

基于元胞自动机的区域产业发展影响因素研究

杜悦, 杨朝峰

(中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘要: 文章基于元胞自动机原理, 建立了分析区域产业发展影响因素的元胞自动机扩展模型, 对各因素的影响效应进行了仿真实验。结果表明, 自然资源、政府支持、市场需求、技术水平和劳动力水平都对区域产业发展有正向影响, 通过灵敏性分析得出产业总产值对技术水平的变化最为敏感。最后, 结合实验结果对区域产业发展提出相关建议。

关键词: 元胞自动机; 产业发展; 影响因素研究

中图分类号: F011 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2018.05.009

波特^[1]在竞争优势理论中曾指出, 国家和地区是否具有竞争优势主要是看在该国家或地区内是否形成了具有竞争力的产业集群, 产业集群的发展对地区经济增长有重要意义。产业的发展往往受到一定条件的约束, 例如生产要素约束、技术约束、市场约束等, 区域是否具备这些条件对区域内产业的发展有着至关重要的作用。因此, 对区域产业发展影响因素进行分析, 得到各因素对产业集群的影响特点具有重要研究意义。以往有关产业集群发展影响因素的研究大多是进行定性分析, 定量研究较为罕见, 因此本文将产业集群发展影响因素的定量分析作为研究切入点。由于产业发展的实际数据难以收集, 因此引入了元胞自动机(CA)模型对各影响因素进行仿真演化分析。

1 元胞自动机模型简介

1.1 模型说明

元胞自动机模型起源于20世纪50年代, 是由冯·诺伊曼^[2]参照生物现象的自繁殖原理提出来的。它是一种在空间和时间上都离散的网格动力学模型, 能够通过仿真模拟分析复杂的行为。20世纪60年代末, 约翰·何顿·康威(John Horton Conway)^[3]编制的“生命游戏”完全体现了动态元胞自动机的特征,

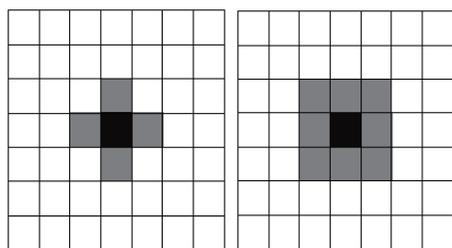
显示了元胞自动机在模拟复杂性系统方面具有无穷潜力, 因此被认为是元胞自动机研究的真正开始。20世纪80年代, 元胞自动机理论经历了黄金发展期, 史蒂芬·沃福曼(Stephen Wolfram)^[4]从动力学的角度对元胞自动机进行了分析, 并将计算机理论应用于元胞自动机的研究。元胞自动机开创了复杂性系统研究的新途径, 可以广泛应用于社会、金融、经济、物理、化学、生物等各个领域。

一个完整的元胞自动机包括元胞(Cell)、元胞空间(Lattice)、邻居(Neighbor)、元胞状态(State)、元胞状态更新规则(Rule)和时间(Time)6个基本元素^[5]。元胞是组成元胞自动机的最基本元素, 是模型进行仿真实验时作用的对象。元胞空间是指元胞分布所在的空间单元格的集合。理论上, 元胞空间可以是任意维度, 并且能够无限延伸, 但由于受到计算机的限制, 现在多使用二维空间。元胞空间的边界有定值型、周期型和反射型3种。元胞状态是指在某一时刻元胞所处的状态, 代表该时刻该元胞所持有的态度或行为。邻居是指针对某一元胞, 在空间位置上与其相邻的元胞, 所有邻居元胞构成的集合称为该中心元胞的邻域。二维元胞自动机常用的有冯·诺依曼型和摩尔型邻域, 如图1所示。元胞状态更新规则是元胞自动机中最核心的

第一作者简介: 杜悦(1995—), 女, 硕士研究生在读, 主要研究方向为科技战略与政策。

收稿日期: 2018-04-20

部分^[6], 是中心元胞从某一时刻状态向下一时刻状态转变所依据的规则。时间是指元胞自动机模型仿真演化的期数。



冯·诺依曼型 ($r=1$) 摩尔型 ($r=1$)

图 1 二维元胞自动机邻域

1.2 模型适用性分析

元胞自动机模型是一种研究复杂系统的工具, 采用一种自下而上的思想进行建模, 通过系统组成单元间的相互作用来模拟系统的整体行为。以系统的观念来看, 产业集群是相关企业集聚在一起, 各企业之间或多或少有某种关联, 在一定程度上会互相影响彼此的行为^[7]。具体来说, 产业集群在发展过程中, 处于集群内的各个企业是独立的个体, 会在某一时刻根据自身、所处环境和相关企业的变化, 来选取某种决策决定其下一时刻的行为状态和效益。而元胞自动机也将元胞空间中的元胞都视为独立个体, 每个个体在任一时刻都会根据自身情况和相邻个体的行为, 在一定规则下采取某种决策来决定其下一时刻的状态。因此, 元胞自动机的运作机理是适合产业集群发展研究的。

此外, 元胞自动机提供的是一种研究思想和方法框架, 具有极大的灵活性, 使用者可以根据自己的需求对模型进行灵活扩展, 这也保证了元胞自动机模型在应用时的针对性。

2 区域产业发展元胞自动机模型

2.1 模型的建立

在标准元胞自动机模型基础上, 加入符合本研究的系统特征指标和产业发展影响因素, 构成适合本研究的元胞自动机扩展模型。用数学符号表示如下:

$$S_{t+1} = f(S_t, L, \Phi, N, I, E)$$

f 代表元胞状态更新规则。

t 表示仿真演化期数, 本实验选取仿真总期数

$TIME$ 为 100。由于元胞自动机的时间离散性, t 取 0~100 的整数。

S_{t+1} 和 S_t 分别代表在 $t+1$ 时刻和 t 时刻各企业的资金存量, 企业在 $t+1$ 时刻的资金存量与 t 时刻企业所采取的行为和 t 时刻企业的资金存量有关。当企业在 t 时刻采取投资策略时, $S_{t+1}(i, j) = S_t(i, j) + 1$; 当企业在 t 时刻采取撤资策略时, $S_{t+1}(i, j) = S_t(i, j) - 1$; 当企业在 t 时刻既不投资也不撤资时, $S_{t+1}(i, j) = S_t(i, j)$ 。

L 是元胞空间, 代表区域产业集群内所有企业的集合。

Φ 代表元胞间相互作用的邻域, 本文使用的是摩尔型 ($r=1$) 邻域。

N 表示产业集群中位于某个企业邻域内的所有企业的状态集合。

I 是系统特征指标。本研究选取的特征指标是总产值。

E 表示区域产业发展影响因素。

2.2 影响因素及系统特征指标函数选取

2.2.1 影响因素函数选取

自然资源是产业发展的物质基础, 需求拉动是产业发展最重要的动力, 政府支持能够为产业创造良好的发展环境, 技术水平和人才是区域产业实现差异化发展和提高竞争力的根本。因此本研究选取的区域产业发展影响因素有自然资源、政府支持、市场需求、技术水平和人力资本。

(1) 自然资源

产业发展初期, 集群内企业不多, 自然资源消耗比较缓慢; 产业发展到鼎盛时期时, 集群内企业越来越多, 竞争激烈, 对资源的需求也随之增大, 自然资源呈加速减少状态; 到了衰退期, 产业内发展环境恶化, 有不少企业退出产业集群, 自然资源的消耗量又逐渐平缓下来。自然资源随仿真时期的变化用函数表示如下 (式中参数参考已有研究, 并根据本研究的实际情况进行修正, 下同):

$$res(t) = (3 - 0.02t) - \frac{R_0}{1 + 100 \times e^{-cval(t)}}$$

上式中 $res(t)$ 代表产业集群自然资源供给能力; R_0 代表自然资源的消耗速率; $cval(t)$ 是 t 时期的产业总产值 (在后文中有定义)。

(2) 市场需求

产业在发展过程中,随着产业规模的不断扩大,市场份额在不断扩大,市场需求量也随之增加。产业集群的市场需求随仿真时期变化的函数表示如下:

$$market(t)=M_0+0.01 \times round\left(\frac{90t}{TIME}\right)$$

上式中 $market(t)$ 表示市场需求量; M_0 表示市场需求量初始值。

(3) 政府支持

政府通常会颁布一些政策(如税收、贷款、知识产权保护等)来支持产业发展。随着产业的发展,到了一定阶段,政府支持力度会产生边际效应递减。因此,政府对产业的支持力度呈现出一种 S 型曲线非线性增长,用函数表示如下:

$$gov(t)=G_0+\frac{1}{1+100 \times e^{-10t/TIME}}$$

上式中 $gov(t)$ 代表政府对产业的支持力度; G_0 代表政府支持力度的初始值。

(4) 技术水平

当企业技术水平提高时,企业的生产效率和资源利用率也相应提高,相同量生产要素的投入可以获取更大的收益^[7]。企业技术水平随时间的变化也是呈 S 型非线性提高,用数学公式表示如下:

$$ct(t)=\frac{CT_0}{1+100 \times e^{-10t/TIME}}$$

上式中 $ct(t)$ 是指在 t 时刻企业的技术水平; CT_0 为幅度变量。

(5) 人力资本

产业在发展初期时,由于产业内企业数量较少,对人才需求量较低;随着产业的不断发展,产业内企业数量逐渐增多,对高素质人才的需求也愈来愈大,大批人才开始涌入产业内;当产业发展到后期开始有衰退趋势时,产业发展环境恶化,企业内各阶层员工开始不断离开去追寻更好的发展机会。由此看出,企业的人力资本存量随着时间的推移呈现出一种“倒 U”的形式。用公式表示如下:

$$lab(t)=\frac{1}{1+100 \times e^{-10t/TIME}} \times \frac{t \times (1-t/TIME)}{TIME} \times LABS$$

上式中 $lab(t)$ 是指在 t 时刻企业的人力资本存量; $LABS$ 是幅度变量。

2.2.2 系统特征指标

由于总产值在一定程度上可以反映出一定时期内的产业规模和发展水平,因此系统特征指标选用产业总产值,产业总产值是产业集群中所有企业的产值之和^[8]。企业的产值计算方式引用的是柯布-道格拉斯生产函数,将原函数中的劳动力数量替换成人力资本存量来进行计算。根据该生产函数,在模型中位于网格 (i, j) 的企业的产值函数如下:

$$cv_i(i, j)=ct_i(i, j) \times S_i(i, j)^{0.25} \times lab_i(i, j)^{0.75}$$

上式中 $ct_i(i, j)$ 表示企业技术水平, $S_i(i, j)$ 表示企业资金投入量, $lab_i(i, j)$ 表示企业人力资本存量。

产业总产值在模型中表现为位于网格中的所有企业的产值总和,用函数表示如下:

$$cvall(t)=\sum_{i=1}^{30} \sum_{j=1}^{30} cv_i(i, j)$$

2.3 元胞状态更新规则

模型假设当产业集群内的企业数量不超过总容量的 20% 时,产业集群内的竞争不是很激烈,自然资源比较富足,会吸引各已入群企业和潜在入群企业按照一定概率做出投资决策。当产业集群内的企业数量超过总容量的 80% 时,产业内市场竞争激烈,发展环境恶化。各企业开始收拢资金,在集群外寻求更好的投资环境,因此集群内企业会按照一定概率做出撤资决策。企业是否入群通过 $S_i(i, j)$ 来表示,当 $S_i(i, j) > 0$ 时,代表处于 (i, j) 位置的企业已经入群;当 $S_i(i, j) = 0$ 时,代表 (i, j) 位置还没有被企业占领。即在 t 时刻,状态大于 0 的元胞个数的总和就是在该时刻产业集群内企业的总数目。

由于企业存在模仿效应,会根据周围企业的行为做出自己的决策,因此模型假定,当企业的邻域中有 30% 以上的企业采取同一种决策时,该企业也会以一定概率选取相同策略。将某企业邻域中采取投资策略的企业的比例记作 $N_1(i, j)$, 采取撤资策略的企业的比例记作 $N_2(i, j)$, 采取不投资不撤资的企业的比例记作 $N_3(i, j)$ 。 $N_1(i, j)$ 、 $N_2(i, j)$ 和 $N_3(i, j)$ 之和为 1。

当产业集群内的企业数量在总容量的 20% 到 80% 之间时,通过环境影响因素表示产业集群内是否具备良好的发展环境。通过影响因素函数式计算自然资源、市场需求、政府支持、技术水平、劳动力供给这几个因素的值,当它们分别都大于实验

中所设定的阈值, 即满足企业良好发展条件时, 如果 $N_1(i, j) > 0.3$, 企业以一定概率采取投资策略, 否则采取不投资不撤资策略; 当这 5 个因素计算值都小于阈值时, 如果 $N_2(i, j) > 0.3$, 企业以一定概率采取撤资策略, 否则不投资不撤资。

3 仿真实验及结果分析

3.1 实验基本思想

仿真实验的基本思想是以自然资源、市场需求、政府支持、技术水平和劳动力水平为工具变量, 产业总产值为目标变量, 分析不同因素变化对区域产业发展的影响。本文一共设计了 6 个实验方案, 包括 1 个基本方案和 5 个对比方案。实验选用 30×30 的网格空间, 代表产业内企业最大容量为 900 家, 仿真期数 $TIME$ 设为 100。为了减轻实验中随机数对实验结果的影响, 共进行了 100 次实验, 用这 100 次实验结果的平均值来表示最终实验结果。

基本方案 (即设初值): $R_0=0.2$, $M_0=0.4$, $G_0=0.4$, $CT_0=0.8$, $LABS=4$ 。

对比方案 1: 在基本方案基础上, 将 R_0 增加至 0.6, 仅考虑资源消耗速度增大后对产业总产值的影响。

对比方案 2: 在基本方案基础上, 将 M_0 减小至 0.1, 仅考虑缩小市场需求后对产业总产值的影响。

对比方案 3: 在基本方案基础上, 将 G_0 减小至 0, 仅考虑去掉政府支持力度后对产业总产值的影响。

对比方案 4: 在基本方案基础上, 将 CT_0 减少至 0.3, 仅考虑降低技术水平增长幅度后对产业总产值的影响。

对比方案 5: 在基本方案基础上, 将 $LABS$ 减小至 2, 仅考虑降低人力资本存量增长幅度后对产业总产值的影响。

3.2 实验结果分析

3.2.1 基本方案

从图 2 可看出, 在基本方案下, 当 $t=70$ 时, 产业总产值达到最大值 561.4。

3.2.2 对比方案 1

从图 3 可以看出, 产业总产值峰值为 528, 与

基本方案相比有所下降。当企业资源消耗率增大时, 相同单位的资源创造出相对较少的价值, 产业总产值也随之降低。自然资源对于资源依赖型产业的影响更为明显, 例如石油、煤矿、钢铁等产业。

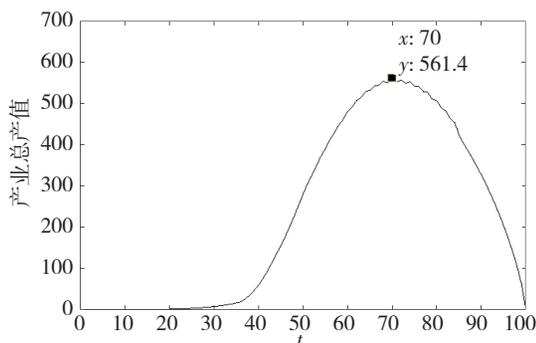


图 2 基本方案产业总产值随时间变化图

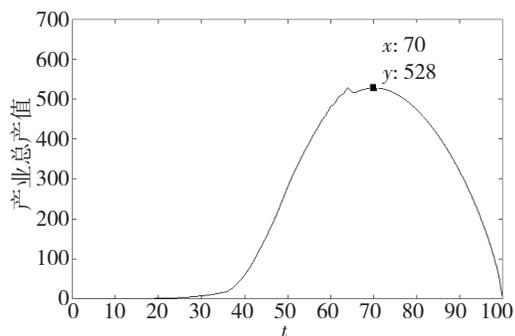


图 3 基于自然资源消耗变化的产业总产值随时间变化图

3.2.3 对比方案 2

从图 4 可以看出, 产业总产值峰值为 529.2, 与基本方案相比有所下降。当市场需求下降时, 企业会缩小生产规模以规避市场风险, 导致产业总产值下降。

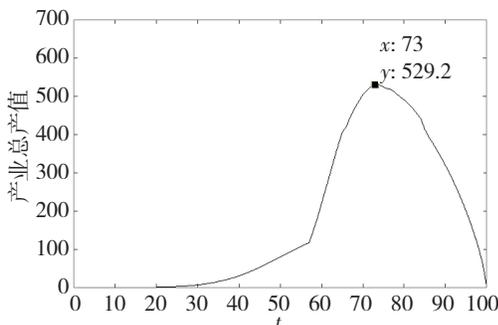


图 4 基于市场需求变化的产业总产值随时间变化图

3.2.4 对比方案 3

从图 5 可以看出, 产业总产值峰值为 545.7, 与基本方案相比有所减少。政府支持体现在政府针

对产业发展的政策制定上,例如通过加大对人才、中介服务机构、资金等的吸引力度来优化产业内部发展环境,从而达到促进产业发展的目的。当政府支持力度减小时,会对产业发展带来负面影响,从而使产业总产值也随之减少。例如在北京中关村高技术产业发展过程中,政府支持就起到了重要作用。尤其是在1988—1999年产业集群从开始形成到逐步稳定阶段,政府出台一系列促进中关村高技术产业发展的政策,改善了区域产业发展环境,推动产业稳步发展。

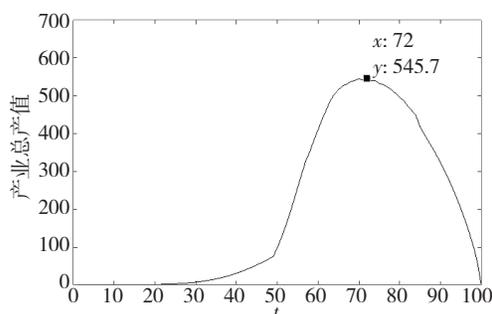


图5 基于政府支持力度变化的产业总产值随时间变化图
3.2.5 对比方案4

从图6可以看出,产业总产值峰值为205.8,与基本方案相比大幅下降。这是由于当技术水平下降时,区域产业集群内生产效率降低,对拥有的各种资源不能进行充分利用,抑制了产业集群的发展,产业总产值也随之降低。技术水平的提高能够为区域产业集群带来竞争力,例如美国硅谷一直秉持着鼓励创新的理念,尤其是技术创新,很多引领全球的高技术产品都诞生于此地。

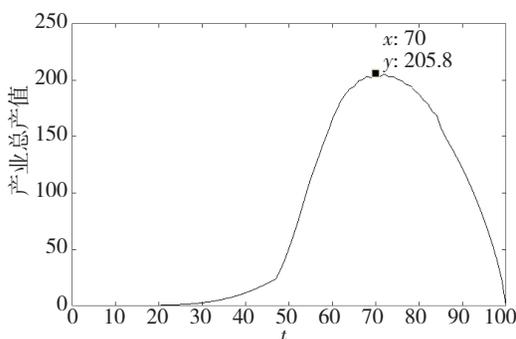


图6 基于技术水平增长幅度变化的产业总产值随时间变化图

3.2.6 对比方案5

从图7可以看出,产业总产值峰值为325.8,与基本方案相比,总产值大幅下降。由于人力资本

存量下降造成企业的人才缺失,在一定程度上阻碍了企业的发展,使得产业总产值减少。人力资本存量的积累能够推动产业的发展,例如,浙江宁波一直是商品经济较发达地区,积累了大量的熟练劳动力,这些劳动力对宁波服装产业的形成和发展起到重要作用,企业家人才和专业人才共同带领产业创新发展,不断提高该区域产业竞争力。

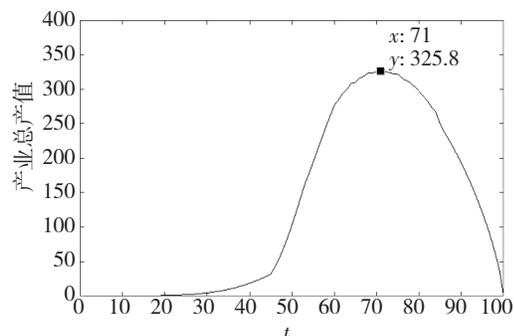


图7 基于人力资本变化的产业总产值随时间变化图

为进一步分析各影响因素对产业发展的影响程度,在此引入灵敏性分析。对照对比方案和基本方案的结果,通过产业总产值峰值的变化大小和影响因素改变量来计算产业总产值峰值对各影响因素的敏感度。计算公式如下(计算结果取绝对值):

产业总产值峰值对各影响因素的敏感度 = 产业总产值峰值的变化率 / 各影响因素的变化率

各影响因素的灵敏性分析计算结果如表1最右列所示,从表格中可以看出,总产值对各影响因素的敏感程度是不同的。

通过计算产业最大总产值对各影响因素的敏感度,得出产业总产值对技术水平和人力资本存量的变化最敏感,市场需求、自然资源和政府支持次之。

表1 影响因素灵敏性分析结果

影响因素 改变量	总产值 峰值	总产值 峰值 变动量	总产值峰值对 各影响因素的 敏感度	
基本方案	—	561.4	—	
自然资源	0.4	528.0	33.4	0.0297
市场需求	0.3	529.2	32.2	0.0765
政府支持	0.4	545.7	15.7	0.0280
技术水平	0.5	205.8	355.6	1.0135
人力资本	2.0	325.8	235.6	0.8393

4 建议

结合前文对实验结果的分析, 对区域产业发展提出以下建议:

(1) 重视技术创新。区域产业发展离不开技术创新。技术创新能够提高产业的技术水平, 进而带动产业生产率的上升, 为产业带来更大收益。随着先进技术的不断发展, 自然资源的消耗速率会降低, 有望实现产业的可持续发展。技术水平的提高还能够推动企业乃至产业的差异化发展, 促进集群内企业生产高质量产品或研发新产品, 满足消费者不断升级的需求, 提高整体区域产业集群在市场上的竞争力。

(2) 重视人才的引进和激励。人力资本对产业发展的影响不容忽视, 人是一切产业活动的主体, 人才是发明创造的承担者, 产业应积极引进优秀人才。政府应帮助产业搭建人才引进平台和强化人才激励制度, 通过颁布住房、户口、医疗、教育等方面的优惠政策吸引人才和留住人才。

(3) 营造良好的产业发展环境。良好的产业发展环境能够推动产业的持续发展, 政府要为产业提供良好的营商环境。主要包括政府简化审批流程、加大金融扶持力度、优化市场环境、规范中介管理等手段。对于首次投向市场、具有先进技术和潜在生产能力的产品, 政府可重点扶持, 由于其暂时还不具备市场竞争力, 可通过首购政策帮助其打开潜在市场。

最后需要说明的是, 由于一些主观和客观因

素, 本研究在影响因素的选取及函数的形式和参数确定上还存在一些欠缺, 需要在日后的研究中进一步完善。■

参考文献:

- [1] Porter M E. Cluster and the new economics of competition. [J]. Harvard Business Review, 1998, 76(6): 77-90.
- [2] Von Neumann J. The general and logical theory of automata[C]. James R Newman. The World of Mathematics vol4. New York:Simon and Schuster,1956:2070-2098.
- [3] Oxman G, Weiss S, Be' Ery Y. Computational methods for Conway's Game of Life cellular automaton[J]. Journal of Computational Science,2014,5(1): 24-31.
- [4] Wolfram S. Computation theory of cellular automata[J]. Communications in Mathematical Physics, 1984, 96(1): 15-57.
- [5] 周成虎. 地理元胞自动机研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 33-38.
- [6] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns[J]. Environment & Planning A, 1993, 25(8): 1175-1199.
- [7] 周琴. 基于元胞自动机的产业集群效应研究 [D]. 福州: 福州大学, 2010.
- [8] 林渝晟. 基于元胞自动机模型的产业集群合理规模研究 [D]. 福州: 福州大学, 2006.

Research on Influencing Factors of Regional Industry Development Based on Cellular Automata

DU Yue, YANG Chao-feng

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract: Based on the principle of cellular automata, the paper establishes an extended model of cellular automata that analyzes the influencing factors of regional industry development, and conducts simulation experiments on the effects of various factors. The results show that natural resources, government support, market demand, technological level and labor force level all have a positive impact on the development of regional industries. Sensitivity analysis shows that the industrial output value is the most sensitive factor to technological change. Finally, combined with the experimental results, the paper puts forward some related suggestions to the development of regional industries.

Key words: cellular automata; industrial development; research on influencing factors