

# 城市空间扩展模型及对长沙市的模拟研究

朱顺娟<sup>1</sup>, 陈群元<sup>2,3</sup>, 游胜景<sup>3</sup>

(1. 中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075;  
2. 长沙市规划局, 长沙 410075; 3. 长沙市规划信息服务中心, 长沙 410075)

**摘要:** 借鉴传统的元胞自动机模型自下而上的运行规则,通过引入规划控制层,将自下而上和自上而下2种运行规则结合起来,构建了城市空间扩展模型,简化了传统城市空间扩展模型计算的数据量。以长沙市为例,采用1996,1999,2002,2005年城市规划资料数据,运用城市空间扩展模型将长沙城市空间分为12个组团分片模拟,并结合人口经济模型,预测了2020年长沙城市建设用地面积、人口经济与各个片区城市空间扩展等状况,为城市规划管理决策提供参考。

**关键词:** 元胞自动机模型;城市空间扩展模型;人口经济模型;长沙市  
**中图分类号:** F291.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-2363(2011)01-0065-04

元胞自动机(Cellular Automata,简称CA),设计思想起源于20世纪30年代英国科学家Turing的通用图灵机<sup>[1]</sup>。元胞自动机就是在通用图灵机思想的启发下,最早由约翰·冯·诺伊曼(Von Neumann)和乌拉姆(Ulam)在20世纪40年代提出,并用于研究自复制系统的逻辑特性<sup>[2-3]</sup>。近年来,随着地理信息系统的迅速发展,CA与GIS的结合也越来越紧密,两者相互弥补、相互促进,不仅增强了GIS的空间模型运算及分析能力,也使得CA技术在城市空间演化模拟中的应用更加广泛和深入<sup>[4]</sup>。作者在传统自下而上CA模型的基础上<sup>[5-10]</sup>,结合城市空间扩展规律,引入自上而下的运行机制,对传统CA模型进行了扩展,构建了一个城市空间扩展模型。并运用城市空间扩展模型(urban space expand model,简称USEM)对长沙市的城市空间扩展进行了动态模拟。

## 1 USEM 的构建原理

### 1.1 USEM 模型的建模思路

**1.1.1 元胞状态的变革。**传统的元胞自动机模型的元胞状态,一般定义为一定分辨率,如50 m×50 m,或100 m×100 m等分辨率的正方形像元,城市空间的扩展按这种统一大小的像元生长,这与现实的城市空间扩展不太相符合。现实的城市空间扩展是按各建设单位所征地块不断扩展的,征用的地块一般是不规则的、大小不一的。因此,该研究中将30 m×30 m的元胞作为一个基本单元,按照控制性详细规划划分的地块建立一个地块属性,同一地块的所有像元即元胞在USEM模型中从属于同一地块属性,有效地解决了元胞状态与实际城市地

理空间单元的一致性问题。

**1.1.2 运行规则的变革。**传统的元胞自动机模型的运行规则,在设计上都是自下而上的运行规划。而现实中城市空间的扩展受到城市发展政策和规划管理等自上而下的宏观控制作用非常强烈,因此,USEM模型的运动规则,在设计上充分考虑了这方面的影响。如通过将城市空间按组团分成12个片区,各个片区的发展速度受城市规划政策优先程度不一样,通过对不同的片区输入不同的规划约束系数,可以依据政策的变化灵活地改变各片区的空间扩展速度,并可直观地预测不同空间发展政策下城市空间的演变。

**1.1.3 模型实用性的扩充。**传统的元胞自动机主要基于一种预测功能,其他功能如分析统计功能非常弱。USEM模型的设计不仅在于预测功能上的考虑,而且由于元胞状态是基于控制性详细规划的地块,地块本身具有用地性质、面积、容积率、建筑密度、绿地率、建筑限高等属性,因此,可以充分利用这些属性特点,使模型具有统计分析不同年份城市和城市组团的总建设用地面积及各类用地面积的功能,并且结合统计回归模型,使模型具有预测城市人口规模和经济发展的功能。

### 1.2 USEM 的数据要求

以长沙市为例,USEM结合城市规划资料,数据为1996,1999,2002,2005年的城市遥感影像图和测绘现状图、城市控制性详细规划图与城市路网总图。

### 1.3 USEM 的增长规则

USEM从一组起始条件开始,然后用一些增长规则用于城市模拟。城市扩展的动态性用自然增长、新兴建成区增长、边缘增长、沿交通网络增长4个规则表示和1个规划约束系数控制。其中,4个规则受散布参数(spread-coefficient)、繁殖参数(breed-coefficient)、传播参数(dispersion-coefficient)、道路吸引力参数(road-coefficient)相互交叉影响。这些增长规则连续作用,在应用

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2010-12-17  
基金项目: 国家自然科学基金项目(40571061)  
作者简介: 朱顺娟(1983-),女,湖南衡阳人,博士研究生,主要从事城市规划理论与方法研究, (E-mail) zsj\_urban01@163.com。

每个规则之后,整个空间元胞的状态被更新;并且针对大城市空间范围广,城市空间内部受自然地理条件、社会经济发展基础、城市规划政策、城市发展政策、城市地缘环境等因素的影响和制约,不同组团空间上的发展速度和发展规模是不一样的。因此,在将模型运用于长沙城市空间形态的模拟时将长沙都市区划分为 12 个组团,应用这 4 个规则分别得出不同组团的的不同增长参数。

为了对城市空间扩展进行规划调控,USEM 中为 4 个参数各设置了一个规划约束系数( planning constraints coefficient)。如当某组团片区规划期内有重要城市交通轴线修建,沿交通线轴向扩展比较明显,则在原来的道路吸引力参数上乘上一个大于 1 的规划道路约束系数;由于城市发展政策的调整,所以,当某个组团片区被新确定为城市发展新区,预以重点发展,则在该组团片区的原有繁殖参数乘上一个大于 1 的相应规划繁殖约束系数,否则,如某组团属于限制发展空间,则乘以一个小于 1 的规划约束系数。这样使模型更能反映规划意图和更具灵活性。USEM 通过上述 4 个增长规则和 1 个规划约束系数来共同模拟城市的空间扩展过程。

2 USEM 的校验与评价

2.1 模型的最佳参数校验

USEM 首先设定散布参数、繁殖参数、传播参数和道路及引力参数的初始值,然后将参数和需要的数据输入到模型。首先将 1996 年的城市各组团片区用地现状数据层作为“种子点”输入模型,运行模型,产生城市的下一时相即 1999 年的模拟结果,可以得到一组参数;然后以 1999 年的实际数据层作为种子点继续运行模型,得到下一时相 2002 年的模拟结果,又可以得到一组参数;最后以 2002 年的实际数据层作为种子点继续运行模型,得到下一时相 2005 年的模拟结果,又可以得到一组参数。分别对这 3 组参数进行三级修正校验,得出 3 组最优参数,分别利用这 3 组最优参数去作为 3 个时相的模拟参数,通过比较 3 组最佳参数各自的模拟效果,确定效果最好的一组参数作为以 2005 年为种子点,去模拟预测以

后时段的城市空间演变。

2.2 模型的评价指标

2.2.1 形状指数。形状指数可以反映 2 个数据面数据空间分布的相似性。它首先计算模拟结果与验证数据的空间交集和并集,交集和并集的面积比即为形状指数。公式如下,即

$$L = A_0 \cap A_1 / A_0 \cup A_1。$$
 (1)

式中:  $L$  表示形状指数;  $A_0$  表示模拟结果;  $A_1$  表示验证数据。在理想情况下,这个指数可以为 1,即模拟结果与验证数据完全一致。但在实际模拟中,是不可能达到那么高的精度的,一般只能达到 0.3 ~ 0.7。

2.2.2 面积比指数。面积比指数  $A$  是指模型模拟的建筑用地面积  $A_0$  与实际面积  $A_1$  之间的比值。算法如下,即如果  $A_0 \leq A_1$ ,  $A = A_0/A_1$ , 则

$$A = 2 - A_0/A_1。$$
 (2)

从上式可以看出,当  $A_0 = A_1$  的时候,即模拟的面积和实际面积相等的理想状态下,指数  $A$  最大,为 1。

2.3 模型的参数自修正机制

为了提高模型的灵活性与实用性,USEM 引入了参数自修正的机制:根据城市的实际情况,设定一个一年内城市增长的最大限值如为 10% 和一个最小限值如为 1%,再设定参数修正的灵敏度如为 0.1 或更小,这样在 USEM 运行过程中判断城市的发展情况,当发展速度超过了最大发展限值时,便相应地减小参数值,当发展速度低于最低限值时候,则加大参数的值。增加或减少的大小则依据参数修正的灵敏度值确定。这样,USEM 在运行过程中不断调整参数值,使参数趋于合理化,模型也更加灵活和实用。

2.4 模型的人口与经济预测模块

城市人口规模和城市经济发展与城市建设用地面积是否存在可以用数学模型表示的内在关系,为了揭示长沙城市人口规模和长沙城市经济发展与长沙城市建设用地面积的内在规律,首先对这 3 组数量的历史数据(表 1)运用 SPSS 软件进行分析。

表 1 长沙市不同年份的城市建设用地面积、GDP 和城市人口

Tab.1 Urban construction land area, GDP and population in Changsha City in different annual

年份	1949	1965	1978	1990	2000	2003	2004
建设用地面积/km <sup>2</sup>	6.70	20.93	53.04	101.00	118.82	135.84	142.00
GDP/亿元	2.87	7.02	16.84	101.46	656.41	929.49	1 133.88
城市人口/万人	38.35	76.77	94.83	132.68	175.41	196.26	202.46

通过散点图得出,长沙城市人口规模与长沙城市建设用地面积线性分布较好,城市国内生产总值与长沙城市建设用地面积二次曲线分布较好。进一步以城市建设用地面积( $S$ )作自变量,城市人口( $P$ )作因变量,作线性回归分析,可以得到两者的相关系数  $R = 0.985$ ,  $F$

$= 163.799$ ,显著性概率  $Sig. F = 0.000 < 0.005$ ,说明这 2 个变量存在高度显著的线性函数关系,其线性回归方程为

$$P = 37.810 + 1.128 S。$$
 (3)

再以城市建设用地面积作自变量,城市国内生产总

值(  $G$  ) 作因变量,作二次曲线拟合,拟合的二次曲线模型的复相关系数  $R = 0.977$ ,  $F = 42.668$ , 显著性概率  $Sig. F = 0.002 < 0.005$ , 说明这 2 个变量存在高度显著的二次函数关系,拟合的二次曲线方程为

$$G = 144.936 - 11.386 S + 0.127 S^2。$$
 (4)

根据 USEM 预测的城市建设用地面积,通过嵌入以上 2 个模型可以预测城市人口规模和城市经济总量。

### 3 USEM 的模拟结果

分析 1999,2002,2005 年的现状图与模拟图,得出各年份的形状指数和面积指数(表 2)。1999 年的形状比为 0.56,相对低一点,其原因是 1999 年的现状图数据来源于遥感影像图,误差较大,且城市空间出现 2 个新增增长点,既正东方向的黄花国际和西北方向的高星组团;2002 和 2005 年的形状比分别为 0.61 和 0.66,模拟的形状与实际的形状很相似,特别是 2005 年的整体面积比高达 0.99 以上,而 2005 年的各组团片区的形状比和面积都比较高,模拟结果较为理想。该研究的模拟预测以 2005 年的现状数据作为起始数据,在各组团片区的规划约束系数均为 1 的条件下,即在城市空间各组团片区按现有发展趋势发展的情况下,假设都市区控制性详细规划在不变更和不调整的情况下,用 2002—2005 年时相的最佳参数去模拟预测 2020 年的城市空间扩展。此外,在 USEM 中,根据需要还可以灵活地通过调整不同组团片区的规划约束系数,产生不同的规划模拟结果,便于辅助规划决策。

表 2 各年份的整体形状比、面积比和得分

Tab.2 Shape ratio and area ratio of the whole urban districts in 1999, 2002 and 2005			
年份	1999	2002	2005
形状比(L)	0.56	0.61	0.66
面积比(A)	0.95	0.91	0.99
总分数(L×A)	0.53	0.55	0.65

从模拟预测结果来看,按现有发展趋势,长沙市城

市空间向南向东向西扩展的趋势特别明显,与总体规划中“南进东接西拓”的发展思想相吻合。长沙城市空间“东重西轻”的格局在未来逐渐改变,但随即也会出现东西向交通压力的大增,以及湘江以东越来越紧凑,组团之间的界线趋于消失,这些都需要引起注意和采取相应解决措施。

从 USEM 对城市经济技术指标模拟结果来看,2020 年长沙市都市区城区人口规模模拟预测将达到 307 万人,国内生产总值达到 4 652.59 亿元(表 3)。其中,预测人口与长沙市 2003 年版总体规划预测的到 2020 年城市人口规模达到 310 万人数字非常吻合,两者具有殊途同归、异曲同工之妙。说明了 USEM 预测在一定程度上存在合理性。本模型中模拟预测的城市建设用地面积不包括绿地面积和道路广场面积,模型预测到 2020 年的建设用地面积为 238.37 km<sup>2</sup>,加上规划的绿地面积 38 km<sup>2</sup> 和道路广场面积 51.83 km<sup>2</sup>,总建设用地面积为 327.20 km<sup>2</sup>,比总体规划中按照人均 100 m<sup>2</sup> 建设用地面积的规划技术标准规划的到 2020 年建设用地面积 310.00 km<sup>2</sup> 略多 17.20 km<sup>2</sup>。因此,USEM 模拟的城市建设用地面积与城市总体规划中规划的面积也比较接近,出现误差的主要原因是模型中的面积计算是通过网格方式计算的。模拟预测到 2020 年未建的可城市化用地为 113.64 km<sup>2</sup>(不包括绿地面积),因此,到 2020 年都市区范围内可用于城市建设的用地有 2/3 已经城市化了,还有 1/3 的可建设剩余土地资源,城市发展建设仍有一定的余地。

从 USEM 模拟预测的各组团片区的扩展情况来看,星马片、银望片、新井片、新世纪片、长圭片的扩展速度较快,归类为城市化快速扩展区;岳麓山片、捞霞片、暮云片扩展速度次之,归类为城市化中速扩展区;高星片、丁字片、含浦片扩展速度比较缓慢,归类为城市化慢速扩展区;中心片属于主城区和老城区,可用于建设的用地存量已经很少,未来新增城市建设用地很少,归类为城市化停滞扩展区。

表 3 USEM 模拟的技术指标数据  
Tab.3 Technique index data simulated by USEM

年份	总建设用地面积/km <sup>2</sup>	城市人口/万人	GDP/亿元	居住用地/km <sup>2</sup>	公共设施用地/km <sup>2</sup>	工业用地/km <sup>2</sup>	仓储用地/km <sup>2</sup>	对外交通用地/km <sup>2</sup>
2005	163.83	223	1 690.83	62.10	39.22	29.69	4.80	6.28
2010	204.69	269	3 139.63	76.67	48.75	33.01	5.28	7.50
2015	225.50	292	4 040.39	83.21	52.67	34.48	5.52	8.56
2020	238.37	307	4 652.59	86.70	55.35	36.06	5.72	9.34

对于快速扩展的组团,应重点加强规划编制和管理的力度,提高规划设计和城市建设水平,引导城市建设的合理有序发展;对于中速的和慢速扩展的组团,要加强城市生态环境保护和治理,以及防止城郊农民建房的

无序蔓延,影响远期城市的发展;对于停滞扩展的中心片区,要注重结合旧城区改造和历史文化街区的保护,调整城市功能,完善配套功能,提高服务水平。

## 4 结语

从城市规划角度,城市空间扩展模型可通过引入控制性详细规划层,将传统的自下而上 CA 模型运行机制与规划的自上而下运行机制相结合,简化了传统 CA 城市模拟模型的计算数据量。针对城市不同组团的扩展方向和扩展速度不一样,将整个城市空间划分为不同组团片区,从而提高了模型的模拟精度,取得了较好的实证模拟结果。通过与人口及经济预测模型相结合,使模型具备了人口经济预测功能,扩展了模型的实用性。但城市发展经常处于调整变动中,因此,城市空间扩展也经常充满变数,USEM 中的规划控制层可根据城市规划调整保持适时动态更新。模型中为各组团片区设定了一个规划约束系数,可以根据实际需要,产生不同的空间发展控制方案,增加了模型的决策功能。当然,模拟城市这种复杂巨系统,任何模型都存在局限性,USEM 的模拟精度也需要在以后的研究中进一步改进。

### 参考文献:

- [1] 闫广武. 元胞自动机与人工生命研究进展[J]. 吉林大学学报(理学版), 2003, 41(1): 40-44.
- [2] Von Neumann J. Theory of Self-Reproducing Automata [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1966.

- [3] Ulam S. Numbers and Universes [M]. Cambridge: MIT Press, 1974.
- [4] 叶嘉安, 宋小冬, 钮心毅, 等. 地理信息与规划支持系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 王朝晖, 王海鹰, 秦奋. 三维虚拟城市自动化生成方法研究[J]. 地域研究与开发, 2008, 27(2): 118-122.
- [6] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机 CA 及真实和优化的城市模拟[J]. 地理学报, 2002, 57(2): 159-166.
- [7] Wu F, Webster C J. Simulation of Land Development Through the Integration of Cellular Automata and Multicriteria Evaluation[J]. Environment and Planning B, 1998, 25: 103-126.
- [8] 黎夏, 叶嘉安. 主成分分析与 Cellular Automata 在空间决策与城市模拟中的应用[J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31(8): 683-690.
- [9] Liu Y, Phinn S R. Modeling Urban Development with Cellular Automata Incorporating Fuzzy-set Approaches[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2003, 27(6): 637-658.
- [10] Almeida C M, Batty M, Monteiro A M V. Stochastic Cellular Automata Modeling of Urban Land Use Dynamics: Empirical Development and Estimation [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2003, 27(5): 481-509.

## Study on Urban Space Expand Model and Its Factual Simulation in Changsha

Zhu Shunjuan<sup>1</sup>, Chen Qunyuan<sup>2,3</sup>, You Shengjing<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Changsha City Planning Bureau, Changsha 410075, China; 3. Changsha Planning Information Service Center, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The working mechanisms of the traditional cellular automata model are from bottom to top. From the city planning angle and by leading into the planning control layer, the urban space expand model is designed in this paper, which combines the working mechanisms between from bottom to top and from top to bottom. So it simplifies the calculation data of the traditional city cellular automata model. In this paper, the authors use remote sensing images and urban land use maps, urban regulatory plan maps, urban road network maps of Changsha in 1996, 1999, 2002, 2005 and developing information of urban land for the urban space expand model. In the first, Changsha urban space is divided into 12 different sub-groups in order to improve its imitation accuracy and obtain a better imitating result in this paper. In the Second, the 12 different sub-groups in Changsha are dynamic simulated based on the urban space expand model which the authors designed in this paper, and combined with the population and economy models. At last, the paper predicts the urban construction land area, population, economy and the expansion of urban space in 12 different sub-groups in Changsha in 2020. The results reveal that the urban space expand model is a reasonable model to predict urban space expand to some extent, so the authors wish the points of view in the paper can provide the decision-making basis for city planning and management.

**Key words:** cellular automata model; urban space expand model; population and economy models; Changsha City