

基于离散选择的技术扩散元胞自动机模型

张磊, 史春秀, 高伟

(中国矿业大学 管理学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 传统的基于 Bass 模型各类技术扩散模型簇并没有有效地刻画采用者收入因素等个人特质的影响, 也无法描述消费者中途放弃采用情形下的扩散规律。为此, 将离散选择模型引入到创新扩散研究领域, 用以研究消费者个人特质对技术扩散进程的影响, 并将其与元胞自动机相结合, 建立了一个创新扩散混合模型。运用太阳能热水器(SWH)在我国农村地区的扩散情况进行仿真分析, 发现模型能够较好地拟合 SWH 的实际扩散状况并且很好地解释了收入水平等个人特质对扩散进程的影响路径。此外, 与传统理论不同, 研究还发现扩散进程并不与口头交流信息量呈简单的直线相关关系, 而是存在着一个临界值, 超过该值后, 口头交流对扩散进程的影响力将日益减弱。

关键词: 分散型可再生能源; 技术扩散; 离散选择; 元胞自动机

中图分类号: F403

文献标识码: A

文章编号: 1009-3370(2014)01-0041-05

技术创新扩散是指创新技术经由特定的渠道随时间的不断推移在某一社会团体的成员中传播的过程^[1]。只有当新技术被广泛利用时, 才能使该技术创新的经济效益最大限度地发挥出来, 因此, 创新扩散是技术实现产业化的关键环节, 正确地认识技术创新扩散规律对产品的营销策略以及市场的开拓都有着重要的意义。

现有的技术扩散模型主要有两大类: 一类是以 Bass 模型为基础的改进模型, 即广义的 Bass 模型簇, 它是对原有的模型增加或调整参数进行宏观角度的实例研究。例如, 徐明慧(2006)利用 Bass 产品扩散模型描述了我国移动电话的扩散过程^[2]; 陈国宏(2010)在对技术创新扩散 Bass 模型研究的基础上指出运用 Bass 模型研究产业集群技术创新扩散存在的不足, 建立了产业集群技术创新扩散 Bass 修正模型^[3]; 张磊(2009)^[4]、王子敏(2013)^[5]在 Bass 模型基础上引入重置购买参数对快速消费品市场需求进行了模拟预测, 并以乳制品为例进行了实证分析; 赵骅利(2007)用 Bass 模型预测对新产品的潜在收益分布进行了研究^[6]。另一类是 Bass 模型与元胞自动机相结合的混合模型, 即利用 Bass 模型进行宏观参数估计, 然后利用元胞自动机仿真技术对复杂的扩散过程进行微观的分析。例如, Goldenberg(2001)建立了新产品扩散的异质的元胞自动机模型, 并研究了宏观以及微观模型之间参数的关系^[7]; Renato(2009)利用广义的 Bass 模型与元胞自动机

相结合, 从微观角度研究了一种新的药物治疗技术的扩散过程^[8]。随后, 他又利用广义的 Bass 与元胞自动机混合模型对存在外部效应以及激励效应下的网络产品扩散进行了研究, 并以美国传真机的扩散为例进行了分析^[9]; 方亮(2007)首先运用 Bass 模型进行参数估计, 然后建立基于元胞自动机的技术创新扩散模型对中国互联网技术扩散进行实证研究, 并对未来的网民数扩散趋势进行了预测^[10]; 张燕芳(2011)基于 Bass 模型与元胞自动机的各自优势建立了混合扩散模型对乳制品产品扩散进行了应用及预测^[11]。

可以看出, Bass 模型簇为研究创新技术扩散提供了良好的指导作用并被广泛使用着, 但是它仅考虑到大众传播媒介以及人际沟通对扩散过程的影响, 而消费者的收入水平等个人特质对扩散的重要影响被忽略^[12-17], 且 Bass 模型作为对累积量估计的模型, 也无法回答因消费者中途放弃情况下的扩散规律问题; Bass 模型簇的另一个问题是需要求解微分方程, 而变量的逐渐增加会使求解过程日益复杂难解。针对以上问题, 运用离散选择模型是一个可行的研究思路, 如大矾一(2010)利用离散选择模型考虑到网络效应、资费调整、信号覆盖等多因素影响下的日本 3G 移动通信扩散状况^[18]; 葛学峰(2010)利用离散选择模型分析了旅游消费者在产品选择过程中的个人特征以及行为特征对旅游产品偏好的影响^[19]; 王全胜(2010)用该模型对渠道便利性、业务复杂度、

收稿日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71003097, 71373261); 教育部人文社会科学基金资助项目(09YJC630218)

作者简介: 张磊(1975—), 男, 博士, 副教授, E-mail: mailing126@126.com

成本与风险等因素对客户选择行为的影响^[20]。但从方法上看,这些研究还停留在样本调查和回归分析等传统手段上,将离散选择模型与元胞自动机结合起来,运用仿真的方法来研究技术扩散的文献还没有发现。

基于以上考虑,本文运用离散选择模型,将内部影响以及消费者的收入水平等个人特质作为影响因素,在考虑到消费者存在放弃使用的情况下,建立一个整合离散选择模型与元胞自动机技术的混合扩散模型。用太阳能热水器在中国农村市场的扩散数据进行仿真,发现该模型具有较好的拟合优度和解释力,可以作为研究技术创新扩散的一种新方法。

一、模型的构建

元胞自动机是由元胞及元胞空间、元胞状态、邻居和演化规则等组成。相互离散的元胞构成了元胞空间,在某一时刻一个元胞只有一种状态,且元胞的状态集是一个有限的集合,邻居是指元胞周围按照一定形状划定的元胞集合,元胞本身的状态以及周围邻居的状态决定了该元胞下一时刻的状态,演化规则是元胞的状态转换函数,各个元胞根据演化规则进行状态的变化,其基本模型为

$$CA=(L_d,S,N_i,f) \tag{1}$$

为了便于对技术扩散的研究,本文做以下假设:(1)该技术市场是垄断的,不存在因技术产品质量以及价格所引发的不同时期的采用差异;(2)该市场中的潜在消费者的总量是保持不变的,且他们的收入水平服从对数正态分布;(3)该市场中存在消费者放弃采用该技术的情况,且放弃的概率与其使用年限有关;(4)该市场中的消费者是无记忆性的,即若曾经采用过该技术,若放弃后仍视为潜在的消费者,与未采用过的消费者无任何差异。

(一)基本模型

根据以上假设及其基本建模方法,建立基本的扩散模型如下:

(1)元胞为技术扩散的采用者,即消费者。(2)元胞空间是新技术扩散的整个潜在市场,即可能采用该技术扩散的所有消费者。(3)元胞状态空间主要包括消费者采用或不采用两种情况,即元胞空间为{0,1}。当元胞状态为0时,表示该消费者未采用该技术,反之表示该消费者采用了该技术。(4)邻居形式选取典型的 Moore 型,即每个消费者周围有 8 个邻居,如图 1 所示。(5)采用二元选择模型来刻画演化规则,即元胞的状态转移概率。

$(i+1,j-1)$	$(i+1,j)$	$(i+1,j+1)$
$(i,j-1)$	消费者 (i,j)	$(i,j+1)$
$(i-1,j-1)$	$(i-1,j)$	$(i-1,j+1)$

图 1 Moore 型邻居

(二)演化规则

主要采用概率和放弃概率,即未采用该技术的元胞在 t 时刻采用该技术的概率和已采用该技术的元胞在 t 时刻放弃使用该技术的概率。由于在技术创新扩散中,消费者只有两种选择,采用或不采用,而在元胞自动机中,每个消费者是否采用该技术是不确定的,是以一定的概率来判断是否采用该技术。二元选择模型的目的是研究具有给定特征的个体做某种选择而不做另一种选择的概率,因此,可以用二元选择模型代替被广为接受的 Bass 模型确定元胞自动机的演化规则中的状态转移概率。

用 S_t 代表潜在者是否采用技术,如果潜在者在 t 时刻采用了新技术,则 $S_t=1$;反之则 $S_t=0$ 。假定 S_t 的取值依赖于另外一个不可观测的变量 Z ,并且 Z 与影响变量 X 存在着一定的函数关系 $Z=F(X)$,假设其为线性形式,即 $Z=X\beta+\varepsilon$ 。 Y_t 的取值决定了是否采用新技术,而其自身的取值决定于 Z 的取值。假设当 $Z>0$ 时潜在者会采用新技术,即 $S_t=1$; $Z\leq 0$ 时不采用新技术,即 $S_t=0$ 。所以是否采用新技术 Y_t 的概率为

$$P(S_t=1)=P(Z>0)=P(\varepsilon_t>-X_t\beta) \tag{2}$$

假设 ε_t 服从标准的 logistic 分布, ε_t 的分布函数为 $F(t)=\frac{e^t}{1+e^t}$,据此可以得到

$$P(\varepsilon_t>-x_t\beta)=1-P(\varepsilon_t\leq -x_t\beta)=1-F(-x_t\beta)=F(x_t\beta) \tag{3}$$

即采用新技术的概率为 $P(S_t=1)=\frac{e^{x_t\beta}}{1+e^{x_t\beta}}$ 。

传统上该模型只考虑影响技术扩散的两个主要因素:内部影响和收入水平。内部影响主要用周围邻居中的采用量表示,即随着周围邻居采用量的增加,消费者会出现采用的欲望;但除此之外,潜在采用者在现实生活中是否会真正实施采用行为还会受到自身收入水平的影响,假设收入水平服从对数正态分布。基于以上分析,变量 Z 可具体化为

$$Z=\alpha+\beta*\frac{n(t)}{8}+\gamma*\ln(I)+\varepsilon \tag{4}$$

则采用新技术的概率为: $P(S_t=1)=$

$$\frac{e^{\alpha+\beta*\frac{n(t)}{8}+\gamma*\ln(I)}}{1+e^{\alpha+\beta*\frac{n(t)}{8}+\gamma*\ln(I)}}$$
,其中, $\frac{n(t)}{8}$ 和 I 分别代表周围邻居

的采用程度及中心元胞自身的收入水平。

假设消费者采用某技术后再次放弃的概率与采用年限成线性关系，即若某元胞在 t 时刻时采用了该技术，即 $S_t=1$ ，那么该元胞在 $t+n$ 时刻放弃使用该技术的概率为： $P(S_{t+n}=0)=\lambda * n$ ；其中， λ 为放弃系数， $0<\lambda<1$ ； n 为消费者使用该技术的年数， $n\geq 1$ 。

根据以上分析，可以得到该元胞自动机模型的状态转移概率矩阵为

$$\begin{bmatrix} P_{0\rightarrow0} & P_{0\rightarrow1} \\ P_{1\rightarrow0} & P_{1\rightarrow1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+e^{\frac{\alpha+\beta*\frac{n(t)}{8}+\gamma*\ln(I)}}} & \frac{e^{\frac{\alpha+\beta*\frac{n(t)}{8}+\gamma*\ln(I)}}}{1+e^{\frac{\alpha+\beta*\frac{n(t)}{8}+\gamma*\ln(I)}}} \\ \lambda*n & 1-\lambda*n \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $0<\lambda<1$ ； $n\geq 1$ 。

二、模型的仿真分析

本文采用周期性边界，基于 Matlab 软件对太阳能热水器在中国农村地区的扩散进行仿真分析。以 1997—2010 年太阳能热水器在我国农村地区扩散数据为蓝本，以 1997 年扩散数据为初始数据进行初始参数的设定。其具体参数的元胞自动机模型如下所述。

- 1.元胞空间：基于 Bass 模型的预测结果，太阳能热水器的最大市场容量为 8 964 万平方米。如果以万平方米为元胞单位，设计出与估计值最为接近的 95*95 的正方形元胞空间，共 9 025 个元胞。
- 2.元胞初始状态：以 1997 年太阳能热水器保有

量 633 万平方米为元胞的初始值，即在元胞的初始状态有 633 个状态为 1 的已采用元胞，这些元胞随机地分布在元胞空间中，其余元胞状态均为 0 的潜在采用元胞。

3.元胞的收入水平：通过对 1997 年不同地区农民家庭纯收入做单样本 $K-S$ 检验，得知其家庭纯收入服从对数正态分布，该分布的均值为 8.750 7，标准差为 0.373 6，故其分布函数为

$$F(I)=\Phi(\frac{\ln I-u}{\sigma})=\Phi(\frac{\ln I-8.750\ 7}{0.373\ 6}) \quad (6)$$

仿真开始时，所有元胞的收入水平将按照此分布函数随机取值，并以 1997—2010 年间农民纯收入年平均增长率 8.44% 作为每年收入的增长率，用以调整每一元胞的当期收入水平。

4.仿真周期：设定每年为一个周期，表示其元胞变化的步长。

(一)模型有效性验证

本文以仿真数据对实际数据的拟合情况作为模型有效性的检验标准。经过反复的调整实验，发现当 $\alpha=-18.06$ ， $\beta=1.946$ ， $\gamma=1.63$ 时，程序运行结果与实际数据具有较好的拟合且也相对稳定。模拟扩散过程如图 2 所示(黑色表示潜在者，灰色表示已采用者)。可以看出，采用者的数量相对较少，潜在者的量较多，随着时间的推移，采用者的数量越来越多，逐渐达到稳定。

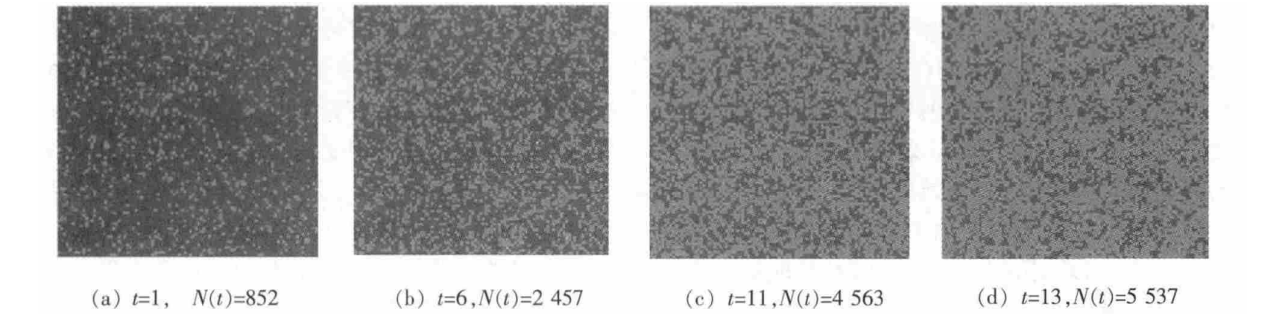


图 2 模拟扩散过程的元胞自动机演化示意图

将仿真结果与实际数据进行比较，发现该模型能够较好地对实际数据进行拟合，如图 3 所示。它们的 Theil’U 值(检验拟合优度，其值越小，拟合优度越好)和 MAPE 值(平均绝对百分比误差，检验预测精度优劣，其值越小，预测精度越高)都比较小，分别为 0.036 和 0.116，说明模型较好地对太阳能热水器扩散数据进行了拟合。

(二)仿真结果分析

分析上述模拟结果可以发现，在扩散的初期采

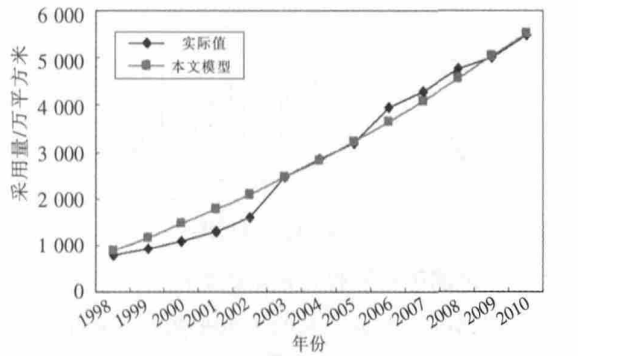


图 3 元胞自动机模型与实际数据的拟合情况

用者的数量相对较少,潜在者的量较多;而随着时间的推移,采用者越来越多并连成一片,逐步实现了对市场的占有。这种现象主要是由于在扩散的初期,采用者数量相对较少,传播媒介有限,信息的流通率相对较低,在消息相对闭塞的农村来说对太阳能热水器的了解不够,因此,收入不高的农民不太愿意去花费一大笔钱去购买太阳能热水器,而是选择继续采用取材方便且廉价的生物质能;随着人们收入水平的提高,周围邻居中采用者的数量逐渐增多,由于已采用者对潜在采用者的口头交流作用,人们对太阳能热水器的认识也随之提高,为了改善生活质量,部分潜在者将会选择采用太阳能热水器,由于该技术的扩散具有外部正效应,即周围人采用的人数越多,对潜在者的影响越大,因此将会有更多的人选择采用太阳能热水器,以致逐步实现对市场的完全占有。

(三)收入敏感度分析

将所有元胞收入增加 1 个百分点,借以观察采用元胞数量的变化情况,即收入敏感度的考察,结果如图 4 所示。可以看出,收入敏感度基本上保持上升的趋势,说明在 1998—2010 年间收入一直是影响潜在者采用的重要因素,主导着市场扩散的进程。虽然人们的生活水平一直在提高,但对一些地方的农民来说,还是没有足够的经济能力去购买太阳能热水器。在农民收入水平一定的情况下,若要促进市场扩散的进程,可以考虑降低其采用成本。例如,2009 年我国将热水器作为“家电下乡”产品,对农民购买给予一定比例(13%)的财政补贴,随着该活动的不断推广,在 2011 年收入敏感度出现了相对下降的趋势,说明降低采用成本在一定程度上与提高收入水平有着互补效应。但由于该产品价格与家庭耐用品相当,学习曲线原理导致其成本下降空间有限,因此,国家可以以政策补贴的形式进行促进其扩散,这样产品的实际成本虽未下降,但消费者的采用成本得到了降低。

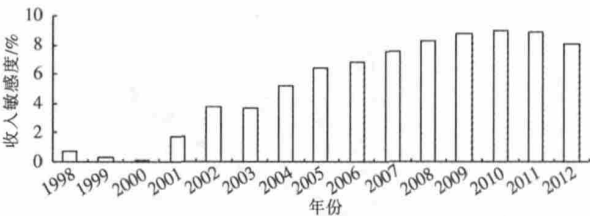


图 4 收入敏感度

(四)内部因素及收入水平的影响

将内部因素系数以及收入水平系数分别增加 1 个百分点,观察采用元胞数量的变化情况,结果如

图 5 所示。可以看出,增加内部影响的系数,采用元胞的数量并没有像预期的那样随之增加,而是出现了波动的情况,在模拟扩散的前期采用者的数量相对减少,而其后采用者数量出现了较小幅度的增加;这说明并不是周围邻居对潜在者的影响系数越大,潜在者越会快速地采用该技术,在信息量过多的情况下,潜在者将会需要较长的时间考虑,而不是进行盲从随之采用,这是由于产品的质量凌乱,若消费者采用了质量不高的产品,提供给潜在者的信息将大多是负面的,因此潜在者在做出决定之前将会需要相对较长的时间进行思考,这也是人们进行理性消费的一种表现。

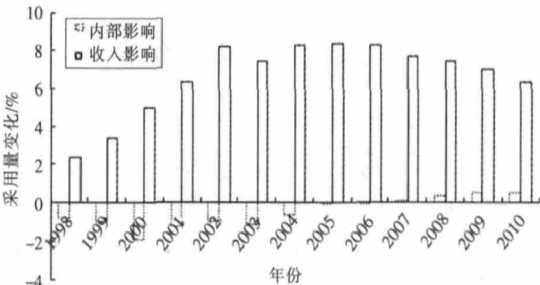


图 5 内部影响以及收入系数变化对比图

增加收入的影响系数,在整个扩散过程中,采用者的数量出现了较大幅度的增长,其中在 2006 年达到最大为 8.27%,即收入的影响每增加 1%,采用元胞数量将会增加 8.27%,这说明收入因素与元胞的采用数量并不是呈现线性关系,而是呈现“钟形”的分布,两头相对较低,中间偏高,即改变相同的收入系数,每期采用量的变化比例并不相同,而是在扩散的前期,采用量的增加比相对较小,在 2006 年达到顶峰之后逐渐下降,说明收入系数在扩散过程中每期的影响程度是不相等的,也不是在收入较高的时候影响最大,这说明受收入影响较大人群并不是收入的最高者以及最低者,收入较低的人群没有足够的购买能力,所以暂时不会考虑其采用行为,而收入较高者具有足够的购买力,因此在采用过程中,收入并不是真正制约其采用的因素。

三、结论

本文利用离散选择模型代替被广为使用的 Bass 模型,考虑消费者存在放弃使用的情况,结合元胞自动机建立混合模型对技术扩散问题进行研究,并以太阳能热水器在我国农村地区的扩散为例进行仿真分析,发现该模型具有较好的拟合优度,很好地反映了多个因素对技术扩散的影响,为研究技术扩散开拓了新思路。基于仿真对影响太阳能热水器的扩散的因素进行分析,发现农民的收入水平

一直是重要的影响因素,由于提高收入水平与降低采用成本均可以有效地促进消费者的采用行为,因此也可以通过政策扶助等多渠道促进其技术扩散。

以太阳能热水器为例的研究还发现,扩散进程并不是随着口头交流等内部影响因素的系数增大而加快,而是存在一个最优的情况,若系数大于该最优值时,消费者并不会随着获知信息量的增大而

立刻进行采用行为,而是会深思熟虑,进行理性消费,进而努力使效用达到最大化,这也是由于产品的质量迥异造成的。因此若要加快扩散的进程,在提高收入的同时还需要提高产品的质量,尽量减少过多的负面信息对消费者的采用行为产生的负面影响。因此,从政府的角度出发,在进行政策扶持的同时,要加大对产品质量的监管力度。

参考文献:

- [1] 罗杰斯. 创新的扩散[M]. 辛欣,译. 北京:中央编译出版社,2002.
- [2] 徐明慧,郑继明. 基于 Bass 模型的移动电话用户数扩散研究[J]. 科技管理研究,2006(5):121-123.
- [3] 陈国宏,王丽丽,蔡猷花. 基于 Bass 修正模型的产业集群技术创新扩散研究[J]. 中国管理科学,2010,18(5):179-183.
- [4] 张磊,吕裔良. 快速消费品产品扩散的模型研究——以中国乳制品为例[J]. 预测,2009,28(1):30-35.
- [5] 王子敏,杨小军. 居民生活能耗增长的分解与影响因素研究——基于习惯形成视角[J]. 北京理工大学学报:社会科学版,2013,15(5):36-42.
- [6] 赵骅,杨雨雨. 基于 Bass 模型的新产品潜在收益分布研究[J]. 科技进步与对策,2007,24(2):168-171.
- [7] Jacob Goldenberg, Barak Libai, Eitan Muller. Using complex systems analysis to advance marketing theory development: modeling heterogeneity effects on new product growth through stochastic cellular automata [J]. Academy of Marketing Science Review,2001(1):1-18.
- [8] Renato Guseo M G. Modelling a dynamic market potential: a class of automata networks for diffusion of innovations[J]. Technological Forecasting & Social Change,2009,76(6):806-820.
- [9] Renato Guseo M G. Cellular automata with network incubation in information technology diffusion[J]. Physica A,2010,389(12):2422-2433.
- [10] 方亮,龚晓光,肖人彬. 技术创新扩散的元胞自动机仿真[J]. 系统仿真技术,2007,3(2):82-89.
- [11] 张燕芳,熊海灵. 基于 Bass 与元胞自动机混合模型的快速消费品产品扩散研究[J]. 计算机应用,2011,31(12):3305-3308.
- [12] Ndzibah E. Diffusion of solar solution in developing countries—focus group study in Ghana[EB/OL].(2012-11-06)[2013-03-12]. http://www.fonfole.com/al_diffusionnofsolarsolution862009.html.
- [13] IEA. Barriers to technology diffusion: the case of solar thermal technologies [EB/OL]. (2008-10-24)[2013-03-12]. <http://www.earth-policy.org/UpdateS/2008/Update73.htm>.
- [14] Sidiras D K. Solar systems diffusion in local markets[J]. Energy Policy,2004,32(18):2007-2018.
- [15] Keirstead J. Behavioural responses to photovoltaic systems in the UK domestic sector[J].Energy Policy,2007,35(8):4218-4141.
- [16] Nouni M R, Mullick S C, Kandpal T C. Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in India [J]. Energy Policy,2007,35(4):2497-2506.
- [17] Hildigunnur H T, Jefferson W T. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States[J]. Energy Policy,2010,38(2):803-813.
- [18] 大矶一,蒋国磊. 关于日本 3G 移动通信扩散的研究[J]. 世界经济情况,2010(5):12-18.
- [19] 葛学峰,武春友. 乡村旅游偏好差异测量研究:基于离散选择模型[J]. 旅游学刊,2010,25(1)48-52.
- [20] 王全胜,韩顺平,吴陆平. 客户异质性与银行服务渠道选择[J]. 山西财经大学学报,2010,32(8)24-30.

A Cellular Automata Model of Technology Diffusion Based on Discrete Choice

ZHANG Lei, SHI Chunxiu, GAO Wei

(School of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: The traditional innovation diffusion models which are mostly based on BASS model can't describe the influence of individual personalities, and can't depict the patterns of diffusion in the case that the user abandons the application during the process. For this, this article introduces discrete choice theory into innovation diffusion field to study the influence of personal characters, and combining with cellular automata technology, it builds a hybrid innovation diffusion model. This model is used to simulate the diffusion of Solar Water Heater (SWH) in China's rural areas and it is found that this model can fit the actual diffusion data very well and explain the impact of individual characters on diffusion process. In contrast with the traditional theory, it is discovered that the diffusion speed doesn't display a simple linear relationship correlated to oral communication. Instead, there is a critical value and after this value, the impact of oral communication on diffusion will increasingly decrease.

Key words: decentralized renewable energy; technology diffusion; discrete choice; cellular automata

[责任编辑:孟青]