

基于 CA 的城市扩展动态模拟与预测

张显峰

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要 城市扩展动态过程的模拟与预测可以为区域发展、城市规划和管理等提供决策依据. 传统的各种城市模型不能完整地表示城市动态过程的时空信息和时空关系, 通常将空间抽象为均质平原或简单功能区, 将时间作为一个变量纳入方程, 缺乏对城市动态系统的直接模拟. 细胞自动机(Cellular Automata)是一种“自下而上”的动态模拟建模框架, 具有模拟复杂系统时空演化过程的能力. 本文将标准 CA 模型的四元组进行了扩展以满足 GIS 环境下的城市扩展动态模拟的要求, 建立了土地持续利用动态模拟模型. 运用此模型对包头市城市扩展进行了比较成功的模拟和对未来 15 年城市发展趋势进行了预测.

关键词 细胞自动机, 转换规则, 城市扩展, 动态模拟

1 城市扩展模型研究现状

城市是区域系统的中心和最具影响力的时空复合系统, 城市化是区域土地利用演化的主导过程, 因此城市扩展过程一直是地理学研究的焦点. 从 19 世纪以来, 人们已经从不同角度建立了许多模型来揭示城市扩展的动态机制. 根据这些模型的模拟内容、建模原理和模型自身的表达形式, 可以将它们划分为以下几个类型(表 1): 静态结构模型、社会物理学模型、系统动力学模型、经济规划模型以及基于微观个体行为的模拟模型(如 CA). 这些模型反映了在不同历史时期人类对城市发展过程的不同认识和当时的建模水平. 其中基于微观个体行为的模拟模型是近年来随着地理信息系统的发展和深入应用而产生的一种新的建模思路. 传统的城市模型存在以下一些缺陷: (1) 不能表达城市扩展过程中的时间信息, 是静态模型; 或者将时间仅仅作为一个变量纳入方程中, 忽略了时间维和空间维的差异^[1]; (2) 不能完整表达空间信息, 在这些模型中通常将空间简化为“均质平原”或简单功能分区; (3) 不能很好模拟城市扩展过程的复杂性, 而是以某一子系统如住宅系统作为模拟对象; (4) 基于微分或偏微分方程的动力学模型是连续过程, 不利于 GIS 环境下以离散为特点的计算机建模; (5) 各个模型属于确定性模型, 不符合城市扩展过程的随机性特点.

细胞自动机(Cellular Automaton, 简称 CA), 最早由 Ulam 20 世纪 40 年代提出, 并由 Von Neumann 用于研究自复制系统的逻辑特性^[2], 美国圣巴巴拉加州大学地理系的 Helen Couclelis 对细胞自动机模型在地理学中, 尤其是在城市扩展动态模拟中的作用, 进行了开创性的研究工作^[3]. 将 CA

收稿日期: 2000-09-01

基金项目: 国家九五科技攻关项目(96-602-07)

作者简介: 张显峰, 男, 1967 年 11 月生, 博士 Email: zhang 67@263. net

模型和 GIS 的集成,一方面可以增强 GIS 的时空动态建模功能,将 CA 作为动态空间模拟的一种框架纳入 GIS 分析中;另一方面, GIS 提供的强大空间数据处理能力可以为 CA 模型准备数据和定义有效的细胞转换规则以及对模拟结果进行可视化,方便 CA 模型的校验和决策支持. 本文从 GIS 环境时空动态建模的角度,将标准的细胞自动机模型进行了扩展,建立了城市扩展动态模拟的新方法,并以包头市城市变化为实例,对包头市城市发展过程进行了模拟与预测.

表 1 不同类型城市模型之间的比较

模 型 比 较	静态结构模型	社会物理学模型	系统动力学模型	经济规划模型	基于 CA 的模型
建模原理	区位理论 运输成本论 工业/商业利润最大	牛顿社会物理学理论 统计分析理论	系统论 控制论 突变论	最优化理论	复杂系统论 宏观是微观行为的总和
对时间的表达	不能/静态	不能/准动态	动态	静态	动态
对空间的表达	均质平原或忽略空间	粗略分区/ 均质体	粗略分区/无空间 差异的均质体	均质体/宏观功 能分区	完全表达空间个 体及其相互作用
模拟主题	宏观结构	整体行为	整体行为	配置优化	微观个体行为和 空间相互作用
复杂性	单一子系统	单一子系统/综合 性模型	宏观综合系统	单一系统	时空复合 系统

2 CA 模型特点及其在时空动态模拟中的扩展

2.1 CA 模型的特点

标准的 CA 系统是一个由细胞(cells)、状态(states)、邻域(neighbors)和规则(rules)构成的四元组^[4]. 所有细胞是相互离散的,构成一个细胞空间;在某一时刻一个细胞只能有一种状态,而且该状态取自一个有限集合;邻域是细胞周围按一定形状划定的细胞集合,它们影响中心细胞下一个时刻的状态;细胞规则定义了细胞状态转换的规则. CA 系统的时间也是离散时间,它不具有物理意义,和时态 GIS 中的系统时间具有相似的含义. 用集合的语言来描述 CA 模型,即:

$$S^{t+1} = f(S^t, N)$$

(1)

式中, S 为一个有限集合,代表细胞状态, N 代表细胞邻域, t 表示时间, f 为局部转换规则. 一个基于转换规则的标准细胞自动机可以表示为如下形式:

IF any cell $\{x \pm 1, y \pm 1\}$ is already developed

THEN $P_d\{x, y\} = \sum_{\{i, j\} \in \Omega} P_d\{i, j\} / 8$

&

IF $P_d\{x, y\} > \text{some threshold value}$

THEN cell $\{x, y\}$ is developed with some other probability $\rho\{x, y\}$

式中, $P_d\{x, y\}$ 是邻域函数, $\rho\{x, y\}$ 是细胞 $\{x, y\}$ 的发展概率, 细胞 $\{i, j\}$ 取值于 Moore 邻域 Ω .

模型以其框架的简单、开放和可以模拟十分复杂的系统行为而具有很强的生命力,从目前的 research 看,它具有以下特点:

- (1) CA 模型采用“自下而上”的构模方式,而且没有一个既定的数学方程,只是一个建模原则,因此具有很好的开放性和灵活性. 这和运用微分方程或物理模型从宏观上描述空间现象的传统方法是对立的,前者更符合人们认识复杂事物的思维方式.
- (2) CA 模型是一个基于微观个体相互作用的时空动态模拟模型,将地理实体的空间和时间特

性统一在模型中,通过划分研究对象的细胞空间和研究初始状态及状态转换规则,CA 模型就可以自行迭代运行,模拟系统演化过程,而 GIS 不具备迭代运算的能力。

(3) CA 模型将空间和时间离散化,适合于建立计算机模型和并行计算特征,因为计算机对客观世界的表示是离散的。

(4) CA 模型具有不依赖比例尺的概念^[5],细胞只是提供了一个行为空间,本身不受细胞空间测度和时间测度的影响,时空测度的影响通过转换规则体现。因此 CA 模型可以用来模拟局部的、区域的或大陆级的演化过程。

(5) 从数据模型的角度看,CA 模型中的细胞和基于栅格 GIS 中的栅格一样,所以 CA 模型易于和 GIS、遥感数据处理等系统集成。

由上述可知,CA 模型较适合空间信息的时空动态分析,尤其是时空动态过程的模拟,为 GIS 中的时空动态分析提供了一个框架思路和建模方法。但是由于地理系统的复杂性,标准的 CA 模型需要扩展和改进,才能满足时空分析的需要,更加真实地模拟地理实体的演化进程。

2.2 扩展的 CA 模型

标准的 CA 模型是一个由细胞、状态、邻域和规则构成的四元组,它们是对客观世界高度抽象的结果,但是在地理时空数据分析中,无论是模型的输入数据和输出结果以及状态转换规则都有着明确的地理含义,因此地理细胞自动机模型的四元组有明确的时间和空间含义,是对标准 CA 模型的扩展。在前人研究基础上,笔者从满足 GIS 时空分析建模的需要,提出这种扩展至少包括以下几方面:

(1) 细胞空间的扩展。地理细胞空间不再是一个抽象的空间,而是和笛卡尔坐标系下的地理空间对应。根据模拟分析对象的空间特性,可以抽象为一维的(如交通流)、二维的(地块)和三维(污染物扩散)的细胞空间。从数据模型看,二维细胞空间可以用基于域(field-based)的 GIS 数据模型来表示,为 CA 与 GIS 的集成带来了方便。细胞空间的划分不一定是矩形,可以是各种几何形状(如六边形),而且每一个细胞可以具有地理含义,如最小地理单元,或者地理区划单元。

(2) 细胞状态的扩展。标准的细胞状态集是一个有限的离散集合,当 CA 用来进行地理时空分析时,地理细胞的状态集合可以定义为表征地下实体或现象的指标、编码或等级的集合,如土地适宜性是指标,土地利用类型是编码,而土地质量则是等级。

(3) 细胞状态转换规则的扩展。标准 CA 模型的规则是局部的、由空间排列决定的映射函数^[6]。但地理现象和地理实体的动态演化却十分复杂,除受局部个体间相互作用的影响,还受各种区域的和更大尺度的因素的影响,因此 CA 模型中状态转换规则必须兼顾微观、区域和宏观,建立综合的多层次规则,才能有效模拟地理实体的演化过程。而且规则在细胞空间和时间上应该是不同构的,随区域差异和时间而调整。细胞转换规则的扩展是地理细胞自动机与标准细胞自动机本质的区别。

(4) 时间概念的扩展。CA 模型中的模拟时间必须和地理实体演化中的真实时间建立对应关系,否则,地理时空建模就失去了利用价值。一般采用历史数据和和其它模型预测数据来建立二者之间的联系。

3 用扩展 CA 模型模拟城市扩展动态过程

城市的扩展或城市化可以看作是微观不同土地类型的相互转化的宏观表现。传统的城市扩展模拟往往是从经济、社会、商业、交通等影响城市发展的宏观因素着手建立模型,静态地或准动态地描述城市的结构和面积指标的变化,缺乏足够的空间信息,不是对城市扩展的微观相互作用直接模拟,而且这些模型是确定性运行,不符合城市发展的随机性和不确定性^[7,8]。近年来,CA 模型在城市动态模拟中的运用得到了广泛开展。在中国,大量的农业土地转化为城市用地,既威胁着农业的可持续

续发展,从长远来看也影响城市的可持续发展. 因而从可持续发展战略的高度来规划城市扩展的速度是十分必要的. CA 模型与 GIS 的集成可以为城市扩展提供一个虚拟环境,来模拟不同发展策略下,城市发展的形态变化以及对土地可持续利用的影响,为区域土地资源的持续利用提供决策支持.

3.1 农用地向城市用地转化的形式

城市发展的总体效果是城市边界的外扩,即一部分农业用地转化为城市用地. 在我们的模型中,考虑四种形式的城市增长:自发式、扩散式、凝聚式和焦点吸引式. 自发式是新生城市的一种方式,往往受区域经济条件、自然条件的影响. 扩散式是最普遍的一种城市增长方式,由于城市人口的增长,工业、商业的发展,城市用地需求增加,向周边农业区扩展. 凝聚式是由于微观相互作用,城市吸引周边的用地转化,向城区聚集. 焦点吸引式往往在焦点产生初期,吸引力最大,如大的商业中心、工业中心、交通枢纽、重要交通干线等. 这四种城市扩展的方式都是微观个体(细胞)间相互作用、区域自然条件、社会经济状况和宏观规划等因素共同作用的结果,形成了城市扩展的总体效应.

3.2 模型描述

为了模拟上述城市扩展的四种形式,我们从概念模型的角度来描述模型的思路. 由于只考虑农业用地和城市用地之间的转化,不必考虑城市的内部结构,所以我们假设 CA 细胞只取 2 种状态:0 和 1,0 代表农业用地状态,1 代表城市用地状态. 邻域的形态将直接影响细胞状态的转化,从理论上讲,邻域构型可以是各种几何图形,我们取 Moore 邻域构型. 细胞状态转换规则是 CA 模型的关键,我们从三个层次来建立该转换规则. 首先,从微观层次,考虑三个指标:邻域函数、费用系数和焦点引力. 邻域函数是用以刻划当前细胞受周围邻域细胞影响程度的指标;费用系数是从土地可持续利用的角度设计的一个反映城市扩展所受耕地保护的阻力大小的指标,它可以是农业土地适宜性、土地质量、农业产量等指标的函数,某个土地细胞越适合发展农业,它被城市化的阻力越大. 焦点引力是和阻力系数相反的指标,反映城市设施,如车站、商业中心、高速公路等对农用地城市化的吸引力. 其次,从中观层次,考虑区域规划控制,以及区域经济、资源、环境指标对城市扩展的影响. 这些影响因素构成城市模拟的控制,可以用 0 到 1 之间的数字来量化. 最后,从宏观层次看,考虑时态尺度上的影响因子,如由土地可持续利用导出的土地资源代际分配,控制城市发展进程的规划等. 模型可以表述如下:

$$S^{t+1} = f(\Omega, S^t, \phi(N), M, A, R_n, R_p, B)$$

(2)

式中

- Ω ——细胞空间, 可以是邻域、层次区域和全局;
- S^{t+1} 和 S^t ——某一细胞在 $t+1$ 和 t 时刻的状态;
- $\phi(N)$ ——表示个体间相互作用的邻域函数;
- M ——土地持续利用费用系数;
- A ——焦点引力指标;
- R_n, R_p ——分别为自然条件和政策规划约束;
- B ——新生算子, 在邻域内没有城市细胞的影响下自发式产生城市细胞;
- f ——状态转换规则映射函数.

综合考虑微观个体(细胞)相互作用, 区域控制和区域社会经济、环境因素以及城市扩展时间轴上的控制,可以建立更加完善的细胞转换规则,避免了标准 CA 模型中只考虑邻域影响的局限性.

4 模型实施

按照由简单到复杂的原理,施以不同的转换规则来模拟城市扩展的规律,最后构建顾及土地可

持续利用的城市动态演化模型.

4.1 只考虑局部转换规则

CA 模型中的邻域实际上反映了中心事物与周围环境的相互作用关系. 邻域对中心细胞的影响体现在两个方面: 一是各个细胞状态取值, 二是邻域内细胞的构型. 对于构型的描述和不同构型对中心细胞状态变化的影响有待深入研究. 为了简便, 本文取 Moore 邻域半径为 2 个细胞, 对于细胞空间中的每一个细胞, 考察影响局部个体细胞相互作用的因子: 邻域内城市细胞的比例(D_{Ω})和费用系数(M).

$$D_{\{x,y\}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{\Omega} X_{(i,j)} \tag{3}$$

式中, $D_{\{x,y\}}$ 是位于 $\{x,y\}$ 处的细胞由其邻域计算的城市细胞密度, $X_{(i,j)}$ 为邻域 N 内状态为城市的细胞, Ω 为邻域细胞集合. 而费用系数的计算式如下:

$$M_{\{x,y\}} = \Phi(SS, d) = d * SS \tag{4}$$

式中, $M_{\{x,y\}}$ 为位置 $\{x,y\}$ 处细胞的费用值, d 为该细胞到最近城市细胞的距离, SS 为农业土地适宜性指标, 所以 $M_{\{x,y\}}$ 实质上是从当前细胞到最近城市细胞的费用加权距离.

为了将上述两个指标转化为某一细胞发展为城市的可能性, 用一个负幂函数将指标得分映射为细胞发展概率.

$$P_{\{x,y\}} = \exp(-\mu_1 \times M_{\{x,y\}} / M_{\max}) \tag{5}$$

$P_{\{x,y\}}$ 为位置 $\{x,y\}$ 处的细胞转换概率, $-\mu_1$ 为控制系数, $M_{\{x,y\}}$ 为位置 $\{x,y\}$ 处的土地转换费用系数, M_{\max} 为最大费用系数.

邻域内城市细胞密度指标 $D_{\{i,j\}}$ 取为判别指标, 按这两个指标可以构建一个最简单的转换规则.

IF $P_{\{x,y\}} \overset{t}{>} \text{某一阈值 } \delta_1$
&
IF $D_{\{x,y\}} \overset{t}{>} \text{某一阈值 } \delta_2$
&
RAND () $< D_{\{x,y\}}^t$
THEN cell $\{x,y\}$ 由农用地转化为城市

以上就构造了一个非常简单的转换规则, 并引入了一个随机概率函数判断, 对满足条件的土地细胞进行随机选择, 以模拟农用地向城市用地转化的随机过程. 在此规则下我们来虚拟城市扩展的变化(图 1). 反映不同邻域半径下和相同半径不同演化时间下, 细胞个体相互作用导致城市扩展的速率差异. 从该图可以看出城市发展的环状特征, 这正是早期结构模型所要揭示的内容.

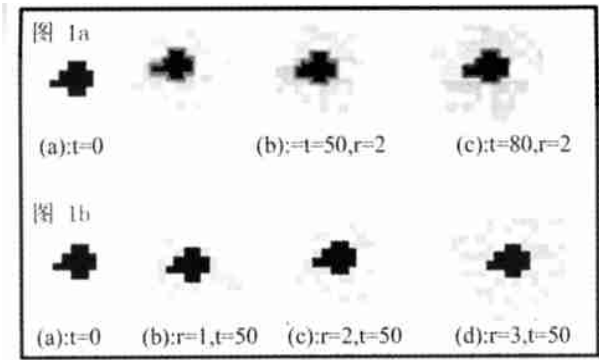


图 1 不同邻域半径和不同模拟时间下的城市扩展特征

4.2 考虑焦点引力构建新的转换规则

焦点指城市中或附近出现的车站、商业中心、工业中心、交通干线等, 它们在一定时段内对周围土地转化有着强烈的影响力, 导致城市扩展的速率差异. 我们假定高速公路(线状焦点), 来考察它们对城市发展的影响. 焦点对土地单元的吸引力是随距离逐渐衰减的, 本模型中采用负幂衰减函数来量化焦点的吸引力.

$$A_{\{x,y\}} \exp(-\mu_2 \times d_{\{x,y\},0}/d_{\max}) \tag{6}$$

$A_{\{x,y\}}$ 为时刻位置 $\{x,y\}$ 处的细胞受到的吸引力, μ_2 为速率参数, $d_{\{x,y\}}$ 为 $\{x,y\}$ 细胞到焦点 0 的可达性指标, 这里用距离来表示, d_{\max} 为细胞空间中距离焦点 0 的最大距离.

这样, 一个细胞状态由农业用地转化为城市用地的可能性大小由费用系数和焦点引力两个指标决定, 我们用加权的办法来计算其总体发展概率.

$$P'_{\{x,y\}} = \exp(-\alpha * (\mu_1 * M_{\{x,y\}}/M_{\max} + \mu_2 * d_{\{x,y\},0}/d_{\max})) \tag{7}$$

在同样的初始状态下, 加上焦点的影响, 对虚拟城市演化进行模拟(图 2a), 可以看出由于北边有高速公路通过, 城市受到向北发展的引力.

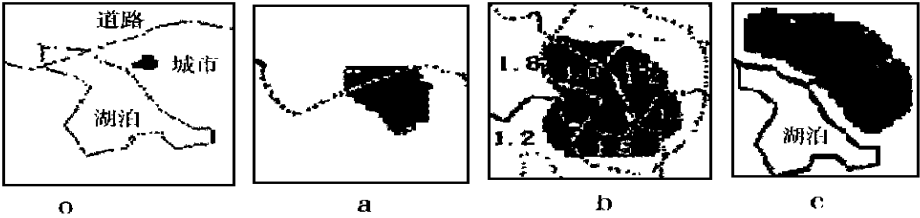


图 2 焦点吸引和限制条件下虚拟城市扩展模拟
(a: 初始状态, b: 高速公路吸引, c: 土地费用系数不同, d: 湖泊和规划限制)

4.3 考虑规划、自然条件等约束条件下的转换规则

现实世界中城市发展并不完全是在一种自由状态下进行的, 要受到许许多多因素的影响, 其中最重要的是自然障碍因子, 如山地、水体等对城市发展的约束, 以及人类自身对城市发展形式和速度的规划控制. 而且规划行为是保证土地可持续利用、合理城市发展速度的手段. 规划对城市发展的影响大致表现在三个方面: (1) 限制农业用地向城市用地的转化, 比如: 划出的保护区、基本农田, 这些地区在相当长时间内都不容许城市化; (2) 规定城市发展的形态和格局, 比如: 规定城市紧凑发展, 或向某一个方向发展等; (3) 控制城市发展的速度, 通过规划土地供应量来控制城市发展的速度.

自然条件的限制可以是绝对限制, 也可以是部分限制. 如水体、悬崖陡坡等即属于前者, 而地形高程则属于部分限制, 可用一函数来量化. 综合规划和自然条件等因子对城市发展的影响, 我们归纳为限制因子 R :

$$R_{\{x,y\}} = \left(\sum_{i=1}^k W_i R_i\{x,y\} \right) * \prod_{j=k+1}^m R_j\{x,y\} \tag{8}$$

式中, W_i 是限制因子的权重, R_i 是部分限制因子, R_j 是绝对限制因子, 其值取 0 或 1, 分别表示位置 $\{x,y\}$ 处的细胞不能和可以转化. 对于部分限制因子(如坡度)可以采用模糊隶属度($\mu_{\text{可能}}$)的概念来量化. 以坡度为例, 其隶属度函数如下:

$$\mu_{\text{可能}} = \begin{cases} 1 & \text{坡度} \leq a \\ e^{-k\left(\frac{x-a}{b}\right)^2} & a < \text{坡度} \leq b \\ 0 & \text{坡度} > b \end{cases} \quad (9)$$

用乘积算子可构建土地可持续利用 CA 模型的转换规则:

$$P''_{\{x,y\}} = P'_{\{x,y\}} * R_{\{x,y\}}$$

图 2b 表示由于土地费用系数的差异,不同方向上农业用地向城市转化的速度存在差异,西北费用系数最高,城市化速度也最慢,这符合保护好的耕地作为农业生产用地的目标. 图 2c 反映湖泊和规划控制对城市扩展的绝对限制作用,规划要求城市发展和湖泊水体之间至少间隔 3 个细胞距离,以保护湖水不受污染.

5 应用实例

5.1 系统集成与数据处理

在 Arc/ Info 的 Grid 环境下,将上述 CA 模型进行了集成,并以包头市城市扩展为例,模拟了在不同条件下城市向周边农业用地的扩展. 该集成方式属于一种松散集成方式, GIS 和 CA 模型具有共同的图形用户界面, CA 模型的运行由 AML 语言驱动. 模型主体用 C 程序设计语言开发. GIS 模块主要完成数据的处理、模型校验和结果显示等功能. 由于篇幅的原因,在此不能详细叙述集成的技术细节,系统集成框架见图 3 所示.

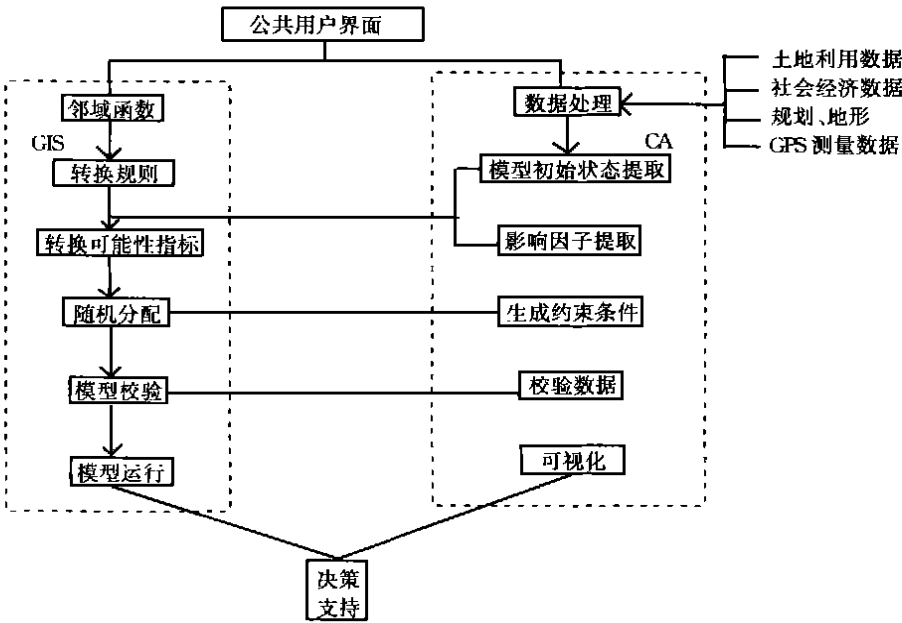


图 3 基于 GIS 和 CA 集成的土地可持续利用时空模拟模型框架

包头市位于内蒙古自治区中部、黄河北岸,市区面积 2205.9km²,由 3 个部分组成,沿黄河东西展布. 1992 年完成土地利用详查工作,获得了 1992 年包头市及近郊区 8 大类数十亚类的土地利用现状数据,我们对原始数据重新分类,提取居民地和城市类型,作为 CA 模型模拟的初始状态,一级公路和铁路作为城市进一步发展的吸引焦点,由土地质量计算土地费用系数. 地形、水体、保护地和规划控制作为限制因子. 1998 年我们用差分 GPS 精确获取了 1992 年以来城市扩展的时空变化数

据, 作为历史数据用于校验模型参数和模型时间. 根据本文提出的模型对包头市城市发展进行了模拟(图 4).

5.2 模型校验

模型校验有两个目的, 一是确定模型参数. 通过历史数据来检验模型结果, 反复试验, 获得模

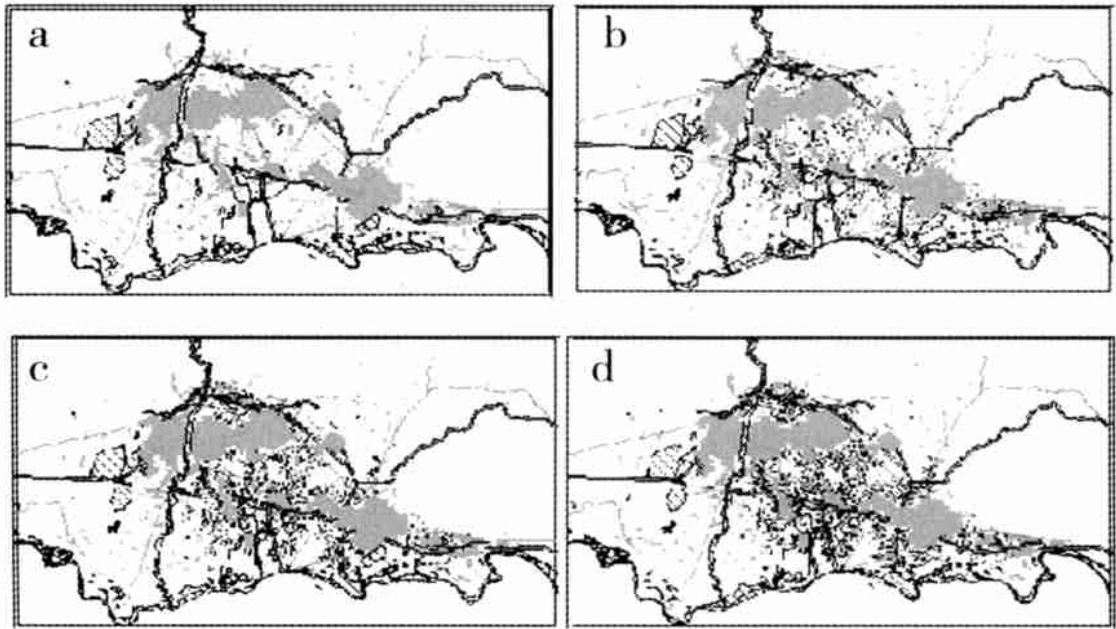


图 4 包头市城市扩展过程模拟与预测(a: $t=0$ (1992), b: $t=5$ c: $t=9$, d: $t=13$)

型的运行参数; 二是将系统时间映射到真实时间, 以供规划决策使用. 目前 CA 模型的校验有以下几种方式:

(1) 历史数据检验. 如果获得两个或两个时刻以上的历史数据, 我们以一个时刻作为模型的初始状态, 其它时刻的数据和模拟结果进行比较, 如果二者吻合则可以把此时的模型参数作为可选参数, 进行进一步模拟. Clarke(1998)用修正的 Lee-Sallee 形状指数来比较二者的形状相似性, 即二者的交集和并集的比值. 此外也可以用空间相关系数来比较. 这种校验方法适合城市扩展呈线性增长的情形.

(2) 利用社会经济指标来校正模型时间. 选用和城市扩展相关性较大的指标(如人口、经济等), 预测其发展变化来反推城市扩展规模.

(3) 从土地可持续利用原则导出区域土地资源消费速率来校正模型参数和时间. 例如, 根据土地资源的优化分配, 规划以后各时段内的土地消费量, 就可以和 CA 模型的预测结果进行对比, 确定模型时间之间的对应关系.

本文采用通过差分 GPS 获取的 1992 年至 1998 年之间的包头市近郊区土地利用的历史变化数据来检验模型模拟结果, 用未来土地利用的规划数据作为城市发展的速率控制因子, 并建立模拟时间和真实时间之间的联系. 图 4a 是模拟的初始状态, 即 1992 年的土地利用现状, 图 4b 所示的模拟结果大致相当于 1998 年的城市扩展现状. 图 4c, d 是对未来的预测, 系统时间分别为 $t=9$ 和 $t=13$, 大致相当于现实中的 2006 年和 2012 年. 由图可见, 包头市未来城市扩展呈现明显的“近郊区城市化”, 和以交通为牵引的城市化现象. 在三个城区之间的近郊区和铁路、公路交叉点是包头

市未来城市化的主要区域。受到铁路和公路以及已建成区的吸引,城市边缘和主干交通线的交叉点成为首先被城市化的区域。从 1998 年的历史数据检验的结果和对未来近 15 年的预测来看,本文提出的模型能够较好地模拟包头市未来土地利用的演化和城市扩展,为决策支持提供了一个虚拟实验室。

6 结论

传统的基于微分方程或社会物理学城市模拟模型是根据人们对系统总体规律的认识,用一个或几个变量随时间的演化来模拟整个系统行为,一旦参数给定,这种模拟就是确定性的。近年来成为热点的 CA 模型则是采取“自下而上”的建模思路,根据微观个体(细胞)间的相互作用来定义离散细胞状态的转换规则。由于个体相互作用在系统模拟中是变化的,因此这种模拟具有一定的不确定性,符合系统发展的特点。本文对标准 CA 模型的细胞含义、规则定义和系统时间映射等方面进行了扩展,以适应 GIS 环境下时空动态分析的需要,并和 Arc/Info 的 GRID 模块进行了有效集成。以城市土地演化为例,用扩展的 CA 模型对现实中影响城市扩展的主要因子进行了虚拟模拟。最后以包头市为例,用本文提出的模型成功地模拟了未来城市扩展的格局。

将 CA 模型用于地理实体的时空分析与模拟还有待进一步的深入研究。例如,如何将宏观经济、人口模型动态地嵌入 CA 模拟过程中,自动调整模型参数和规则定义,以及将模糊推理与 CA 时空动态模拟结合,建立智能化的 CA 模拟专家系统。这些问题的深入研究与解决,将使得 CA 模型在越来越多的时空分析领域发挥巨大的作用。

感谢美国东密执根大学环境信息技术与应用中心的谢一春博士对本文提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- 1 崔伟宏,张显峰. 时态地理信息系统研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2000
- 2 White R, Engelen G. Cellular Automata and Fractal Urban form: a Cellular Modelling Approach to the Evaluation of Urban Land Use Patterns. *Environment and Planning A*, 1993, 25: 1175 ~ 1199
- 3 Clarke K C, Gaydos L J, Hoopen S. A Self-modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 247 ~ 261
- 4 Xie Yichun. A Generalized Model for Cellular Automaton Urban Dynamics. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 350 ~ 373
- 5 Clarke K C, Gaydos L J. Loose coupling a Cellular Automaton Model and GIS: Long-term Urban Growth Prediction for San Francisco and Washington/ Baltimore. *International Geographical Information Systems*, 1998, 12(7): 699 ~ 714
- 6 孙战利. 空间复杂性与地理元胞自动机模拟研究. *地球信息科学*, 1999, 1(2): 32 ~ 37
- 7 Geoffer G Roy, Fole Snickars. Citylife: a Study of Cellular Automata in Urban Dynamics. *Spatial Analytical Perspectives on GIS*, edited by Manfred Fischer, Henk J. Scholten and David Unwin. USA: Taylor & Francis, 213 ~ 228
- 8 Xie Yichun, Michael Batty. Automata-based Exploration of Emergent Urban form. *Geographical System*, 1997, 4: 83 ~ 102

Cellular Automaton Based Urban Growth Dynamics Modelling and Prediction

Zhang Xianfeng

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Science, Beijing 100101)

Abstract Cities are the center of regional systems. The simulation and prediction of urban growth

is useful for regional planning, urban planning and land management. However, traditional models just regard space as an even plain, time as a simple variable. Space, time and attribute are the basic characteristics of reality world. So more effective and powerful modeling methods need to be developed to simulate the urban expansion process. Cellular Automata Model(CA) provides GIS with a bottom-to-top spatio-temporal modeling frame, which is composed of a fourfold: cells, states, neighbors and rules. The simplicity and flexibility make CA have the ability to simulate a variety of behaviors of complex system.

In order to meet the needs of urban dynamic spatio-temporal modeling under GIS environment, the standard CA is extended to GIS context about the concept of cells, system time and transition rules. Based on these extensions, several factors affecting urban evolution are simulated on a virtual city. Finally, to take Baotou City as an example, a model integrating GIS with ECA was built to simulate the evolution of urban expansion and sustainable land use. The initial time is 1992 when land use data were acquired by aerial photography. The change data collected by differential GPS are used for model calibration. The appropriate extents of Baotou City development in 1998, 2006 and 2012 are simulated. The result of 1998 is in conformity with the surveyed data with GPS. Thus, the established model can be used as a virtual lab for decision support in urban planning and land policy-making.

Key words cellular automata, transition rule, urban expansion, dynamic process simulation