

基于 SIR 模型的建筑产业集群节能技术推广机理研究

罗福周, 杨艳平, 王博俊, 王腊印

(西安建筑科技大学 管理学院, 陕西西安 710055)

摘要: 为推动绿色建筑产业升级发展, 探索建筑产业集群内节能技术的推广规律, 文章运用传播动力学理论构建建筑节能技术推广的 SIR 模型, 模拟节能技术在建筑产业集群中的推广过程。结果表明: 节能技术推广与建筑产业集群网络平均度密切相关; 在大规模建筑产业集群中, 节能技术推广一旦开始就会持续进行, 溢出效应明显; 随着参与个体逐渐进行移除状态, 集群会陷入技术锁定; 最后, 探讨了建筑产业集群内节能技术推广的调控策略。

关键词: 建筑产业集群; 节能技术; 传播动力学; SIR 模型;

中图分类号: F062.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)04-0573-05

Research on the mechanism of energy conservation technology generalization in the construction industry cluster based on the SIR model

LUO Fuzhou, YANG Yanping, WANG Bojun, WANG Layin

(School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to promote the development of green building industry, and explore the generalization orderliness of building energy conservation technology in the construction industry cluster network, the SIR model of building energy conservation technology generalization is built by using the theory of the transmission dynamics, to simulate generalization process of building energy conservation technology in construction industry cluster. Results show that the generalization of building energy conservation technology is closely related to the average degree of the construction industry cluster network. In the large scale construction industry cluster, because the cost is the lowest when using the network to get a new technology, building energy conservation technology generalization will continue to carry on once it starts, and it is easy to lead the construction industry cluster into technical lock-in in the later period. In the end, the control strategy of building energy conservation technology generalization in the network of construction industry cluster is discussed.

Key words: construction industry cluster; energy conservation technology; the theory of transmission dynamics; SIR model

我国建筑能耗约占社会终端总能耗的 27.5%^[1], 建筑节能状况落后, 亟待改善。建筑节能技术具有巨大节能潜力^[2], 其有效利用能够缓解能源危机、减轻环境污染、促进社会经济可持续发展。但一项新型建筑节能技术价值的实现依赖于技术创新成果的广泛、高效推广, 技术推广是技术创新过程的一个后续子过程, 同时又是一个完整独立的技术和经济相结合的运动过程。建筑节能技术推广可以有效降低建筑节能项目建设成本和使用维护成本, 延长其经济寿命^[3], 推广重点在于规范相关利益主体的行为, 分析政府、市场和第三方机构在

建筑节能技术推广过程中的作用^[4]。即使在潜在收益高于相关成本的情况下, 有时建筑节能技术在企业间的推广发展缓慢, 甚至没有任何进展^[5], 表明存在着影响推广的障碍因素, 包括利益相关者的态度、政策法规、辅助资源、盈利能力和技术适应性等^[1]。对此, 有学者建议在标准制定、财政激励和市场化机制等方面采取措施^[6]。

产业集群式发展是建筑产业转变增长方式、提高竞争力、由粗放式经营向集约化转变的一个重要战略选择。近年来, 建筑产业集群受到众多学者的广泛关注和深入研究。所谓建筑产业集群, 是

收稿日期: 2016-11-14

修改稿日期: 2017-07-12

基金项目: 陕西省教育厅重点基地项目(15JZ035); 陕西省软科学项目(2017KRM158)

第一作者: 罗福周(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程经济与管理. E-mail: wylj0704@163.com

通讯作者: 杨艳平(1975—), 女, 博士生, 研究方向为工程经济与管理. E-mail: wylj0704@163.com

指在建筑领域内众多相互关联的企业及相关组织,为了取得规模经济效应,在一定区域内聚集形成的产业组织体系^[7]。产业集群是独具特色的企业网络^[8]。由市场关系网络和社会关系网络复合而成的建筑产业集群网络结构,是产业集群区域竞争优势的源泉^[9]。网络集聚效应有利于降低获取新型建筑节能技术的成本,促使建筑节能技术在集群企业中间更快地推广;同时,建筑节能技术的推广也能够影响建筑集群企业及相关组织之间的网络联结关系。建筑产业集群内节能技术推广与集群网络之间存在着相互促进的自增强关系。

目前,建筑节能技术推广的研究主要聚焦于技术研发、效益评价及对策建议等方面,对于建筑节能技术在建筑产业集群内的推广机理研究较为少见。因此,文章借助于传播动力学理论构建模型,模拟建筑节能技术在建筑产业集群网络内的推广过程,探讨建筑节能技术的推广机理和造成后期技术锁定的数理原因,并提出相应的对策建议,以期能够为绿色建筑产业发展提供理论参考。

1 研究方法及假设条件

建筑产业集群是存在于一定地理空间的复杂网络系统,从图论概念的角度描述,建筑产业集群是由一些具有独立特征又与其他个体相连的节点的集合,每个个体即为图(网络)中一个节点,节点间的相互连接视为图中的边。建筑节能技术在建筑产业集群网络中具有行动指向的推广过程是一项复杂工程,不仅与节能技术推广属性相关,也与建筑产业集群网络结构属性息息相关。

传播动力学理论主要研究社会和自然界中各种复杂网络的传播机理、动力学行为以及对这些行为高效可行的控制方法^[10]。在建筑产业集群中,网络结构会对建筑节能技术的推广路径产生影响和反馈,改变推广深度和广度;而建筑节能技术推广也会对建筑产业集群网络演化起到促进或阻碍作用,使产业集群向高级形式转化或是陷入某种路径依赖。建筑产业集群节能技术的推广机理及其动力学行为可以纳入到传播动力学的研究范畴之中,借鉴其研究方法构建数理模型,在研究建筑产业集群节能技术推广的同时也为传播动力学理论的研究提供了新的社会构架。

在这里,我们需要采用的一个假设是:建筑节能技术的推广个体均在建筑产业集群网络的各个节点上,推广只能通过网络的边进行,推广效率由推广率决定。推广率定义为建筑节能技术接受人群与一个技术推广者接触而获得该技术的概率,

通常用 λ 表示。推广阈值 λ_c 是个重要参量,对于大规模网络系统而言,如果建筑节能技术的推广率大于该推广阈值,那么接受到该技术的人数将占一个有限大小的比例,即建筑节能技术推广会爆发且持续进行;否则,接受该技术的人数会呈指数减少,其占总人数的比例将会接近于0,即建筑节能技术推广会消失。

2 建筑产业集群节能技术推广机理研究

2.1 集群网络中节能技术推广基本模型

在建筑产业集群中,建筑节能技术推广过程是由技术推广者、技术接受者和技术免疫者来完成,其中技术免疫者是有些技术接受者在接受技术过程中认为是无用的技术从而放弃该技术,不再对相应动力学行为产生任何影响,即技术移除状态,成为技术免疫者。相应地,建筑产业集群网络个体可以被划分为几类基本状态,每类都处于同一种状态,即技术推广状态(I)、技术接受状态(S)、技术免疫状态或移除状态(R)。可以用上述个体之间不同状态的转换过程来命名建筑产业集群节能技术推广的数理模型,即建筑节能技术推广的 SIR 模型。

SIR 模型涵盖了建筑产业集群个体的三种基本状态,模拟建筑节能技术推广过程,探讨建筑产业集群网络结构与节能技术推广的高相关性;值得关注的是,从一般性的随机网络到建筑产业集群无标度网络^[10],在网络结构的改变上进行了经典传播模型的修正,能够更为精准地阐释建筑节能技术在建筑产业集群网络中推广的微观机理。

在建筑节能技术推广的 SIR 模型中,技术推广个体不会转变为技术接受个体而是以概率 β 变为技术免疫个体,即处于技术移除状态。SIR 模型的推广机理可以描述^[10]为

$$\begin{cases} S(i) + I(j) \xrightarrow{\alpha} I(i) + I(j) \\ I(i) \xrightarrow{\beta} R(i) \end{cases} \quad (1)$$

假设 t 时刻建筑产业集群网络系统中处于技术接受状态、推广状态、移除状态的个体的密度分别为 $s(t)$ 、 $i(t)$ 和 $r(t)$ 。当技术接受个体和技术推广个体充分混合时,SIR 模型的动力学行为可以描述为如下的微分方程组:

$$\begin{cases} \frac{ds(t)}{dt} = -\alpha i(t)s(t) \\ \frac{di(t)}{dt} = \alpha i(t)s(t) - \beta i(t) \\ \frac{dr(t)}{dt} = \beta i(t) \end{cases} \quad (2)$$

随着时间的推移,上述模型中的技术推广个体逐渐增加.但经过充分长的时间后,因为建筑产业集群中节能技术接受个体的不足使得推广个体也开始减少,直至推广人数变为0,推广过程结束.因此,SIR模型在稳态时刻 $t=T$ 的推广密度 $r(T)$ 和有效推广率 λ 存在着——对应的关系,且 $r(T)$ 可以用来测量技术推广的有效率.当 $\lambda < \lambda_c$ 时,建筑节能技术无法推广出去;而当 $\lambda > \lambda_c$ 时,该技术推广爆发且是全局的,建筑产业集群网络系统中所有个体终都处于移除状态,而建筑节能技术推广个体的数目为0.

由此可见,建筑节能技术推广SIR模型的终态为无推广状态,低于临界阈值时总推广个体的密度为0,到此状态时,建筑产业集群会陷入该节能技术的锁定状态.这正印证了Keeble、杨园华^[11-12]等学者的观点:最初对产业集群及企业发展具有积极作用的创新技术,到后来可能会使产业集群出现技术获取与技术创新呈现一定的依赖性,并随着依赖程度的增强逐步强化对现有技术的使用,从而抑制集群内部新技术的有效传播与利用,陷入技术锁定,进而阻碍产业集群发展转型.

2.2 建筑产业集群网络中节能技术推广机理分析

复杂网络中,节点 v_i 的邻边数目 k_i 称为节点 v_i 的度($i=1, \dots, N$,是复杂网络的所有节点数);对网络中所有节点的度求平均,可得到网络的平均度 $\langle k \rangle = (k_1 + k_2 + \dots + k_N) / N$; $P(k)$ 为网络中度为 k 的节点在整个网络中所占的比率,即在网络中随机抽取到度为 k 的节点的概率为 $P(k)$.统计实验数据表明^[10],大多数现实网络的度分布并不像均匀网络那样展示出Delta分布或泊松分布的形式,即大多数节点的度是基本相同或近似相等的(如图1(a)~(b)所示),现实网络的度分布大多具有幂指数形式的度分布: $P(k) \propto k^{-r}$,且幂指数通常为 $2 \leq r \leq 3$ (如图1(c)所示).这一特性反映了网络中度分布的不均匀性,反映在网络结构上,就是只有很少数的节点与其他节点有很多的连接而成为“中心节点”,绝大多数节点的度相对很低,这类网络即为非均匀网络.很明显,建筑产业集群网络是一个典型的非均匀网络,在建筑节能技术推广分析中必须考虑其度分布.

假设 t 时刻建筑产业集群网络中一个度为 k 的节点组中处于技术接受状态、推广状态、免疫状态的个体密度分别表示为 $s_k(t)$ 、 $i_k(t)$ 、 $r_k(t)$,则它们满足约束关系

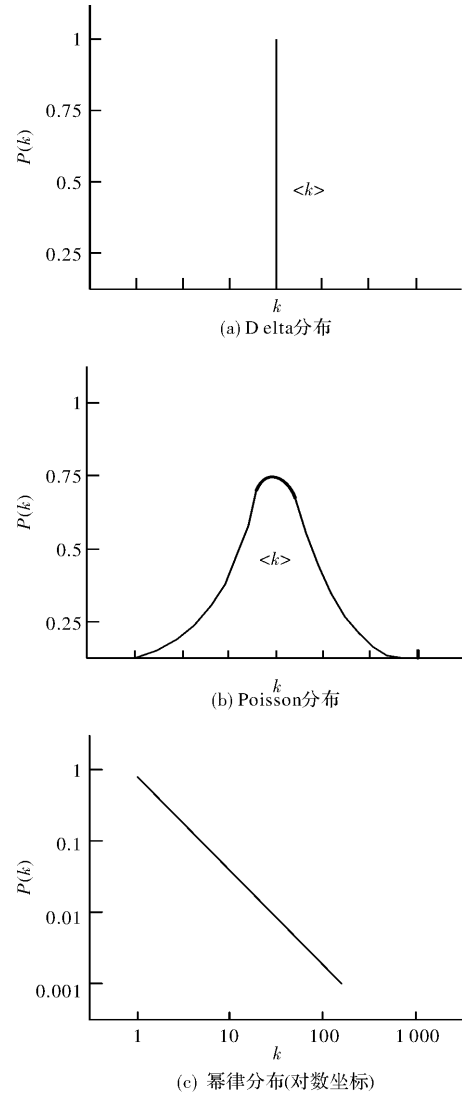


图1 几种典型网络度分布示例

Fig. 1 Several example of the degree distribution

$$s_k(t) + i_k(t) + r_k(t) = 1 \quad (3)$$

令 t 时刻任意邻居被传播的概率记作 $\Theta(t) = \sum_{k'} P(k' | k) i_{k'}(t)$,它表示从一个度为 k' 的节点连到度为任意 $P(k' | k) i_{k'}(t)$ 的节点的联合概率的平均,则可得下列节能技术推广的动力学演化方程组:

$$\begin{cases} \frac{ds_k(t)}{dt} = -\lambda k s_k(t) \Theta(t) \\ \frac{di_k(t)}{dt} = \lambda k s_k(t) \Theta(t) - i_k(t) \\ \frac{dr_k(t)}{dt} = i_k(t) \end{cases} \quad (4)$$

上述方程组初始条件为 $r_k(0)$ 、0、 $i_k(0) = i^0$.在极限 $i^0 \rightarrow 0$ 时,我们可取 $i_k(0) \approx 0$, $s_k(0) \approx 1$.在该近似条件下,由方程(4)的第一个方程可得:

$$s_k(t) = e^{-\lambda k \varphi(t)} \quad (5)$$

其中, $\varphi(t)$ 为以下的辅助函数(考虑公式(4)的第三

个方程):

$$\varphi(t) = \int_0^t \Theta(t') dt' = \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k k P(k) r_k(t) \quad (6)$$

其导数可简化为(考虑公式5)

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi(t)}{dt} &= \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k k P(k) i_k(t) = \\ \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k k P(k) (1 - r_k(t) - s_k(t)) &= \\ 1 - \varphi(1) - \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k k P(k) e^{-\lambda k \varphi(t)} & \quad (7) \end{aligned}$$

由此得到了关于 $\varphi(t)$ 的一个自治方程, 它在给定的 $P(k)$ 条件下可以求解. 一旦得到 $\varphi(t)$, 可以得到 $\varphi_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t)$, 从而由 $r_k(\infty) = 1 - s_k(\infty)$ 可得

$$r_\infty = \sum_k P(k) (1 - e^{-\lambda k \varphi_\infty}) \quad (8)$$

根据式(7), 由于 $i_k(\infty) = 0$ 得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\varphi(t)}{dt} = 0$, 从而可以得到关于 φ_∞ 的自治方程

$$\varphi_\infty = 1 - \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k P(k) e^{-\lambda k \varphi_\infty} \quad (9)$$

为了得到非零解, 必须满足如下条件:

$$\left. \frac{d}{d\varphi_\infty} \left(1 - \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k P(k) e^{-\lambda k \varphi_\infty} \right) \right|_{\varphi_\infty=0} \geq 1 \quad (10)$$

于是

$$\frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k P(k) (\lambda k) = \lambda \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \geq 1 \quad (11)$$

从而得到阈值为

$$\lambda_c = \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \quad (12)$$

由此可见, 建筑节能技术推广与建筑产业集群网络平均度 $\langle k \rangle$ 息息相关. 对于规模比较大的具有度分布 $P(k) \propto k^{-\gamma} (\gamma \leq 3)$ 的非均匀建筑产业集群网络, $\langle k^2 \rangle = \infty$, 对应的 $\lambda_c = 0$, 此时无论推广概率多么小, 建筑节能技术推广都能够持久存在, 这主要是因为建筑产业集群网络的集聚效应降低了采用一项新节能技术的成本.

3 讨论

通过构建数理模型, 对建筑产业集群网络上节能技术推广机理进行研究, 可以发现:

(1) 建筑产业集群节能技术推广和集群网络平均度密切相关, 建筑产业集群网络是建筑节能技术推广的载体, 建筑节能技术推广是建筑产业集群网络演进的动力. 从推广阈值的取值范围可知, 建筑产业集群节能技术推广和集群网络结构的平均度息息相关. 建筑产业集群网络关系能够给组织带来一种获取信息和资源的作用机制^[13], 网络联

结关系越强, 信息的交换就越频繁, 学到的知识、获取的资源也越多^[14], 也就越有利于建筑节能技术的推广; 而建筑节能技术推广是网络个体经济行为与其他个体的互动, 是以双边或多边关系为导向的、动态的、连续的过程, 可能会引导建筑产业集群网络逐渐走向复杂化、功能化、差异化的更高层次^[15], 进而影响建筑产业集群及企业竞争能力的提升.

(2) 在大规模建筑产业集群中, 由于利用网络运用一项新技术的成本最低^[16], 容易导致建筑节能技术推广一旦发生, 就会持续不断地进行下去, 且随着拥有的个体越多, 技术推广的溢出效应越明显. 建筑节能技术的推广, 是一个技术完善优化的过程, 也是形塑建筑产业集群目标战略和网络结构的过程, 但这个过程不是一劳永逸地发生影响, 而是一个不断地被建构和重构的持续过程. 从推广阈值 λ_c 取值结果可以得知, 在大规模的建筑产业集群中, 由于产业集聚网络效应削弱了集群企业使用新技术的成本, 因此无论起初建筑节能技术推广的力度、规模、范围多么弱小, 可一旦发生就会持续存在, 而且比在均匀网络上具备更快的推广速度.

(3) 随着建筑节能技术推广参与个体都逐渐处于移除状态, 建筑产业集群会逐渐陷入技术锁定. 在建筑产业集群中, 随着建筑节能技术推广时间的推移, 集群网络中推广个体不断增加, 导致后来技术接受个体不足使得技术推广个体也逐渐衰减, 甚至为 0. 随着建筑产业集群网络中所有个体都逐渐处于移除状态, 整个建筑产业集群会陷入技术锁定. SIR 模型从数理关系上解释了部分学者的观点, 即在技术收益不变或递减的情况下, 社会系统或组织的“自我强化”会引致技术锁定^[17]; 集群中企业长期的集体学习和连续的知识积累, 会使整个集群被一条日渐没有竞争力的技术轨道锁定^[11].

(4) 调整建筑产业集群网络的结构构成, 可以影响建筑节能技术推广. 在建筑产业集群中, 建筑节能技术推广可以提高建筑产业集群及企业的运营效率和适应能力, 进而提升它们的创新技能和竞争优势; 但是, 集群技术状态沿着特定路径发展造成的技术锁定会导致集群及企业技术积累和创造偏向于某一类技术, 与集群核心能力无关但对未来发展至关重要的技术无法被识别, 影响集群可持续发展. 这时, 选取建筑产业集群网络中少量度大的节点, 调控它们所连的边从网络中移除

或转变方向,进而改变节能技术推广的速度、规模或对象等,促使建筑产业集群技术资源配置达到最优状态。

4 结论

通过运用传播动力学理论构建建筑产业集群网络上节能技术推广的SIR数理模型,模拟和剖析建筑节能技术推广过程,得出以下结论:

(1)建筑产业集群节能技术推广和集群网络平均度息息相关,建筑产业集群网络是建筑节能技术推广的载体,建筑节能技术推广是建筑产业集群网络演进的动力。

(2)在大规模建筑产业集群中,网络集聚效应会降低建筑企业获取建筑节能技术的成本,容易导致建筑节能技术推广一旦发生,就会持续不断地进行下去且比在均匀网络上有更快的推广速度,且拥有的人越多,节能技术溢出效应越明显。

(3)在建筑产业集群中,随着建筑节能技术推广个体都逐渐处于移除状态,建筑产业集群及企业会陷入技术锁定,影响建筑产业特别是绿色建筑产业的可持续发展;管理部门可以通过调整建筑产业集群网络结构,改变节能技术推广的速度、规模或对象等,促使建筑产业集群技术资源配置达到最优状态,达到调控建筑节能技术推广过程的目的。

建筑产业集群网络上节能技术推广机理分析,能够为建筑经济管理部门制定相关对策建议提供有益参考,促进绿色建筑产业升级发展。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国建筑节能发展报告(2014)[R]. 北京:中国建筑工业出版社,2014. Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Building energy conservation development report (2014) [R]. Beijing: China Building Industry Press, 2014.
- [2] 陆跃文. 建筑节能技术推广策略研究[J]. 管理与财富,2008(9):53-54. LU Yaowen. Study on technology popularization strategy of building energy saving [J]. Management and Wealth, 2008 (9): 53-54.
- [3] 刘戈,黄明强. 村镇住宅建筑节能技术推广应用全生命周期经济效益分析[J]. 科技管理研究,2012(3):73-76. LIU Ge, HUANG Mingqiang. Analysis on residential building energy-saving technology popularization and application of life-cycle economic benefits[J]. Science and Technology Management Study, 2012 (3): 73-76.
- [4] 孙晓冰. 建筑节能关键技术推广的三方合动分析框架[J]. 新型建筑材料,2010(9):89-91. SUN Xiaobing. Tripartite cooperation framework for promotion of key building energy-saving technology [J]. New Building Materials,2010(9):89-91.
- [5] ARVANITISS, LEYM. Factors determining the adoption of energy-saving technologies in Swiss firms: an analysis based on micro data[J]. Environ. Resour. Econ,2012,54:389-417.
- [6] 焦江波,李文君. 关于节能新技术新产品推广工作模式的思考[J]. 建筑节能,2013,41(4):71-72. JIAO Jiangbo, LI Wenjun. Promotion for the new energy-saving technologies and product[J]. Building Energy Conservation, 2013,41(4): 71-72.
- [7] 李颖超,肇成强. 基于虫口模型的建筑企业集群创新网络演化机理研究[J]. 建筑管理现代化,2008(6):82-84. LI Yingchao, ZHAO Chengqiang. Evolution mechanism of construction enterprises' clustering innovation network based on population model[J]. Construction Management Modernization,2008(6):82-84.
- [8] CAPELLO R. Spatial transfer of knowledge in high technology milieu: learning versus collective learning process [J]. Regional Studies,1999,33(4):353-365.
- [9] 蔡宁,徐梦周. 产业集群网络失灵及其政策启示[J]. 重庆大学学报(社会科学版),2008,14(5):23-27. CAI Ning, XU Mengzhou. Network failures of industrial clusters and enlightenments for policies[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2008,14(5):23-27.
- [10] 郭世泽,陆哲明. 复杂网络基础理论[M]. 北京:科学出版社,2013. GUO Shize, LU Zheming. Complex network theory [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [11] KEEBLE D, WILKINSON F. Collective learning and knowledge development in the evolution of regional cluster of high technology SMEs in Europe [J]. Regional Studies,1999,33(4):295-303.
- [12] 杨国华,李力,牛国华. 我国企业低碳技术创新中的锁定效应及实证研究[J]. 科技管理研究,2012,32(16):1-4. YANG Yuanhua, LI Li, NIU Guohua. Lock-in effect in low-carbon technology innovation and empirical research in China[J]. Science and Technology Management Study,2012,32(16):1-4.
- [13] GULATI R. Alliances and Networks[J]. Strategic Management Journal, 1998,19(4):293-317.
- [14] LANE P J, LUBATKIN M. Relative Absorptive Capacity and Inter-organizational Learning[J]. Strategic Management Journal,1998,19(2):461-477.
- [15] 张梅青,盈利. 创意产业集群网络结构演进机制研究[J]. 中国软科学,2009,43(S1):231-238. ZHANG Meiqing, YING Li. Research on evolutionary mechanism of network structure of creative industry cluster[J]. China Soft Science,2009,43(S1):231-238.
- [16] JAMES J C, DAVID L, ANDREW M. Does the internet increase trading? Evidence from investor behavior in 401(k) Plans: 7878 [R]. Cambridge, USA: NBER, 2000.
- [17] ARTHUR W B. Increasing Returns and Path Dependence in the Economy[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press,1994.

(编辑 桂智刚)