

基于 GIS 和 CA 模型的时空建模方法研究

张显峰 崔伟宏

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要 目前商用地理信息系统(GIS)尚不能完整地表示地理实体的时态信息和时空关系,且缺乏时空分析和时空动态建模能力,这已成为GIS界的一个共识,而未来GIS在各应用领域的深入发展,以及在实现“数字地球”战略过程中,都要求发展新的时空分析和建模方法.由于细胞自动机(Cellular Automata)是一种“自下而上”的动态模拟建模框架,并具有模拟复杂系统时空演化过程的能力,因而将标准CA模型的四元组进行扩展,以满足GIS环境下时空动态分析的要求,进而建立了土地持续利用动态模拟模型,并运用此模型对包头市城市扩展和土地可持续利用进行了比较成功的模拟.

关键词 时空动态分析 细胞自动机 转换规则 城市扩展

中图法分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)12-1012-07

Spatio-Temporal Analysis and Modeling Based on the Integration of GIS and CA Model

ZHANG Xian-feng, CUI Wei-hong

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

Abstract The functionality of spatio-temporal analysis and modeling is a drive for Geographical Information Systems (GIS) to further applications in various applied fields and digital earth plan. However, currently commercial GIS systems lack those capabilities for spatio-temporal distribution, prediction, and simulation of spatio-temporal processes. So more effective and powerful modeling methods need to be developed. Cellular automata model (CA) provides GIS with a bottom-to-top spatio-temporal modeling thought, which is composed of a fourfold: cells, states, neighbors and rules. The simplicity and flexibility make CA able to simulate a variety of behaviors of complex systems. In order to meet the needs of 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 predominant factors affecting urban evolution are simulated on a virtual city. Finally, to take baotou city as an example, integrated GIS with ECA, the evolution of urban expansion and sustainable land use were simulated. 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, 2008 and 2020 are simulated. The result of 1998 is consistent 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.

Keywords Spatio-temporal analysis, Cellular automata, Transition rule, Urban expansion

0 引言

传统的地理信息系统(GIS)能够以数字化方式较好地描述地理实体和地理现象的空间分布关系,但

这种描述是静态的,它不能完整表示地理实体的时态信息和时空关系,且时空分析能力很弱^[1-3],而由于时间、空间和属性是地理实体的3个基本特征^[4],因此,如何建立有效的时空数据模型来表述地理实体的时空特性,以及如何发展面向应用的时空分析模型和

方法是目前 GIS 及其相关领域研究的热点,也是 GIS 向各个应用领域深入发展和实施“数字地球”战略必须解决的问题。

CA 模型(Cellular Automaton Model)又叫细胞(或元胞,或单元)自动机模型,最早由 Ulam 在 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^[5],而 Conway 编制的“生命游戏”(the Game of life)是最为著名的一个在计算机上实现的细胞自动机模型。20 世纪 80 年代以来,伴随着细胞自动机本身理论的深入,它在地理学中的应用和理论研究也得到了长足的发展,其中,如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,尤其是在城市发展动态模拟中,进行了开创性的研究工作^[6]。CA 模型实质上是一种建模框架,而不是一个具体的模拟模型,它由离散的细胞(cells)、有限的状态(states)、邻域(neighbor)和规则(rules)等 4 个基本要素构成。从数据模型的角度看,由于 CA 模型是基于细胞或单元(Cell-based)的动态模拟模型,所以基于栅格数据模型的 GIS,为 CA 模型在地理分析中的实施提供了很好的工具^[7]。另外,CA 模型和 GIS 的集成,一方面增强了 GIS 的时空动态建模功能,即将 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也可以为 CA 模型准备数据和定义有效的细胞转换规则,还可以对模拟结果进行可视化,以方便 CA 模型的校验和决策支持。

土地景观的变化一直是 GIS 研究的一个重要对象,但目前大多数的 GIS 技术只能用序列快照的方式来描述土地景观的变化状态,而不能对土地利用形式的动态变化进行模拟,可是 CA 与 GIS 的集成,则既能顾及土地景观的空间维,又能顾及其时间维,由此来建立一个时空动态分析引擎,但标准的 CA 模型存在一些缺点,即它不能直接模拟地理实体演化的复杂性,而只能从局部个体相互作用出发来定义转换规则,即忽略了区域和宏观因素的影响。此外,如何用抽象的 CA 细胞来描述在空间和时间上都很复杂的地理实体及其演化,也有待进一步研究。本文从 GIS 环境下,时空动态建模的角度出发,将标准的细胞自动机模型进行了扩展,即从微观、区域和宏观 3 个层次来定义 CA 细胞状态转换规则,从而建立了扩展细胞自动机模型(ECA);文中并讨论了 ECA 在城市土地可持续利用中的建模过程,最后以包头市土地可持续利用为实例,进行了包头市城市发展的模拟和预测。

1 CA 模型的特点及其在时空动态模拟中的扩展

1.1 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,且有以下 4 个特点:①所有细胞是相互离散的,它构成一个细胞空间;②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;③邻域是细胞周围按一定形状划定的细胞集合,且它们影响该细胞下一个时刻的状态;④细胞规则定义了细胞状态转换的规则。另外,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。若用集合的语言来描述 CA 模型

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

式中, S 为一个有限集合,它代表细胞状态, N 代表细胞邻域, t 表示时间, f 为局部转换规则。

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

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

&

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

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

其中, $P_d\{x, y\}$ 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 。

CA 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等特点,而具有很强的生命力,从目前的研究看,它具有以下特点:

(1) 由于 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,但这和运用微分方程或物理模型来从宏观上描述空间现象的传统方法是对立的,因为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,它可将地理实体的空间和时间特性统一在模型中,并通过划分研究对象的细胞空间和研究初始状态以及状态转换规则,CA 模型可以通过自行迭代运行,来模拟系统的演化过程,而

GIS 不具备迭代运算的能力。

(3) 由于 CA 模型将空间和时间离散化, 因此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) 由于 CA 模型具有不依赖比例尺的概念^[8], 其中细胞只是提供了一个行为空间, 且本身不受细胞空间测度和时间测度的影响, 而时空测度的影响仅是通过转换规则来体现, 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, 由于 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, 从而为 GIS 中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, 以便更加真实地模拟地理实体的演化进程。

1.2 扩展的 CA 模型(Extended CA)

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, 但是由于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, 还是状态转换规则都是有明确的地理含义, 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, 它们是对标准 CA 模型的扩展。在前人研究基础上, 本文从满足 GIS 时空分析建模的需要出发而提出的这种扩展至少包括以下几个方面:

(1) 细胞空间的扩展。这里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, 而且根据模拟分析对象的空间特性, 还可以抽象为一维的(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, 由于二维细胞空间可以用基于域(field-based)的 GIS 数据模型来表示, 从而为 CA 与 GIS 的集成带来了方便。这种细胞空间的划分不一定是矩形, 它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, 而且当 CA 用于地理时空分析时, 地理细胞的状态集合还可以定义为表征地理实体或现象的指标、编码或等级的集合, 如土地的适宜性是指标、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。虽然标准 CA 模型的规则是局部的, 它是由空间排列决定的映射函数^[9], 但地理现象和地理实体的动态演化却十分复杂, 由于它除受局部个体间相互作用的影响, 还受各种区域的以及更大尺度的因素影响, 因此 CA 模型中状态转换规则必须兼顾微观、区域和宏观, 只有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, 且能随区域差异和时间不同而调整。由此可见, 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最本质的区别。

(4) 时间概念的扩展。CA 模型中的模拟时间必须与地理实体演化中的真实时间建立起对应关系, 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其它模型预测数据来建立二者之间的联系。

2 用扩展细胞自动机模型模拟城市土地持续利用变化

城市是人类文明的中心, 城市的扩展或城市化可看作是微观的不同土地类型相互转化的宏观表现, 但一般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来建立模型的, 它是静态地或准动态地描述城市的结构和面积指标的变化, 因而缺乏足够的空间信息, 由于它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, 因此不符合城市发展的随机性和不确定性^[10]。近年来, CA 模型在城市动态模拟中的运用得到了广泛开展, 如在中国, 由于大量的农业土地转化为城市用地, 这既威胁着农业的可持续发展, 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, 而 CA 模型与 GIS 的集成则可为城市扩展的研究提供一个虚拟环境, 因 CA 可用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, 从而可为区域土地资源的可持续利用提供决策支持。

2.1 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^[11]。在本文的模型中, 就考虑了自发式、扩散式、凝聚式和焦点吸引式等 4 种形式的城市增长, 其中, 自发式增长是新生城市的一种增长方式, 它往往受区域经济条件、自然条件的影响; 扩散式增长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, 则向周边农业区扩展; 凝聚式增长则是由于微观的相互作用, 即城市的吸引作用, 使周边的用地转化, 从而向城区聚集; 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, 而且这 4 种城市扩展的方式都是由微观个体(细胞)间的相互作用, 即区域自然条件、社会经济状况和宏观规划等因素共同作用的结果, 进而形成了城市扩展的总体效应。

2.2 模型描述

为了模拟上述 4 种形式的城市扩展, 本文提出了从概念模型的角度来描述模型思路。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, 所以本文假设 CA 细胞只取 0 和 1 两种状态, 其中 0 代表农业用地状态, 1 代表城市用地状态。这里, 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, 本文取 Moore 邻域构型。另外, 细胞状态转换规则是 CA 模型的关键, 本文从 3 个层次来建立该转换规则, 即首先从微观层次上, 来考虑邻域函数、费用系数和焦点引力等 3 个指标, 其中, 邻域函数是用于刻画当前细胞受周围邻域细胞影响程度的指标, 而费用系数则是从土地持续利用的角度设计的一个反映城市扩展所受耕地保护阻力大小的指标, 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, 若某个土地细胞越适合发展农业, 则它被城市化的阻力越大, 另外, 焦点引力是和阻力系数相反的指标, 它反映城市设施, 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, 从中观层次上, 来考虑区域规划控制, 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指标, 在模型运行中, 它们将影响城市扩展的速度和形式, 这些控制指标可以分为绝对控制和相对控制, 可以用 0 到 1 之间的数字来量化; 最后, 从宏观层次来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, 以及控制城市发展进程的规划等。综上所述, 模拟城市增长的扩展细胞自动机模型可以表述如下

$$S^{t+1} = f(S^t, \mathcal{Q}N), M, A, R_n, R_p) \quad (1)$$

其中, S^{t+1} 和 S^t 是某一细胞在 $t+1$ 和 t 时刻的状态, $\mathcal{Q}N$ 是表示细胞个体间相互作用的邻域函数, M 为土地持续利用费用系数, A 为焦点引力指标, R_n, R_p 分别为自然条件约束和人为规划控制, f 为状态转

换规则映射函数。

综合考虑微观个体(细胞)的相互作用, 即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等, 可以建立更加完善的细胞转换规则, 这样就避免了标准 CA 模型中只考虑邻域影响的局限性。

3 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。

3.1 只考虑局部转换规则

本文取 Moore 邻域为 CA 邻域, 对于细胞空间中的每一个细胞, 考虑以下 2 个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)。

$$D_{\{x,y\}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{\Omega} X_{\{i,j\}} \quad (2)$$

式中, $D_{\{x,y\}}$ 是位于 $\{x, y\}$ 处的细胞由其邻域计算出的城市细胞密度, $X_{\{i,j\}}$ 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

$$M_{\{x,y\}} = \Phi(L, d) = d \times L \quad (3)$$

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, L 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费用的加权距离。

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, 用如下一个负幂函数将指标得分映射为细胞发展概率 $P_{\{x,y\}}$

$$P_{\{x,y\}} = \exp(-\mu_1 \times M_{\{x,y\}} / M_{\max}) \quad (4)$$

式中, $P_{\{x,y\}}$ 为位置 $\{x, y\}$ 处的细胞转换概率, μ_1 为调节系数, $M_{\{x,y\}}$ 为位置 $\{x, y\}$ 处的土地转换费用系数, M_{\max} 为最大费用系数。

这样, 邻域内城市细胞密度指标 $D_{\{i,j\}}$ 即可取为判别指标, 然后按这两个指标即可构建一个如下所示的最简单的转换规则:

IF $P_{\{x,y\}} >$ 某一阈值 1

&

IF $D_{\{x,y\}} >$ 某一阈值 2

THEN cell $\{x, y\}$ 由农用地转化为城市

以上就是一个非常简单的转换规则, 在此规则下, 即可虚拟城市扩展的变化(图 1), 图 1 反映了不同邻域半径下, 细胞个体相互作用所导致的城市扩

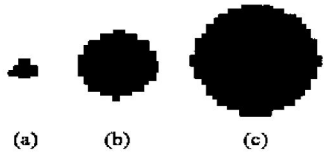


图1 考虑局部规则的城市演化虚拟
(a: 初始化状态; b: $r=1$; c: $r=3, t=10$)

展速率差异.

3.2 考虑焦点引力构建新的转换规则

这里焦点是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,从而导致城市扩展的速率差异.本文假定焦点是高速公路(线状焦点),用来考察它们对城市发展的影响.由于焦点对土地单元的吸引力是随距离逐渐衰减的,因此本模型中,采用

如下负幂衰减函数来量化焦点的吸引力

$$A_{\{x,y\}} = \exp(-\mu_2 \times d_{\{x,y\},c} / d_{\max}) \quad (5)$$

式中, $A_{\{x,y\}}$ 为某时刻位置 $\{x,y\}$ 处的细胞受到的吸引力, μ_2 为速率参数, $d_{\{x,y\},c}$ 为 $\{x,y\}$ 细胞到焦点 C 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 C 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,则由费用系数和焦点引力两个指标来决定,本文用加权的办法来计算其总体发展概率

$$P'_{\{x,y\}} = \exp(-\alpha \times (\mu_1 \times M_{\{x,y\}} / M_{\max} + \mu_2 \times d_{\{x,y\},c} / d_{\max})) \quad (6)$$

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

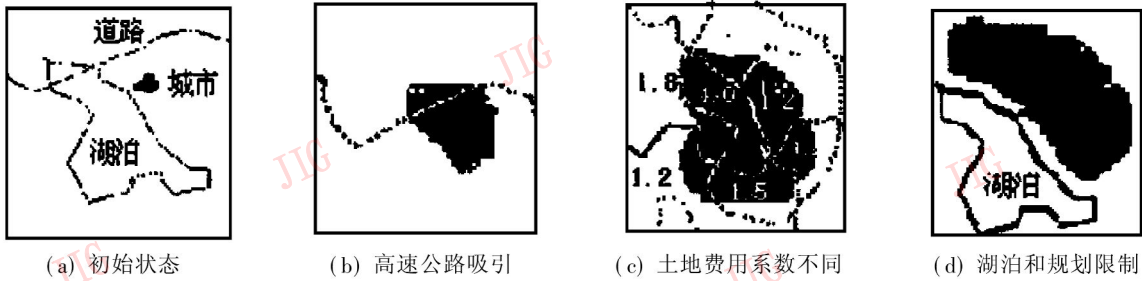


图2 焦点吸引和限制条件下虚拟城市扩展模拟

3.3 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,它要受到许多因素的影响,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,且规划行为也是保证土地持续利用和合理控制城市发展速度的手段.规划对城市发展的影响大致表现在如下3个方面:①限制农业用地向城市用地的转化,比如,依法划出的保护区、基本农田,相当长时间内这些地区在都不允许被城市化;②规定城市发展的形态和格局,比如,规定城市要紧湊发展,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、悬崖陡坡等对城市扩展的影响即属于前者,而地形高程对城市扩展的影响则属于部分限制,而且可用一函数来量化.综合规划和自然条件等因子对城市发展的影响,可归纳为限制因子 R :

$$R_{\{x,y\}} = \left| \sum_{i=1}^k w_i R_i\{x,y\} \right| \times \prod_{j=k+1}^m R_j\{x,y\} \quad (7)$$

式中, w_i 是限制因子权重, 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

$\{x,y\}$ 处的细胞不可能转化和可以转化.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

$$\mu_{\text{可能}} = \begin{cases} 1 & \text{坡度} \leq a \\ e^{-k \left| \frac{x-a}{b} \right|^2} & a < \text{坡度} \leq b \\ 0 & \text{坡度} > b \end{cases} \quad (8)$$

这样,用乘积算子即可构建土地可持续利用 CA 模型的转换规则

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

图2b反映了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的差异,从图2b可见,西北区费用系数最高,城市化速度也最慢,这符合好的耕地应作为农业生产用地的保护目标.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.

4 实例

4.1 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,但GIS和CA模型具有共同的图形用户界面,其中,CA模型的运行由AML语言驱动,而模型主体用C程序设计语言开发.这里GIS模块主要完成数据的处理、模型运行监视、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,系统集成框架如图3所示.

包头市位于内蒙古自治区中部,黄河北岸,市区及近郊区面积2 205.9km²,由3个部分组成,且沿黄河呈东西向展布.1992年完成了土地利用详查工作,并获得了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,通过对原始数据重新分类,提取了居民地和城市类型,以作为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,并由土地质量计算土地费用系数;而以地形、水体、保护地和规划控制作为限制因子.1998年笔者用差分GPS技术精确获取了1992年以来城市扩展的时空变化数据,并将其作为历史数据,并和

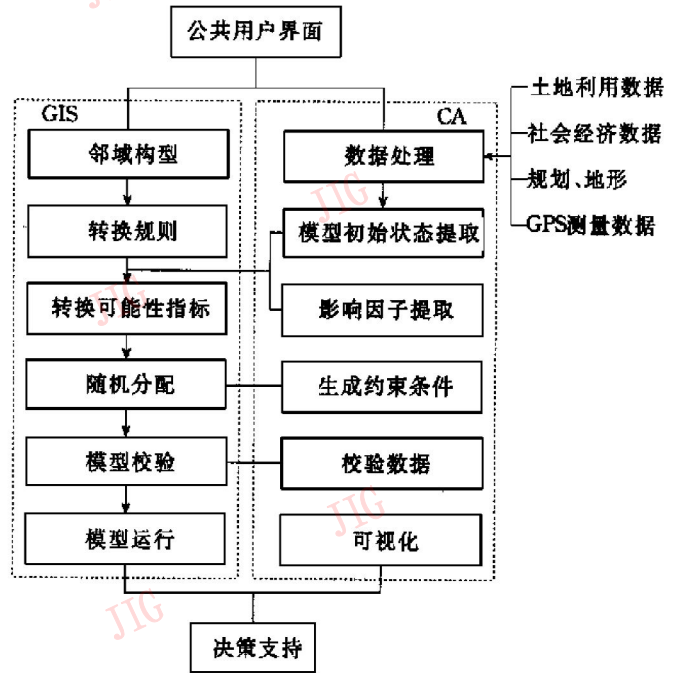


图3 基于GIS和CA集成的土地持续利用时空模拟模型框架
模拟结果进行比较,从而达到校验模型参数和模型时间的目的,同时根据本文提出的模型对包头市城市发展进行了模拟和预测(图4).

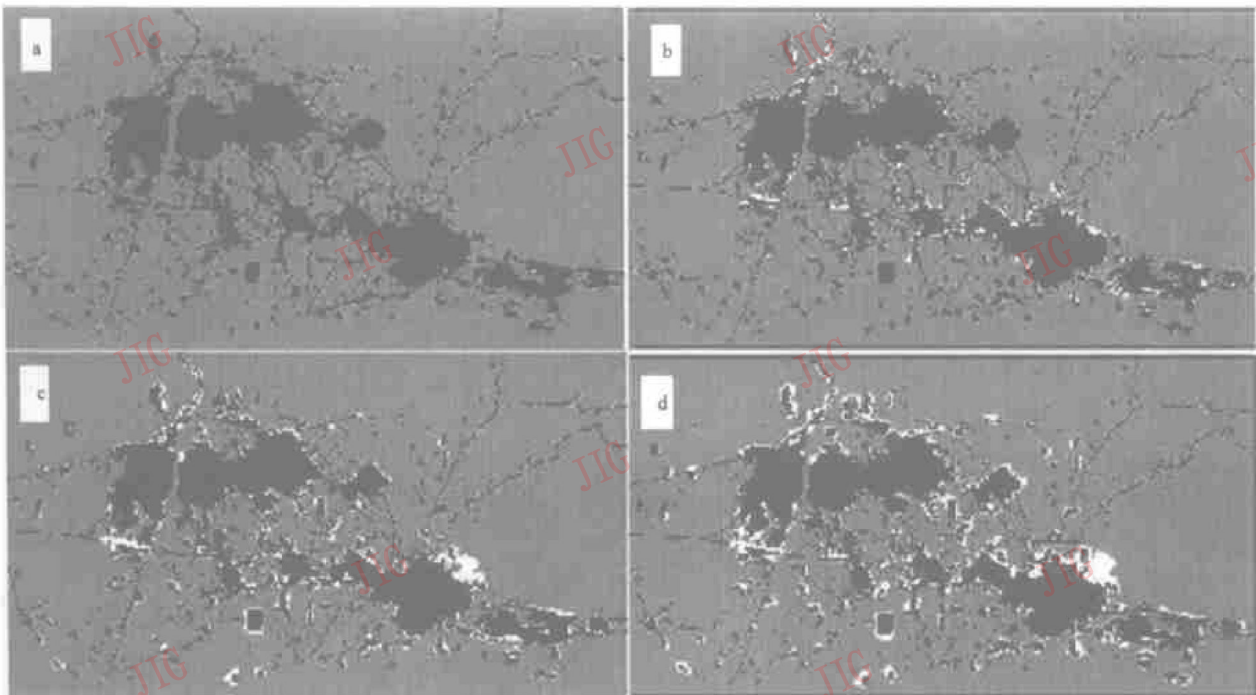


图4 包头市土地持续利用和城市扩展动态模拟
(a: t= 0(1992年); b: t= 5; c: t= 11; d: t= 17)

4.2 模型校验

模型校验有两个目的,一是确定模型参数,即通过历史数据来检验模型结果,经反复试验,以获得模型的运行参数;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,则可以一个时刻作为模型的初始状态,然后用其它时刻的数据和模拟结果与其进行比较,如果二者吻合,则可以把此时的模型参数作为可选参数,再进行进一步模拟. Clarke(1998)用修正的Lee-Sallee形状指数来比较模拟结果和历史真实数据二者形状的相似性,即二者交集和并集的比值,此

外,也可以用空间相关系数来比较.这种方法适合于城市扩展呈线性增长情形的校验.

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

(3) 通过根据土地可持续利用原则导出的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,就可以通过和 CA 模型的预测结果进行对比,来确定模型时间和真实时间之间的对应关系.本文即采用该方法来校验模型,其中,图 4a 是模拟的初始状态,即 1992 年的土地利用现状;而根据土地消费速率校正的结果,如图 4b 所示的模拟结果大致相当于 1998 年的城市扩展现状;图 4c、图 4d 是对未来的预测,系统时间分别为 $t=11$ 和 $t=17$,大致相当于现实中的 2006 年和 2015 年的城市扩展现状.从 1998 年的历史数据检验的结果看,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模拟工具.

5 结 论

传统的基于微分方程的系统动力学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的,一旦参数给定,这种模拟就是确定性的,而近年来,已成为热点的 CA 模型则是采取“自下而上”的建模思路,并根据微观个体(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,且符合系统发展的特点.本文首先对标准 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;然后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顾及土地持续利用情况下,未来城市扩展的格局.但将 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,如何自动调整模型参数和规则定义,以及如何将模糊推理与 CA 时空动态模拟相结合,以建立智能化的 CA 模拟专家系统等.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 Goodchild M. Integrating GIS and spatial data analysis: Problems and possibilities. *International Geographical Information Systems*, 1992, 6(5): 327~ 334.
- 2 Batty M. Using geographical information systems in urban planning and policy-making. In: Fischer M, Nijkamp P(Eds): *Geographical Information Systems: Spatial modeling and policy evaluation*, Springer-Verlag, 1993: 51~ 69.
- 3 Hui Lin, Shu Keung Choi. A multi-window approach for 4-D spatio-temporal information visualization. *GEOMATICA*, 1996, 50(3): 261~ 267.
- 4 Goodchild M. Geographical information science. *International Geographical Information Systems*, 1992, 6(1): 31~ 45.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Itami R M. Cellular worlds: models for dynamic conceptions of landscape. *Landscape Architecture*. July/August. 1988: 52~ 57.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 Geoffery G Roy, Fole Snickars. Citylife: a study of cellular automata in urban dynamics. In: *Spatial Analytical Perspectives on GIS*, Bristol(PA), USA: Taylor & Francis. 1996: 213~ 228.
- 11 Yeh Anthony, Xia Li. Modeling sustainable urban forms using extended cellular automata and GIS. In: *Spatial Data Handling (8th International Symposium)*, Canada. 1998: 453~ 464.



张显峰 1967 年生, 1993 年在北京大学获得硕士学位, 现为中科院遥感应用研究所助理研究员和在读博士. 从事时空分析建模, 以及 3“S”技术集成研究. 已发表论文 10 余篇.



崔伟宏 1935 年生, 1962 年毕业于莫斯科测绘大学, 现为中科院遥感应用研究所研究员、博士生导师. 现从事 GIS 数据结构、时空数据模型和 3“S”应用研究. 已发表专著 4 部, 学术论文 100 余篇.