大而迅速增加,即较多的知识主体近邻数 K 有利于知识的快速扩散;与知识扩散源直接联系的企业越多,知识扩散的速度越大。图7表示存在时滞时 $V(t)$ 随 K, t 的变化趋势。分别对比图3和图6、图4和图7发现,对于同一 K 值, $V(t)$ 随时间的变化曲线形状相同,从而存在时滞的 $V(t)$ 曲线可通过平移得到。说明时滞只会影响企业接受联盟扩散知识的时间,由于时滞不可避免,加大成员与知识扩散源的联系,即增大知识主体近邻数 K ,可加快联盟知识扩散。

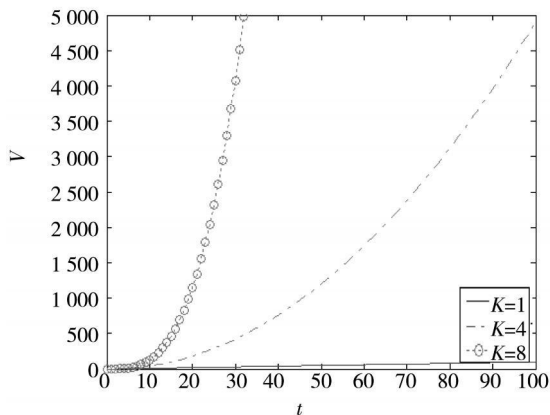


图6 $\delta=2, K=1, 4, 8$ 时, $V(t)$ 随 t 的变化曲线

Fig.6 When $\delta=2, K=1, 4, 8$, change curves of $V(t)$ with t

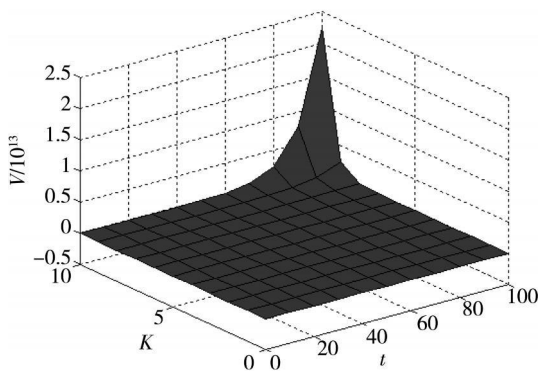


图7 $\delta=2$ 时, $V(t)$ 与 K, t 的关系

Fig.7 When $\delta=2$, relationship between $V(t)$ and K and t

3.2 特性检验

高技术企业通常有较多的知识存量,而形成网络集聚的动力就是整合有限资源,加快知识和技术创新。因此,高技术企业联盟具有较多的知识主体节点,为了较快地获得联盟网络的创新性知识,企业会加强与知识创新能力较强的节点联系,使某些知识主体的节点度较大。目前我国平均每个高技术企业拥有4~5个战略合作伙伴,其中大型企业的伙伴数目通常在10个以上^[21],取高技术企业联盟中某个知识主体近邻数 $K=10$,当网络节点数 $N=100, 500, 1000$ 时,联盟特征路径程度 $L(p)$ 与企业建立新联系的概率 p 的关系(式(7))如图8所示。当网络节点数 $N=1000$,知识主体近邻数 $K=4, 10, 16$ 时, $L(p)$ 与 p 的关系如图9所示。

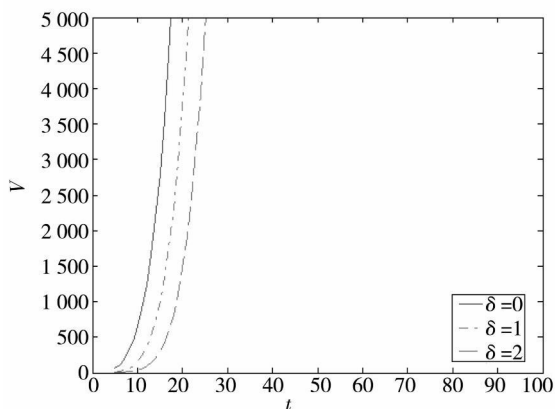


图5 $\delta=0, 1, 2$ 时, $V(t)$ 随 t 的变化曲线

Fig.5 When $\delta=0, 1, 2$, change curves of $V(t)$ with t

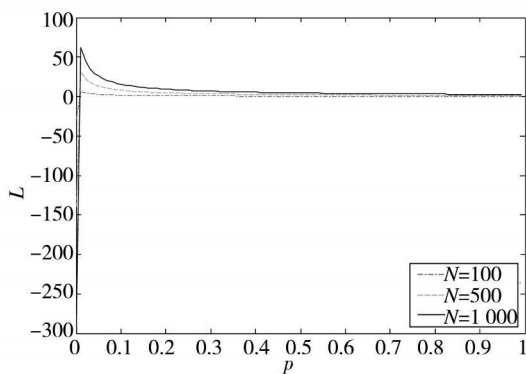


图 8 $K = 10, N = 100, 500, 1\ 000$ 时, $L(p)$ 与 p 的关系

Fig. 8 When $K = 10, N = 100, 500, 1\ 000$, relationship between $L(p)$ and p

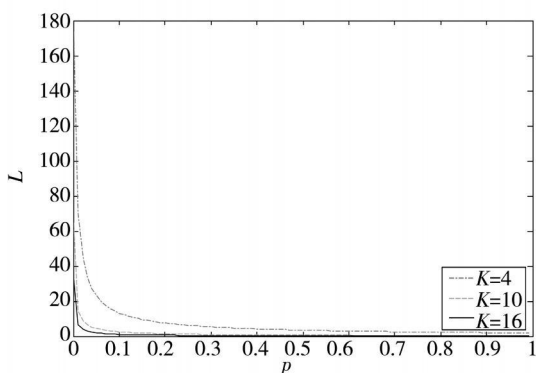


图 9 $N = 1\ 000, K = 4, 10, 16$ 时, $L(p)$ 与 p 的关系

Fig. 9 When $N = 1\ 000, K = 4, 10, 16$, relationship between $L(p)$ and p

由图 8 可知, 高技术企业联盟网络中, 当某一知识主体近邻数一定时, 网络的特征路径长度 $L(p)$ 在较小的概率范围 $p \leq 0.1$ 内随 p 先增加后减少, 当 $p > 0.1$ 时, $L(p)$ 随 p 的增加逐渐趋向于 0. 这表明知识主体建立新联系的概率 p 在 0.1 附近时, 网络呈现明显的小世界特性, 即 $p \approx 0.1$ 时, 网络的特征路径长度较小, 知识在网络中的扩散程度较大. 随着网络节点数 N 的增大, $L(p)$ 曲线逐渐向上移动, 表明网络的特征路径长度 $L(p)$ 随着网络节点数 N 的增加而变大, 从而减缓联盟的知识扩散速度, 造成知识扩散的迟滞, 因此, 较大的网络节点数不利于网络中的知识扩散. 由上可知, 联盟的知识扩散不仅与网络特征路径长度 $L(p)$ 成负相关关系, 而且与网络节点数 N 成负相关关系. 网络节点数的增大引起的知识扩散迟滞可能是由知识主体间的知识传播能力和知识交流频率所决定的. 图 9 表示联盟中的知识主体数 N 一定时, K 取不同值时 $L(p)$ 随 p 的变化曲线. 由图 9 可知, $L(p)$ 随 p 的变化曲线与图 8 相似, 随着

知识主体近邻数 K 的增加, $L(p)$ 曲线向左下方移动, 表明较大的 K 值减小高技术企业联盟网络的特征路径长度, 从而促进联盟的知识扩散. 在现实的高技术企业联盟中, 若是现有联盟成员建立新联系, 知识在联盟网络中的扩散速度就会加快, 因为这些新联系减小了知识传播所经历的平均路径长度; 若是联盟吸收了新成员, 则会由于新加入企业知识吸收能力和知识范围存在差异, 使创新知识在网络中传播的平均路径长度增大, 减慢知识扩散速度.

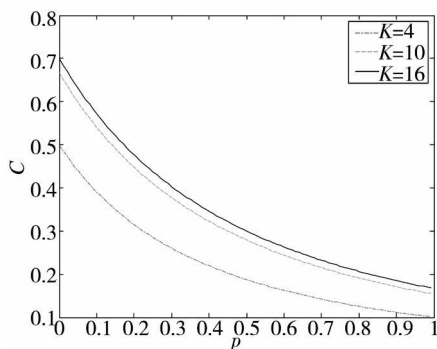


图 10 $K = 4, 10, 16$ 时, $C(p)$ 随 p 的变化曲线

Fig. 10 When $K = 4, 10, 16$, change curves of $C(p)$ with p

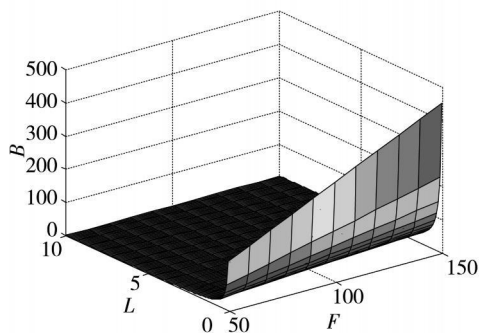


图 11 α 一定时, B 与 L 和 F 的关系

Fig. 11 When α is certain, relationship between B and L and F

图 10 反映的是, 当高技术企业联盟的某一知识主体近邻数 K 一定时, 网络的集聚系数 $C(p)$ 随着知识主体与其他企业连接概率 p 的增加而逐渐减小, 当 p 较小时, $C(p)$ 较大, 网络较大的集聚系数有利于网络中的知识扩散, 提高整个高技术企业联盟的知识水平. 随着 K 的增加, $C(p)$ 曲线逐渐向右上方移动, 表明较大的 K 值可以提高网络的集聚系数, 因此, 增加知识主体近邻数 K 是加快高技术企业联盟知识扩散的有效途径. 现实中, 随着联盟合作范围的扩大和成员之间联系的密切,

与单个企业直接相连的知识主体节点数增多,促进企业频繁地共享和交流知识,加快知识扩散。

图 11 表示,当知识主体的知识吸收能力 α 在某一时期保持不变时,某个企业的知识吸收量 B 与高技术企业联盟的扩散知识量 F 以及特征路径长度 L 之间的关系. 由图 11 可知,企业对扩散知识的吸收依赖于较小的特征路径长度,并随联盟扩散知识量的增加而增加,即 L 越小, F 越大,则 B 越大. 因此,要提高企业的知识吸收量就必须减小网络的特征路径长度并增大高技术企业联盟的知识扩散量。

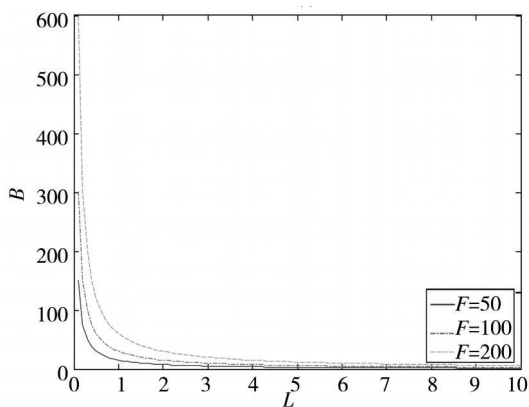


图 12 F 一定时, B 随 L 的变化趋势

Fig. 12 When F is certain, change tendency of B with L

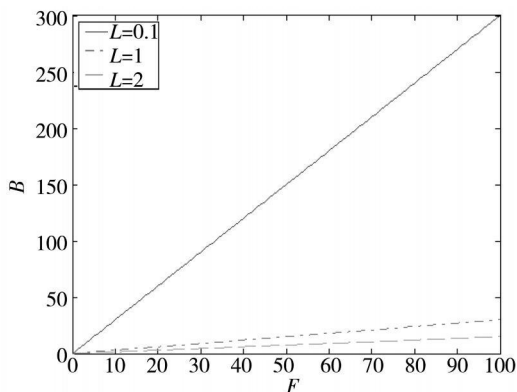


图 13 L 一定时, B 随 F 的变化趋势

Fig. 13 When L is certain, change tendency of B with F

图 12 表明,高技术企业联盟在网络中扩散知识量一定时,较小的特征路径长度 L 有利于企业对扩散知识的吸收,随着网络中知识扩散量 F 的增加,曲线 B 逐渐向右上方移动,表明网络中知识扩散量的增加提高企业的知识吸收量. 虽然不同高技术企业的知识吸收能力存在差异,但不会影响曲线 B 的形状以及知识扩散量增加时曲线 B 的

变化趋势,吸收能力的差异可以通过曲线的平移进行调整. 由图 13 可知, L 一定时, B 随 F 的增加而增大,当 L 增加时,曲线 B 向右下方移动,表明 L 的增大减小联盟的知识扩散。

图 14 揭示,较小的最短路径长度 d_{ij} 促进高技术企业联盟网络的知识扩散,交流频率 ϵ_{ij} 的提高显著加快联盟的知识扩散,即 d_{ij} 越小, ϵ_{ij} 越大,则 F 越大. 企业的知识吸收能力差异对联盟的知识扩散会有一定影响,但对于知识同质化较高的高技术企业联盟,随着交流频率的增加,扩散知识也会得以快速吸收. 因此,高技术企业联盟网络的最短路径长度 d_{ij} 和企业间的交流频率 ϵ_{ij} 决定了联盟在某一时期的知识扩散量。

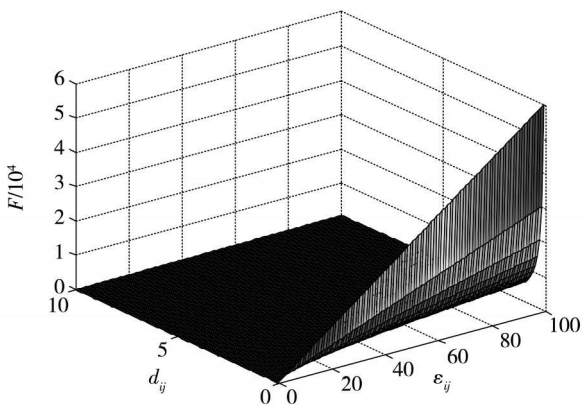


图 14 A 一定时, F 与 d_{ij} 、 ϵ_{ij} 的关系

Fig. 14 When A is certain, relationship between F and d_{ij} and ϵ_{ij}

4 结束语

综上,基于小世界网络理论构建的高技术企业联盟知识扩散模型及数值分析与检验表明,高技术企业联盟网络表现出显著的小世界特性,企业在网络中吸收的知识量与特征路径长度成反比,与联盟扩散知识量成正比,较短的特征路径长度和较大的集聚系数有利于提高企业联盟成员之间的知识交流频率,加快知识在网络中的扩散. 最短路径长度和企业间的知识交流频率决定了联盟在某一时期的知识扩散量。

上述模型是对知识在网络中扩散的动力学分析,揭示了联盟企业知识扩散的一些规律,研究方法 with 结论在知识同质性较高、知识创新与扩散较

快的高技术企业及其联盟范围内,对于谋求成员结构优化、合作治理有效性和揭示联盟持续创新机理具有一定的普遍适用性.其重要的启示和政策含义主要是:首先,联盟网络成员的知识结构越相似,成员能共享的知识量和扩散的创新性知识越多;知识传播所经历的中间环节越少,知识扩散的速度和准确性越高;频繁的知识交流有助于提升合作创新能力.由此,加强联盟成员特别是同类企业之间的知识交流与合作,提高主导企业的凝

聚力尤其是对新成员的影响力,是促进联盟知识扩散和提高创新效率的有效途径.第二,高技术企业联盟是构建国家自主创新体系的重要基础,政府如何引导企业进行合作创新、促进联盟稳定可持续发展,以及在全球创新网络中吸收国外先进知识并逐步构建抗风险能力等,须有系统支持政策.第三,在理论上,如何更深入地探索高技术企业联盟知识扩散机理,并对其有效性进行系统实证是一个重要的前沿课题.

参考文献:

- [1] Zheng J F, Gao Z Y, Zhao X M. Modeling cascading failures in congested complex networks [J]. *Physica A*, 2007, 385 (2): 700 - 706.
- [2] Zakharov P. Diffusion approach for community discovering within the complex networks: Live journal study [J]. *Physica A*, 2007, 378 (2): 550 - 560.
- [3] 杨玉兵, 胡汉辉. 网络结构和知识转移 [J]. *科学学与科学技术管理*, 2008, (02): 123 - 127.
Yang Yu-bing, Hu Han-hui. Network architecture and knowledge transfer [J]. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2008, (02): 123 - 127. (in Chinese)
- [4] Hsu C I, Shih H H. Small-world network theory in the study of network connectivity and efficiency of complementary international airline alliances [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2008, 14 (3): 123 - 129.
- [5] Guseo R, Guidolin M. Modelling a dynamic market potential: A class of automata networks for diffusion of innovations [J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2009, 76 (6): 806 - 820.
- [6] Chang S B, Lai K K, Chang S M. Exploring technology diffusion and classification of business methods: Using the patent citation network [J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2009, 76 (1): 107 - 117.
- [7] Sorenson O, Rivkin J W, Fleming L. Complexity, networks and knowledge flow [J]. *Research Policy*, 2006, 35 (7): 994 - 1017.
- [8] 赵正龙, 陈忠, 孙武军, 等. 具有差异化选择特征的复杂社会网络扩散研究 [J]. *管理科学学报*, 2010, 13 (3): 38 - 48.
Zhao Zheng-long, Chen Zhong, Sun Wu-jun, et al. Diffusion with property of differential choice in complex social network [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2010, 13 (3): 38 - 48. (in Chinese)
- [9] Wong L H. A spatial model for social networks [J]. *Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 360 (1): 99 - 120.
- [10] Kilduff M, Crossland C, Tsai W, et al. Organizational network perceptions versus reality: A small world after all? [J]. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 2008, 107 (1): 15 - 28.
- [11] Carayol N, Roux P. Knowledge flows and the geography of networks: A strategic model of small world formation [J]. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2009, 71 (2): 414 - 427.
- [12] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. *NATURE*, 1998, 393 (4): 440 - 442.
- [13] Newman M E J, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model [J]. *Physics Letters A*, 1999, 263 (6): 341 - 346.
- [14] 冯锋, 王亮. 产学研合作创新网络培育机制分析——基于小世界网络模型 [J]. *中国软科学*, 2008, (11): 82 - 86.
Feng Feng, Wang Liang. Analysis on how to cultivate collaborative innovation network of industry-university-research institution: Based on small-world network model [J]. *China Soft Science Magazine*, 2008, (11): 82 - 86. (in Chinese)
- [15] 杨铭, 薛惠锋. 基于复杂网络的非正式团体知识交互网络分析 [J]. *计算机仿真*, 2009, 26 (11): 122 - 125.

- Yang Ming, Xue Hui-feng. Analysis of IFG knowledge communication network based on complex network [J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(11): 122–125. (in Chinese)
- [16] Moukazel C F. Spreading and shortest paths in systems with sparse long-range connections [J]. *Physical. Review. E*, 1999, 60(6): R6263–6268.
- [17] 谭劲松, 何 铮. 集群自组织的复杂网络仿真研究[J]. *管理科学学报*, 2009, 12(4): 1–14.
Tan Justin, He Zheng. Self-organization of industrial cluster: A computer simulation from complex network perspective [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(4): 1–14. (in Chinese)
- [18] Yang X S. Chaos in small-world networks [J]. *Physical. Review. E*, 2001, 63(4): 046206–046209.
- [19] 汪小帆, 李 翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Wang Xiao-fan, Li Xiang, Chen Guan-rong. *Complex Network Theory and Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [20] Newman M E J, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model [J]. *Phys. Lett. A*, 1999, 263(4–6): 341–346.
- [21] 邓 丹, 李 南, 田慧敏. 基于小世界网络的 NPD 团队交流网络分析 [J]. *研究与发展管理*, 2005, 17(4): 83–86.
Deng Dan, Li Nan, Tian Hui-min. Analysis on NPD team communication network based on small-world network [J]. *R&D Management*, 2005, 17(4): 83–86. (in Chinese)
- [22] 黄玉杰, 万迪昉. 高技术企业联盟中的治理匹配及其绩效分析 [J]. *研究与发展管理*, 2007, 19(4): 8–15.
Huang Yu-jie, Wan Di-fang. Performance in high-tech enterprise alliances [J]. *R&D Management*, 2007, 19(4): 8–15. (in Chinese)

Study on knowledge diffusion of high-tech enterprise alliance from the small-world network perspective

SUN Yao-wu, WEI Ying-ping

School of Business Administration, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: Knowledge diffusion can be accelerated through the network. This paper constructs a knowledge diffusion model of high-tech enterprise alliance based on NW small-world network to reveal the characteristics of the alliance's knowledge diffusion, and uses MATLAB software for simulation. The study indicates that reduction of characteristic path length of network, increase of network cluster coefficient and improvement of knowledge communication frequency between the members are active measures for promoting knowledge diffusion of high-tech enterprise alliances, enhancing innovation effectiveness and developing knowledge innovation.

Key words: small-world network; high-tech enterprise alliance; knowledge diffusion; characteristic path length; clustering coefficient; knowledge communication frequency