

基于 CA 复合模型的城市空间演变研究

王占强¹, 张新长²

(1. 江门市城市地理信息中心, 广东 江门 529000; 2. 中山大学 遥感与地理信息工程系, 广州 510275)

摘 要:介绍了元胞自动机 (CA) 模型、马尔柯夫 (MARKOV) 和层次分析 (AHP) 的概念和原理, 在分析城市空间演化过程和模型特点的基础上, 对标准 CA 模型进行扩展, 构造出 CA-MARKOV-AHP 复合模型。在 GIS 和基础地理信息数据库的支持下, 对广东江门城市空间的演变进行模拟和预测。

关键词: CA; 复合模型; 空间演变; GIS

中图分类号: P208; K901

文献标识码: A

文章编号: 1001 - 5221 (2005) 04 - 0312 - 05

城市化过程在为我们提供更多机会和便利的同时也引发出越来越严重的人地矛盾^[1]。城市地理空间作为城市的载体, 也是城市化的物理基础。因此, 城市化空间的动态发展规律和特征具有重要的科研价值和实用价值。城市空间建模是城市化研究的一种重要方法, 其中比较有代表性的模型有: 城市形态和结构模型、数据统计分析模型、以空间相互作用模型为代表的静态城市模型、以系统动力学和元胞自动机 (Cellular Automata, 简称 CA) 模型为代表的城市动态模拟预测模型^[2]。

CA 模型相对于其它构模方法思路更为简单、自然, 更能反映空间格局变化以及反馈作用, 因此受到广大研究人员的青睐, 成为当前城市空间演变研究的一个重要方向。Tobler 在 20 世纪 70 年代首次正式采用 CA 的概念来模拟当时美国 5 大湖区底特律城市用地的迅速扩展^[3]。Xie Yichun 以 ArcView 为平台, 用 Avenue 开发了基于 CA 的城市动态演变模型, 对 Buffab 的城市土地利用变化进行了模拟与预测^[4]。黎夏、叶嘉安在对广东东莞土地利用变化系统研究的基础上, 提出基于约束性的 CA 模型, 应用于广东省东莞市城市可持续土地发展规划^[5]。张显峰、崔伟宏建立了城市土地利用演化过程模拟预测模型 (LESP 模型), 对包头市城市土地利用演化过程进行了模拟与预测^[6]。马尔柯夫过程 (Markov Process) 具有“无后效性”特征, 使得我们能够借助由历史数据建立的空间演化转移概率矩阵对城市未来进行预测。王学雷、吴宜进等利用 MARKOV 模型

实现四湖湿地景观演变的模拟和预测^[7]。

众多研究实践证明, 任何一种复杂的地理现象都不是单个模型所能模拟的, 往往需要两个以上的模型, 因此模型的集成就是十分必要的。经过对现有资料的分析, 本文试图在城市地理信息系统的支持下, 建立基于元胞自动机 (CA)、马尔柯夫 (MARKOV) 和层次分析 (AHP) 的复合模型来模拟和预测城市建设用地的未来发展, 从而为城市规划管理提供辅助决策。

1 研究方法

1.1 模型的基本原理

1.1.1 CA 模型 CA 最早由著名数学家冯诺依曼 (Von Neumann) 在 20 世纪 40 年代提出, 它不是特指一个确定的模型而是指一类离散型动态建模方法的统称。CA 是时间、空间、状态都离散, 相互作用及因果关系皆局部的网格动力学模型, 具有鲜明的时空耦合特征, 比较适于对地理空间系统的动态模拟研究。

CA 系统中的所有元胞共同构成一个元胞空间。在某一时刻一个元胞只能有一种状态, 而且该状态取自一个有限集合。一个元胞下一时刻的状态取决于上一时刻其邻域状态的函数, 这是元胞自动机的基本原理。标准元胞自动机是一个四元组, 可以用下述公式表示^[8]:

$$A = (d, s, N, f) \quad (1)$$

式中, A 代表 CA 系统, d 表示维数, s 代表元胞状态, N 表示邻域, f 为局部转换函数。

收稿日期: 2005 - 04 - 15; 修订日期: 2005 - 08 - 05

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于 GIS 技术的城市土地利用时空结构演变分析模型的研究”(40471106) 资助; “985 工程”GIS 与遥感的地质应用科技创新平台项目资助

作者简介: 王占强 (1974 -), 男, 辽宁灯塔人, 注册规划师, 主要从事 GIS 在城市规划中的应用与城市建模研究, (E-mail) yuefang@21cn.com。

1.1.2 Markov模型 城市化历史证明城市空间发展具有“历史状态依赖性”,也就是说下一个时刻的城市用地的发展在一定程度取决于当前的城市用地现状。由于“无后效性”特征的存在,研究者可以采用马尔柯夫链(Markov Chain)方法来描述城市空间从一个时期到另一个时期的演变概率,并以此为基础预测将来的变化。

马尔柯夫过程(Markov Process)是一个重要的随机过程。该过程中各个时刻的状态的转变是由一个状态转移概率矩阵所控制,但马尔柯夫链不具有空间概念,只是一个状态转化的随机变量。因此将其与具有空间位置概念的 CA 结合起来构模,可以相得益彰。齐次马氏链的 n 步转移概率 $P_{ij}(n)$ 满足著名的切普曼-柯莫哥洛夫方程(Chapman-Kolmogorov),因此可以写成矩阵形式:

$$P(\mu + 1) = P(\mu)P(1),$$

$$\text{令 } \mu = 1, \dots, n-1, \text{ 可得 } P(n) = P(0)P^n. \quad (2)$$

即齐次马氏链有限维分布可由初始分布与一步转移概率完全确定,第 n 次转换概率可以通过上式求得。其中对于转换概率矩阵 P 的求解是预测的关键, P 的数学表述如公式(3)所示:

$$P = (P_{ij}) = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

式中, n 为城市用地类型数目, P_{ij} 为初始到末期的类型转换概率 $P_{ij} = C_{ij}/LU$,且 $0 < P_{ij} < 1$, $P_{ij} = 1$, ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) C_{ij} 为用地转换面积, LU 为研究期初第 i 类用地面积。

1.1.3 AHP模型 CA-MARKOV 模型模拟出城市用地转化可能发生的单元。但空间扩展转化实现与否涉及的层次因素众多,具有不确定性强、模糊度高的特点。采用层次分析方法(简称 AHP)将宏观定性与微观定量因素结合起来进行选择决策,能够提高模型模拟的精度。AHP 是美国运筹学家、匹兹堡大学教授 T.L. Saaty 于 20 世纪 70 年代提出来的,它的思想是将复杂系统通过层次分解,转化成若干简单体系来研究^[9]。

它针对上层某个准则,把下层与之相关的各个不可公度的因素,通过两两对比,按照重要性赋值,完成从定性到定量分析的过渡。AHP 方法决策过程主要有如下 4 个步骤:

(1) 建立层次结构模型。

(2) 通过相邻层的两两比较构造评价矩阵 A :

$$A = [a_{ij}]_{n_k \times n_k}.$$

式中, $a_{ij} = (l_{ij} m_{ij} \mu_{ij})$, $m_{ij} - l_{ij} = \mu_{ij} - m_{ij} = 1$, 一般 $0.5 < \mu_{ij} < 1$ 。

(3) 计算综合程度值。

首先求单个判断矩阵的权重向量。通常采用的简易算法有根法和和法两种。和法计算公式:

$$i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{kj}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

然后采用公式(5)计算每个评价对象的综合分:

$$S_i = \sum_{j=1}^n B_j Z_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

式中, S_i 为对象 i 的综合分, Z_{ij} 为对象 i 第 j 个指标的相对值, n 为对象总数。再按 S_i 值从大到小排序并编写对象名次,得到评价结果。

(4) 层次单排序、合成层次总排序和选择决策。

1.2 模型的扩展

基于标准 CA 概念构造的城市动态模型能够在一定程度反映出城市空间的扩展,但同时存在着因素层过于单一,元胞的状态变化仅取决于自身及其邻居状态组合的弱点,因而需要对标准 CA 模型进行扩展。目前对模型的扩展可概括为两个方向:其一是完全在 CA 的理论框架内,对 CA 的元素进行扩展,构建扩展的 CA 模型;其二是在系统决策选择框架内,将 CA 模型同系统动力学模型、经济模型、物理模型和统计分析模型等多种不同原理的模型按照一定的共性法则集成在一起,构建复合模型(图 1)。

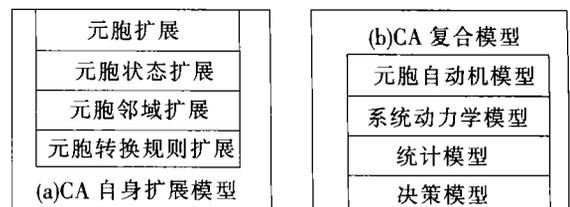


图 1 基于 CA 的扩展模型

Fig. 1 The expansion model based on CA

对于模型的扩展方法,我们比较认同^[10] Couclelis 的见解(可能属于保守的一类),在没有充分理论依据的前提下,最好不要对 CA 假设任意放宽,松弛的 CA 模型构造起来虽然方便,但模拟结果的分析却困难许多。复合建模具有建模思路清晰、实现

较为简便并且同其它系统集成性好等优点,因此研究中采用了该方法,模型模拟系统结构如图 2 所示。如果由于多个建模原理彼此之间存在差异,建模过程就要防止模型的拼凑行为,以实现模型之间的有机结合。

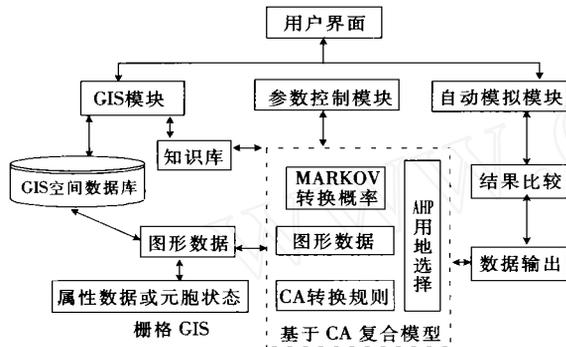


图 2 城市用地演变模型系统结构图

Fig 2 The flow of urban land use expansion simulation

2 应用案例

2.1 数据准备

在江门城市基础空间数据库的支持下,借助 ARCGIS8.3 将不同时期的资料或图件进行一致性处理,对处理结果进行多种空间分析来获得模型运行所需专题数据。本文所用地图资料及技术处理如表 1 所示。

2.2 模型参数求解

2.2.1 确定元胞和种子点 根据江门地区经济发展和空间变化指标特点确定元胞栅格的大小为 10m × 10m,整个区域构成 800 × 1000 元胞空间,基本时间间隔为年。并以 1995 年城市建设用地作为种子点,以 2004 年数据作为模型检验数据。

2.2.2 确定控制因素层 城市空间演变受到多种因素的影响和制约,经过对江门城市化研究,设计出 AHP 模型如下图 3 所示。

表 1 江门城市建设用地特征分析及数据处理方法

Tab 1 The maps and other original data used in present study

编号	采用资料	比例尺	年份	编绘单位	空间分析方法	技术处理结果
1	普通地形图	1:10000	1995	广东省国土厅	RECLASS 坡度分析	用地建设条件评价图
2	市区现状图	1:40000	2003	江门规划院	RECLASS ASSIGN	分类用地状况图
3	交通规划	1:25000	2002	江门规划院	BUFFER ASSIGN	交通便利评价图
4	总体规划	1:25000	2003~2020	中国规划研究院	RECLASS	规划用地图
5	统计年鉴		2001~2003	江门市政府	统计分析 趋势预测	经济发展、用地扩展预测
6	卫星相片	分辨率 0.61m	2004	美国快鸟公司	卫片判读 监督分类	现实用地现状

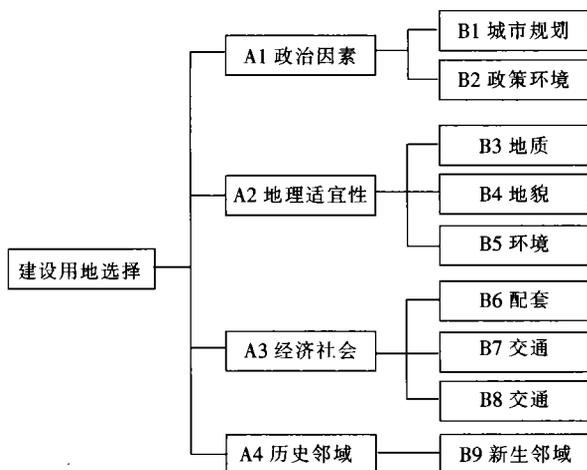


图 3 建设用地选择的层次结构模型

Fig. 3 The model of land use choice

概率矩阵如表 2 所示。表中, Class 1 代表居住用地,类别符号为 R; Class 2 代表绿地,类别符号为 G; Class 3 代表工业和仓储用地,类别符号为 M 和 W; Class 4 代表公共设施用地,类别符号为 C; Class 5 代表其它用地,类别符号为 E; Class 0 代表暂时未利用地。

表 2 建设用地演变的概率矩阵 (1995 - 2001)

Tab 2 Transition probability matrix of land use types (1995 - 2001)

	Cl 1	Cl 2	Cl 3	Cl 4	Cl 5	Cl 0
Class 1	0.793 9	0.016 5	0.008 2	0.003 3	0.001 0	0.177 1
Class 2	0.026 9	0.778 5	0.001 0	0.007 1	0.003 0	0.183 5
Class 3	0.003 7	0.000 0	0.787 2	0.000 5	0.005 4	0.203 2
Class 4	0.005 6	0.002 0	0.048 6	0.807 7	0.000 0	0.136 1
Class 5	0.008 4	0.002 4	0.027 7	0.000 6	0.789 2	0.171 7
Class 0	0.079 4	0.009 2	0.073 6	0.027 5	0.010 6	0.799 7

2.2.3 确定状态转换概率矩阵 确定状态转换的

2.2.4 确定层次选择权重 将专家评价结果组

成评价矩阵 A, 利用和法计算各层次综合程度值如下:

$$\begin{aligned} (2) &= (A_1, A_2, A_3, A_4)^T \\ &= (0.2328, 0.4139, 0.1205, 0.2328)^T, \\ (3) &= (B_1, B_2, \dots, B_9)^T \\ &= (0.0376, 0.0719, 0.1233, 0.1655, \\ &0.1656, 0.0828, 0.0401, 0.0804, 0.2328)^T. \end{aligned}$$

将用地单元判断矩阵中元素两两比较,可以得到对象 i 第 j 个指标的相对值 Z_{ij} ,之后再由公式 (5) 计算出每个评价用地单元对象的综合分,并据其进行空

间单元演化选择,从而得到相应模型的模拟结果。

2.3 模拟预测结果

本次研究采用美国 Clark 大学 George Perkins Marsh 研究所的 DRISI 软件,实现空间数据动态模拟和辅助决策。它具有简单易用的友好界面,支持两种建模方式:Macro 自定义模板和采用 COM 组件控制技术,并且为了科学研究的需要提供多种模型的原型。例如,多元回归分析、多目标评价、模糊评价、聚类分析、马尔柯夫模型、自动机模型等,可以有效缩短建模周期。模型运行模拟结果如图 4。

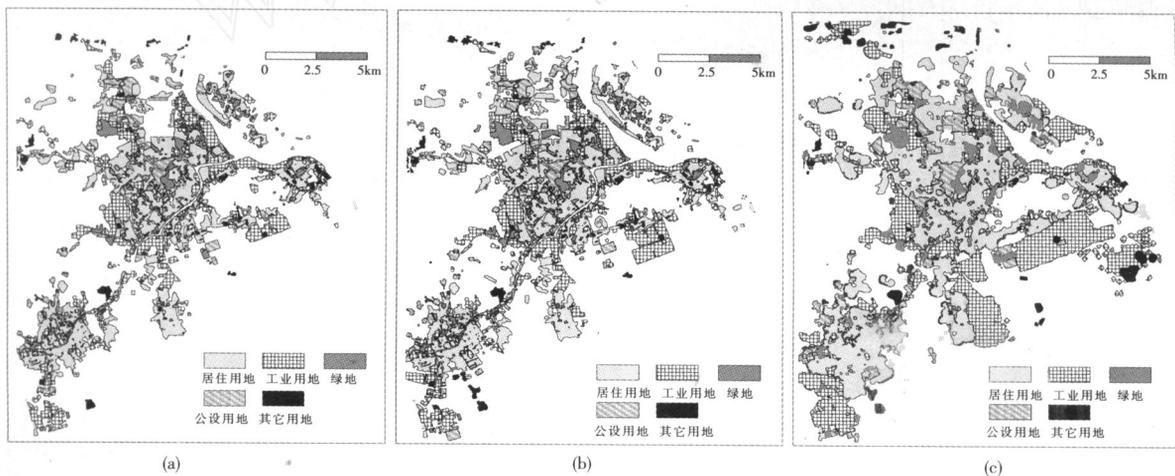


图 4 1995 (图 a) 及 2001 年 (图 b) 江门市城市用地现状图和 2015 年城市用地预测图 (图 c)

Fig 4 The current land use of 1995 (Fig. a) and 2001 (Fig. b) and the simulate result of 2015 (Fig. c)

上图通过各时段用地分布图对比,较为直观反映出城市空间变化状况和城市未来发展趋势。2015 年用地模拟图中北新区、高新区和银州湖沿岸工业用地迅速扩展,符合经济发展的要求,反映出城市规划的意图。另外图中居住用地逐渐跳出城市中心区,向郊区尤其是山水条件好的区域扩展,也符合市民更加关注健康、环境等因素的生活理念。

3 结语

本文在前人研究的基础上,考虑城市空间扩展和转化两种情况并结合 CA、MARKOV 和 AHP 3 种模型的优点,提出了基于复合模型的建模思路。在 GIS 数据库支持下实现了模型与 GIS 集成,并以江门主城区城市用地为例实现城市空间的模拟和预测。模拟结果较为真实地反映出城市发展的趋势,对于城市规划管理具有一定借鉴意义。但模型仍然需要进一步完善。

(1) 模型的空间和时间尺度的划分是根据前人的研究经验和规划用地单元的最小规模而定,缺乏足够的科学理论依据。针对不同性质用地、不同层次规划需求,城市用地单元的时空尺度也应该是不同的。在实际模拟操作中如何确定适合的时空尺度和实现多尺度模型系统集成还有待进一步研究。

(2) 模型中用地演化参数主要是通过对两个已知历史时段用地情况比较和第三个时段样本模型的检验来确定的,它预先假定了城市发展的连续性和均衡性前提。但纵观世界城市发展历史,城市演变的速度往往是不均衡的。因此模型有必要进一步考虑城市不同时段在发展速度和影响因素权重存在的差异性。

(3) 对于未来城市演化模拟结果的检验,缺乏多种有效模型的相关验证,因此模拟结果很难实用化,目前只能大致反映出城市发展的趋势。在探索

出科学的模型检验方法之后,这个问题可以解决。

参考文献:

- [1] 陈述彭. 城市化与城市地理系统 [M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [2] 周成虎,孙战利,谢一春. 地理元胞自动机研究 [M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [3] Tobler WR. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region [J]. *Economic Geography*, 1970, 46: 234 - 240.
- [4] Xie Y. A generalized model for cellular urban dynamics [J]. *Geographical Analysis*, 1997, 28: 350 - 373.
- [5] 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.
- [6] 崔伟宏,张显峰. 土地资源的动态监测和动态模拟研究 [J]. *地球信息科学*, 2002, 3(1): 79 - 85.
- [7] 王学雷,吴宜进. Markov 模型在四湖地区湿地景观变化研究中的应用 [J]. *华中农业大学学报*, 2002, 21(3): 288 - 291.
- [8] Amoroso S, Patt Y. Decision Procedures for Surjectivity and Injectivity of Parallel Maps for Tessellation Structures [J]. *Computer System Sci*, 1972, (6): 448 - 464.
- [9] 秦寿康. 综合评价原理与应用 [M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [10] Couclelis H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24: 165 - 174.
- [11] 张新长,曾广鸿,张青年. 城市地理信息系统 [M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [12] 刘继生,陈彦光. 基于 GIS 的细胞自动机模型与入地关系的复杂性探讨. *地理研究*, 2002, 21(2): 155 - 162.
- [13] 王红,阎国年. 城市细胞自动机模型研究的回顾与展望 [J]. *经济地理*, 2003, 23(2): 154 - 157.

A STUDY ON URBAN LAND DYNAMIC PROCESS BASED ON THE COMPOUND CELLULAR AUTOMATA MODEL

WANG Zhan-qiang¹, ZHANG Xin-chang²

(1. *Jiangmen Urban Geography Information System Center, Jiangmen 529000, China; 2. Department of Remote Sensing and GIS Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract: Cities are dynamic intricate systems, and the integrity of CA and other city models with the ability to calculate time and space have the great advantage of resolving urban land expansion problem. In this paper the concept and theory of CA and MARKOV and AHP are introduced. Through the analysis of urban land dynamic process and the attribute of other models, a compound CA model is put forward. The model that couples CA with Markov and AHP is a useful method for simulating and predicting the land use growth situation. With the help of GIS and Geodatabase, Jiangmen City is taken as an example for simulation. The result indicates that the city has a trend to expand northward and southward. The established model can be used as a virtual lab for decision support in urban planning and land policymaking.

Key words: Cellular automata (CA); Urban land use; Spatial expansion; Model