“生态位”元胞自动机在土地可持续规划模型中的应用

刘小平[1], 黎 夏[1,*], 彭晓鹃[2]

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 2. 南海环境监测中心, 广州 510300)

摘要: 快速城市化带来了一系列的环境生态问题。有必要把生态学的概念引进城市规划中, 以减少城市发展带来的弊端。提出了基于“生态位”的元胞自动机(CA)的新模型, 并将其应用在土地利用规划中。探讨了如何通过“生态位”元胞自动机和 GIS 的结合进行城市土地可持续利用的规划。该模型可方便地探索不同土地利用政策下城市土地利用发展情景, 能够为城市规划提供有用的决策支持。旨在探索通过模拟的手段对城市土地利用进行合理的规划。将该模型应用于快速发展的广州市, 并取得了较有意义的结果。

关键词: 生态位; 元胞自动机; 城市化; 可持续发展; 规划

文章编号: 1000-0933(2007)06-2391-12 **中图分类号**: Q149, U945.23 **文献标识码**: A

Niche-based cellular automata for sustainable land use planning

LIU Xiao-Ping[1], LI Xia[1,*], PENG Xiao-Juan[2]

1 *School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou* 510275, *China*

2 *South China Sea Environment Monitor Center, Guangzhou*, 510300, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2391 ~ 2402.**

Abstract: Rapid urbanization has brought about a series of ecological and environmental problems. Urban planning based on the concepts of ecology is useful for alleviating some of these problems. This paper proposes a new method by incorporating the ecological concept of “niche” in cellular automata (CA) for planning purposes, and illustrates its application to the simulation of sustainable land use. There have been many applications of CA for simulating urban development, yielding significant progresses in verifying urban theories and assumptions. However, many of them are limited to the simulation and prediction of urban development based on the “business-as-usual” scenario that assumes further development to follow present patterns. There exists a general lack of CA application in urban planning. Land use planning is required to solve complex land use problems in implementing the initiatives of sustainable land use. Complex natural and social systems are the subject of many studies aimed at understanding their characteristic dynamics and functioning. Scenario analysis is a promising and interesting planning tool for investigating future in such a complex environment. In this study, the planning objectives related to sustainable development are embedded in this proposed CA model. It simulates alternative development patterns under different land use policies. Planning authorities can evaluate

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2006AA12Z206); 国家杰出青年基金资助项目(40525002); 国家自然科学基金资助项目(No. 40471105); 南海分局海洋科学技术局长基金资助项目(0539)

收稿日期: 2006-05-29; **修订日期**: 2007-01-19

作者简介: 刘小平(1978 ~), 男, 湖南人, 博士生, 主要从事 GIS 和遥感研究. E-mail: yiernanh@163.com

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: lixia@mail.sysu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Hi-Tec Research and Development program of China (No. 2006AA12Z206); National Palmary Youth Foundation of China (No. 40525002); National Natural Science Foundation of China (No. 40471105); South China Sea Bureau Ocean Technology Director General Fund (No. 0539)

Received date: 2006-05-29; **Accepted date**: 2007-01-19

Biography: LIU Xiao-Ping, Ph. D. candidate, mainly engaged in GIS and remote sensing. E-mail: yiernanh@163.com

these options and choose the best option for implementing the initiative of sustainable development. This model thus provides a powerful exploratory tool for generating alternative development patterns.

The novelty of this proposed mode is based on the incorporation of the concept of ecological "niche" in CA. Each cell in cellular automata is assigned with a distinct ecological "niche", such as "agriculture ecological niche", "urban development ecological niche" and "sustainable development ecological niche". The ecological "niche" of each cell will have its own distinct "contribution" to the urban development according to the planning objectives These cells will compete each other according to a biological competition mechanism characterized by selection of the superior and elimination of the inferior for ecological "niche", assuming cells with higher potentials are more competitive. This competition mechanism will result in urban evolution. This paper presents a new method for simulating sustainable land use by the integration of ecological "niche", cellular automata and GIS. This ecological cellular automaton can simulate urban development under different land use policies. It can be used to assist decision makers in searching for alternative land development so that land use conflicts can be minimized. This model has been applied to the simulation of development alternatives for a fast growing city, Guangzhou, South China, and produced promising results.

Key Words: ecological niche; cellular automata; urbanization; sustainable development; urban planning

元胞自动机(CA)由 Ulam 在 20 世纪 40 年代提出,常用于自组织系统演变过程的研究[1]。元胞自动机是一种"自下而上"的研究方法,即局部个体的简单行为能够产生全局、有秩序模式的复杂系统,这充分反映了"复杂系统来自简单子系统的相互作用"的复杂性科学观点。元胞自动机具有模拟二维空间演化过程的能力,并且在时间上也是离散的,因此具有很强的时空动态性,它的这种特性使其模拟土地利用变化和城市发展具有明显的优势。近年来,许多学者开展了 CA 在城市方面的研究,并取得了很好的研究成果[2~8]。例如,White 和 Engelen 运用约束性 CA 模型成功模拟了辛辛那提土地利用的变化[2];Clarke 等模拟了美国旧金山地区的城市发展[4];Wu 运用 Logistic 回归 CA 模型模拟了广州市的扩张[6];黎夏和叶嘉安则对东莞市的城市扩张进行了系列研究[7,8]。

但是,以往的研究多集中于城市发展的模拟和预测,较少涉及到元胞自动机在城市规划中的应用[9,10]。事实上,即使元胞自动机中的参数校正得非常好,也不能完全模拟出城市的动态发展,只能模拟出城市发展的大体趋势。元胞自动机虽然不能完全精确地模拟城市发展,但是,如果在元胞自动机模型中嵌入政府规划行为或可持续发展目标,则可以模拟出不同政策下城市发展的情景,政府可以根据自己的目标,选择最优的城市发展模式,从而为政府的土地利用规划提供强有力的决策支持。元胞自动机用作规划模型也许比其用作预测模型更具有价值。目前,有关规划元胞自动机模型的研究相对比较少。Ward 运用优化元胞自动机模型对东澳大利亚(Eastern Austrian)的土地利用可持续发展进行了模拟[11]。黎夏和叶嘉安通过约束性元胞自动机模型对珠江三角洲地区的可持续城市发展形态进行了模拟和规划[9,10]。他们的研究表明,元胞自动机用作城市规划模型有着巨大的潜力。但是,这方面的研究还未引起足够的重视。

本文提出了一种基于"生态位"的元胞自动机模型,在元胞自动机模型引入生态学中一个重要的概念:生态位。给每一个元胞赋予不同的"生态位":包括"农业生态位"、"城市发展生态位"、"可持续发展生态位"。根据政府不同的规划目标,在城市的发展中,元胞的各个"生态位"相应"贡献"不同的作用。元胞之间通过优胜劣汰的生物竞争方式推动城市的发展,"生态位"较高的元胞具有更强的竞争力。提出了通过"生态位"元胞自动机和 GIS 的结合对城市土地利用可持续发展进行模拟和规划的新方法,该模型能够模拟不同土地利用政策下城市发展的情景,可以为政府土地规划提供强有力的决策支持。将该模型应用于快速发展的广州市,并取得了较有意义的结果。

1 生态位理论及"生态位"元胞自动机

1.1 生态位理论

生态位理论是生态学中重要的基础理论,Grinell 在 1917 年首先明确定义生态位的概念:"生物在栖息地

所占据的单元”[2]。Elton 认为“物种的生态位是指其在生态环境中的地位和作用”[3]。Hutchinson 将生态位扩展为既包括生物的空间位置及其在生物群落中的功能地位,还包括生物在环境空间的位置,即“超体积生态位”[4]。超体积生态位的定义为综合描述生物在其生境中对资源谱的利用方式提供了理论基础。

1.2　城市元胞“生态位”及元胞生态位适宜度

根据生态位的涵义,定义城市 CA 的“元胞生态位”如下:城市元胞“生态位”是指元胞的空间位置及其在城市发展过程中所形成的地位和作用,也包括元胞在环境空间中的位置。亦即“元胞超体积生态位”。每一个元胞都拥有自己的生态位,在二维空间上表现为区域的差异性。对于不同的发展目标或政策,元胞“生态位”是变化的,譬如:一个元胞所占用的空间拥有较好的交通条件、基础设施条件和社会经济条件,但其土壤条件及地理条件却比较差,对于以农业生产为目的来说,其“生态位”比较低,但对于城市发展为目的来说,其“生态位”则较高。

城市是在各种资源的基础上进行发展的,这些资源包括自然生态环境、社会经济条件及物质资源等,从而构成一个多维的资源需求空间。欧阳志云等定义区域发展对资源的需求所构成的多维空间为需求生态位[5]。城市发展对资源的需求构成需求生态位,而城市 CA 模型中元胞的现状资源也构成对应的资源空间,两者之间的匹配关系则反映了元胞的现状资源条件对城市发展的适宜程度,其度量可以用生态位适宜度来表示。当元胞的现状资源条件能够完全满足城市发展的要求时,城市发展生态位适宜度为 1,当元胞的现状资源条件完全不能满足城市发展的要求时,城市发展生态位适宜度为 0。同样,也可以类比定义元胞的农业生态位适宜度。

发展对资源的需求通常可以分为 3 类[4],第 1 类必须满足其最低要求,而且越丰富越好,如:城市发展中的交通条件。对于该类资源,元胞的生态位适宜度可以用公式表达如下:

$$S_k=\begin{cases}0 & \text{when } X_k<D_{k\min}\\ X_k/D_{kopt} & \text{when } D_{k\min}<X_k<D_{kopt}\\ 1 & \text{when } X_k>D_{kopt}\end{cases} \tag{1}$$

式中,S_k 为 k 种资源的元胞生态位适宜度,X_k 为现状资源的值,$D_{k\min}$ 为 k 种资源要求的最低值,D_{kopt} 为 k 种资源要求的理想值。

第 2 类发展对资源的需求是指在资源可供给范围内存在一个适宜的区间,资源供给过多或过少均将成为限制因素。如:城市发展中的人口密度。对于这类资源,元胞的生态位适宜度用下式表示:

$$S_k=\begin{cases}0 & \text{when } X_k\leqslant D_{k\min} \quad \text{or} \quad X_k\geqslant D_{k\max}\\ (X_k-D_{k\min})/(D_{kpot}-D_{k\min}) & \text{when } D_{k\min}<X_k<D_{kpot}\\ (D_{k\max}-X_k)/(D_{k\max}-D_{kopt}) & \text{when } D_{kopt}<X_k<D_{k\max}\end{cases} \tag{2}$$

式中,$D_{k\max}$ 为 k 种资源要求的最高值,其它符号与(1)式相同。

第 3 类发展对资源的需求是指资源的现状值越低越好,如环境污染、灾害发生频率等。对于这类资源,元胞的生态位适宜度用下式表示:

$$S_k=\begin{cases}1 & \text{when } X_k\leqslant D_{k\min}\\ 1-(X_k-D_{k\max})/(D_{k\min}-D_{k\max}) & \text{when } D_{k\min}<X_k<D_{kpot}\\ (D_{k\max}-X_k)/(D_{k\max}-D_{kopt}) & \text{when } X_k\geqslant D_{k\max}\end{cases} \tag{3}$$

城市发展的资源需求生态位是一个多种资源构成的多维空间。根据 Shefold 限制性定律:任何一个生态因子在数量上或质量上的不足,就会导致该生物衰退或不能生存[5,16]。同样,这个定律也适合用于分析城市发展与资源的关系,任何资源因素的现状条件在数量或质量上的不足,就会成为城市发展的制约因素。因此,在城市 CA 中,多维资源的元胞生态位适宜度可用下式表示:

$$S=\left(\prod_{k=1}^{n}S_k\right)^{1/n} \tag{4}$$

式中，S 为多维资源的元胞生态位适宜度，S_k 为某一种资源（或生态因子）的元胞生态位适宜度，n 为生态因子种类之和。

1.3 “生态位”元胞自动机的转换规则

城市 CA 模型往往对标准 CA 模型的限制条件进行了适当的放宽，包括转换规则、邻域及元胞状态。Batty 和 Xie 提出了随距离衰减的邻域[21]，黎夏和叶嘉安提出利用“灰度”来表示元胞状态[21]。而更多的研究则注重于提出适合城市 CA 模型的转换规则，在这方面，城市地理学家做了大量的工作[6,7,8,17~19]。由于城市系统的不确定性，城市 CA 模型并不适合运用严格限制的转换规则，学者更倾向于用概率转换规则代替确定性的转换规则。

在“生态位”元胞自动机中，也适当地放宽了标准 CA 模型转换规则的限制条件，用概率转换规则代替确定性的转换规则。对于某一发展目标或措施，需要先确定该发展目标或措施的需求生态位，根据“生态位”CA 的元胞现状资源与需求生态位的匹配关系，计算元胞的生态位适宜度。元胞生态位适宜度越高，其对应的“生态位”就越高，在城市发展中，该元胞的竞争力也就越强，因此，其转化为城市的概率也就越大。“生态位”元胞自动机的转换规则可用下式表达：

$$P_t(ij) = \left(\prod_{k=1}^{n} S_k\right)^{1/n} \cdot \mathrm{con}(\mathrm{suit}(ij)) \cdot \Omega_{t-1}(ij) \quad (5)$$

式中，$P_t(ij)$ 为元胞在 t 时刻发展为城市用地的概率，$\left(\prod_{k=1}^{n} S_k\right)^{1/n}$ 为元胞的城市发展生态位适宜度，$\mathrm{con}(\mathrm{suit}(ij))$ 为元胞外部的约束条件，其值为 0 ~ 1，譬如，河流、陡峭的山地、等发展为城市用地的概率较小。$\Omega_{t-1}(ij)$ 为 $t-1$ 时刻的邻域影响值。选择 3×3 作为邻域窗口，定义 $t-1$ 时刻的邻域影响值为：

$$\Omega_{t-1}(ij) = \frac{\sum_{3\times3} N_{t-1}(\mathrm{urban}(ij))}{3 \times 3 - 1} \quad (6)$$

式中，$\sum_{3\times3} N_{t-1}(\mathrm{urban}(ij))$ 为 $t-1$ 时刻 3×3 邻域窗口内城市化像元数。

求出元胞发展概率后，还需要判断该元胞是否发展，采用 Monte Carlo 的方法进行判断[20]，公式表达如下：

$$S_{t+1}(ij) = \begin{cases} \mathrm{Development}, & P_t(ij) > \mathrm{Rand}_t(ij) \\ \mathrm{Undevlopment}, & P_t(ij) > \mathrm{Rand}_t(ij) \end{cases} \quad (7)$$

式中，$\mathrm{Rand}_t(ij)$ 为 0 ~ 1 之间的随机变量，它随时间 t 的变化而不断随机进行改变。这种方法更能体现城市发展的不确定性。

从式（5）、式（7）可以看出，“生态位”元胞自动机模型的转换规则与常规的元胞自动机模型有所区别，“生态位”CA 模型的转换规则生态学意义非常明确，并且其转换规则是由各种资源要求的最低值、最高值及最优值决定，这些值一般是由规划者根据经验和规划目标来确定，规划意义非常明确。

1.4 “生态位”CA 模型及城市土地利用规划

“生态位”元胞自动机是一种天然的土地利用规划工具，因为生态位适宜度模型本身就是一种土地利用生态规划模型[4,15]。但是，以往的城市土地利用生态规划模型是静态的，这种静态模型不能体现出城市发展的动态性，往往满足不了城市规划者的要求，并且，城市是一个异常复杂的巨系统，它的发展并不一定按照政府“从上而下”的规划进行。如果规划者能够模拟在不同规划方案下，城市未来发展的大体趋势，从而选择最优的规划方案，使城市的发展具有可持续性，则对指导城市规划具有非常重要的意义。因此在规划城市土地资源时，有必要对城市的发展进行动态模拟。“生态位”元胞自动机则是城市规划与城市模拟的综合体，是一种时空动态的土地利用规划模型。

1.4.1 “理想化”土地利用规划“生态位”CA 模型

在“理想化”土地利用规划“生态位”CA 模型中，城市发展概率只考虑元胞的生态位适宜度，而不考虑现

实的城市发展趋势。根据不同的发展目标或规划方案,城市“生态位”CA 模型可以分为 3 类:

(1)“农业生态位”CA 模型:城市的发展以保护农田和果园为目的,农业生态位适宜度较高的地方转化为城市用地的概率较小,用公式表示如下:

$$P_t(i,j) = (1 - S_{AG}) \cdot \mathrm{con}(\mathrm{suit}(i,j)) \cdot \Omega_{t-1}(i,j) \tag{8}$$

式中,S_{AG}为元胞的农业生态位适宜度。农业需求生态位由土壤类型、土壤肥力、气候条件、地形等生态因子组成。

(2)“城市发展生态位”CA 模型:只考虑城市发展的生态位适宜度,而不考虑保护农田和果园,用公式表示如下:

$$P_t(i,j) = S_{DE} \cdot \mathrm{con}(\mathrm{suit}(i,j)) \cdot \Omega_{t-1}(i,j) \tag{9}$$

式中,S_{DE}为元胞的城市发展生态位适宜度。城市发展需求生态位由交通条件、基础设施条件、社会经济条件、生态环境条件、地形等资源组成。

(3)“可持续发展生态位”CA 模型:农业生态位适宜度是可持续城市发展所要考虑的重要因素,因此,该模型既考虑城市发展生态位适宜度,也考虑了农业生态位适宜度,尽量避免侵占优质的农田和果园。用公式表示如下:

$$P_t(i,j) = (1 - S_{AG})^m \cdot (S_{DE})^n \cdot \mathrm{con}(\mathrm{suit}(i,j)) \cdot \Omega_{t-1}(i,j) \tag{10}$$

式中,m 和 n 分别为正整数,可以通过指数函数控制规划的侧重度,如果 $m > n$,则侧重于保护农田和果园,如果 $m < n$,则侧重于城市发展的适宜度。政府可以根据不同的发展目标改变 m 和 n 的值。

1.4.2　“现实化”土地利用规划“生态位”CA 模型

如果把现实城市发展的趋势也考虑到土地利用规划“生态位”CA 模型中,则模型能模拟不同规划方案下城市未来发展的情景,用公式表达如下:

$$P_t(i,j) = Pr(i,j) \cdot S \cdot \mathrm{con}(\mathrm{suit}(i,j)) \cdot \Omega_{t-1}(i,j) \tag{11}$$

式中,S 为元胞的生态位适宜度,不同的规划方案对应不同的生态位适宜度。$P_r(i,j)$为现实城市发展概率,选择最简单的 logistic 方法来自动获取元胞的现实城市发展概率[6]。选取系列空间变量作为现实城市发展概率的度量,这些空间变量包括到高速公路、一般公路、铁路、市中心及区中心的距离等。最后获得的现实城市发展概率如下:

$$P_r(i,j) = \frac{1}{1 + \exp[-(d + \sum_h D_h \cdot x_h)]} \tag{12}$$

式中,d 为 logistic 回归的常数,x_h 为各距离变量,D_h 为各距离变量的权系数。

2　模型的应用

2.1　实验区及数据

选取广州市原八区作为实验区。空间数据包括遥感数据和 GIS 数据。遥感数据为 1995 年 12 月 30 日、2000 年 9 月 14 日及 2005 年 7 月 18 日 3 个时相的 TM 影像。GIS 数据包括广州市高程图、广州市土壤图、广州市土壤肥力图、广州市道路和铁路图、以及广州市学校、医院、银行、公园、书店、客运站、娱乐设施、邮局、工业区、区中心、商服中心、水体及人口密度分布图,还包括从遥感影像上提取的绿地覆盖度(混合像元分解方法求得)、热环境(亮温)分布图。社会数据主要包括各区经济统计数据(GDP)。

2.2　生态位适宜度的计算

本文的生态位适宜度主要包括 3 种:农业生态位适宜度、城市发展生态位适宜度、可持续发展生态位适宜度。

2.2.1　农业生态位适宜度

农业需求生态位由土壤类型、土壤肥力(土壤全氮含量、速效磷含量、速效钾含量、有机质含量)、气候条件、地形等资源组成,对于广州市原八区,由于区域较小,暂且认为气候条件相差不大,不考虑其影响作用。根

据公式 (4),可以计算元胞的农业生态位适宜度,计算结果见图 1 A。

2.2.2 城市发展生态位适宜度

城市发展需求生态位由交通条件、基础设施条件、社会经济条件、生态环境条件、地形等资源组成 (表 1),采用简单的平均权值确定各生态因子的权重 (表 1)。根据表 1 及公式 (4),计算元胞的城市发展生态位适宜度,计算结果见图 1 B。

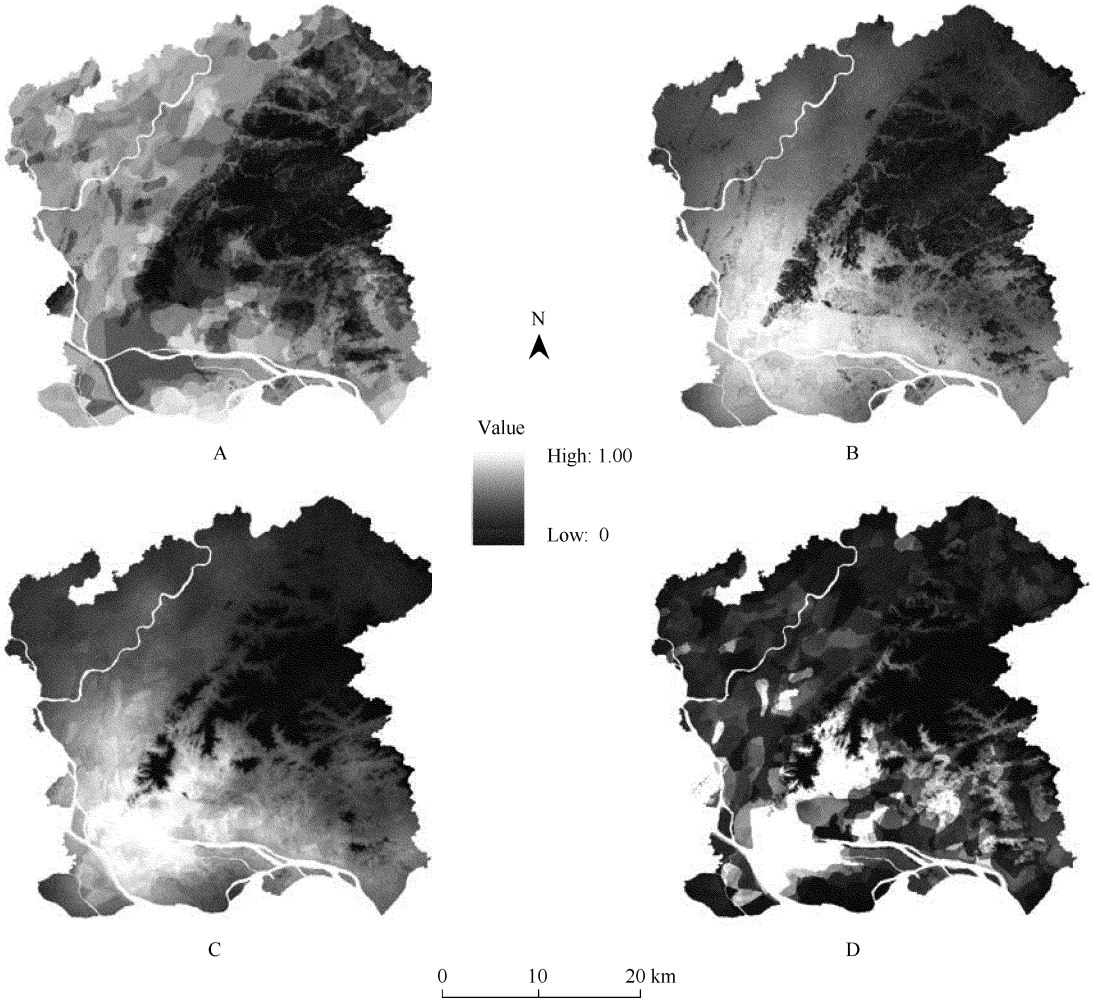

图 1 各种生态位适宜度

Fig. 1 Ecological niche suitability

2.2.3 可持续发展生态位适宜度

可持续发展生态位适宜度可以通过农业生态位适宜度和城市发展生态位适宜度求得,计算公式如下:

$$S_{SU} = (-\mathrm{SAG})^m \cdot (S_{DE})^n \quad (3)$$

式中,S_{SU}为可持续发展生态位适宜度,城市规划者可以根据不同的发展目标改变 m 和 n 的值。计算结果见图 1 C ($m=1, n=1$) 和图 1 D ($m=3, n=1$)。

2.3 模拟结果

城市规划对城市的土地利用变化起着决定作用,引导了整个城市的演化过程,也决定了城市发展模式。对于不同的发展目的,政府有相应的发展方案。在“生态位”CA 模型中嵌入政府规划目标,能模拟出不同政策下城市发展的情景,政府可以根据自己的目标,选择最优的城市发展模式,为政府的土地利用规划提供强有力的决策支持。本文根据 1.4 所讨论的几个“生态位”CA 模型分别模拟了不同规划方案下广州市从 1995 年

到 2005 年的城市发展情景。表 2 是不同的规划方案及其所采取的相应“生态位”CA 模型。

表 1　城市发展需求生态位资源及生态因子

Table 1　Resource of ecological niche for urban development and ecological factors

城市发展需求生态位资源 Resource of niche for urban development	生态因子 Ecological factor	权重 Weights
交通条件 Traffic	到道路、铁路的距离 Distance to roads and railways	1/3
	到市中心、区中心的距离 Distance to urban center and district centers	1/3
	到客运站的距离 Distance to stations	1/3
基础设施条件 Facility	到学校、书店、银行、医院、邮局、娱乐设施的距离 Distance to schools, book stores, banks, hospitals, post offices and entertainment facilities	1
生态环境 Ecological environment	绿地覆盖度 Green land coverage	1/5
	到公园的距离 Distance to parks	1/5
	到水体的距离 Distance to water	1/5
	到工业区的距离 Distance to industry zones	1/5
	城市热环境 Thermal environment of city	1/5
社会经济 Social economic	人口密度 Population density	1/3
	到商服中心的距离 Distance to business centers	1/3
	GDP 密度（单位面积的 GDP 产值）GDP density (GDP production of a unit area)	1/3
地形 Topography	坡度 Slope	1

表 2　各种规划方案及采取的“生态位”CA 模型

Table 2　Different planning projects and adopted CA model

规划方案 Planning schemes	规划内容 planning content	采取的 CA 模型 CA model
规划方案 1 Planning schemes 1	以保护农田为目的，尽量避开侵占优质的农田和果园，不考虑现实城市发展趋势。The aim is to protect farmlands and orchards, try to avoid encroachment of farmlands and orchards of excellent quality, but do not take the realistic trend of urban development	“理想化”“农业生态位”CA 模型 “Idealized” “agriculture ecological niche” CA model
规划方案 2 Planning schemes 2	只考虑城市发展适宜度，而不考虑保护农田和果园，也不考虑现实城市发展趋势。Only considering suitability for urban development, rather than the protection of farmlands and orchards, or the realistic trend of urban development	“理想化”“城市发展生态位”CA 模型 “Idealized”, “urban development ecological niche” CA model
规划方案 3 Planning schemes 3	城市发展以土地利用可持续发展为目的，不仅要保护优质的农田和果园，也考虑城市发展适宜度。不考虑现实城市发展趋势。Urban development aims to promise the sustainable development of land use, not only considering the protection of farmlands and orchards, also taking suitability for urban development into account. Regardless of the realistic trend of urban development	“理想化”“可持续发展生态位”CA 模型（$m=1$，$n=1$）“Idealized”, “sustainable development ecological niche” CA model ($n=1$, $n=1$)
规划方案 4 Planning schemes 4	以保护农田为目的，尽量避开侵占优质的农田和果园，考虑现实城市发展趋势。The aim is to protect farmlands and orchards, try to avoid encroachment of farmlands and orchards of excellent quality, and consider the realistic trend for urban development	“现实化”“农业生态位”CA 模型 “Realistic” “agriculture ecological niche” CA model
规划方案 5 Planning schemes 5	只考虑城市发展适宜度，而不考虑保护农田和果园，考虑现实城市发展趋势。only considering suitability for urban development, rather than the protection of farmlands and orchards. Taking the realistic trend of urban development into account	“现实化”“城市发展生态位”CA 模型 “Realistic” “urban development ecological niche” CA model
规划方案 6 Planning schemes 6	城市发展以土地利用可持续发展为目的，不仅要保护优质的农田和果园，也考虑城市发展适宜度。考虑现实城市发展趋势。Urban development aims to promise the sustainable development of land use, not only considering the protection of farmlands and orchards, also taking suitability and the realistic trend of urban development into account	“现实化”“可持续发展生态位”CA 模型（$m=1$，$n=1$）“Realistic” “sustainable development ecological niche” CA model ($m=1$, $n=1$)

图 2、图 3 是在上述不同规划方案下所模拟的广州市发展情景。图 4 是“现实化”“生态位”CA 模型模拟天河区发展情景的局部放大细节。在图 2～图 4 中可以清楚地看到：“农业生态位”CA 模型模拟的发展情景保留了大部分的农田和果园，但由于过分强调保护农业，导致城市形态显得较为凌乱；“城市生态位”CA 模型

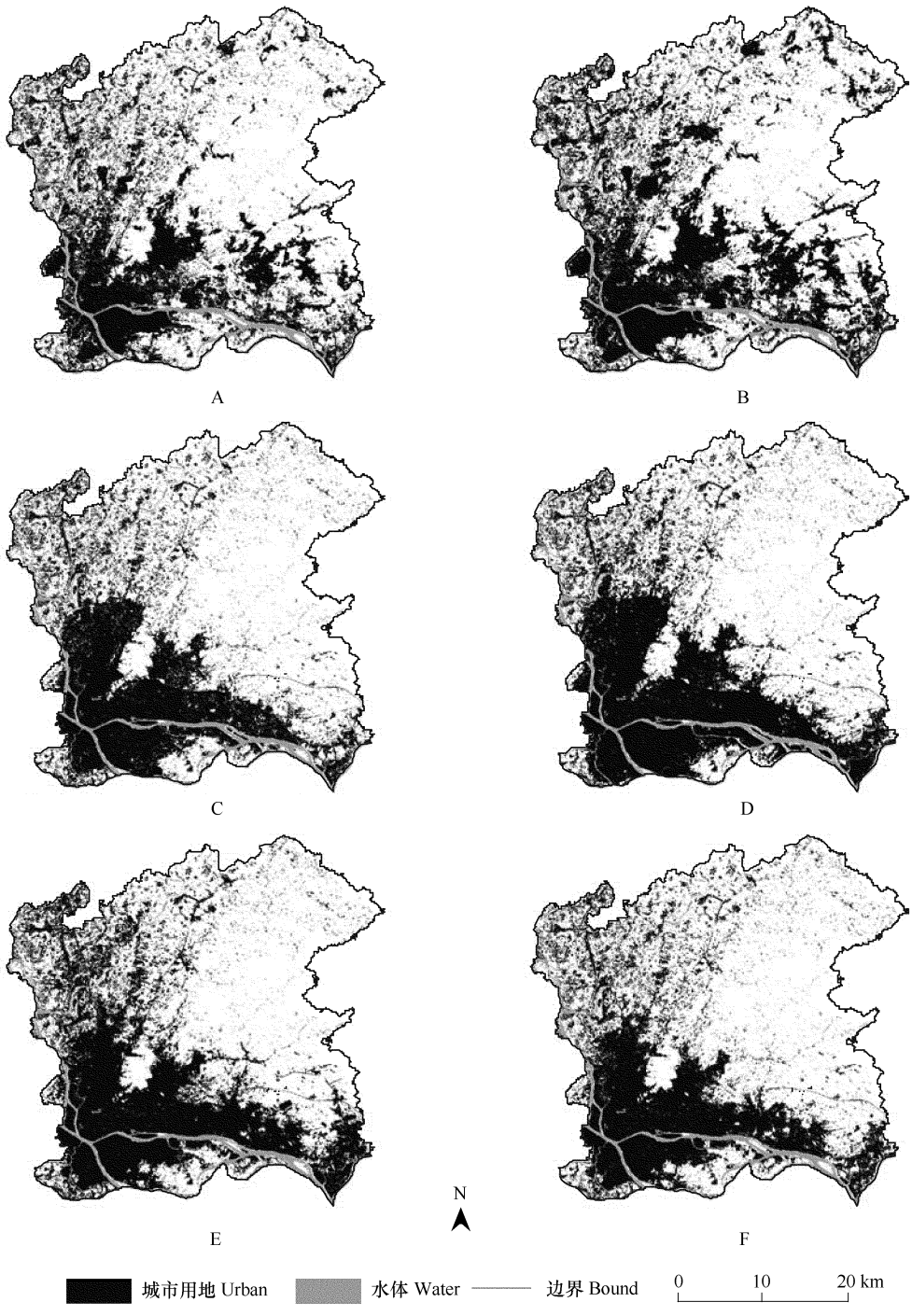

图 2 基于 '理想化生态位 '的广州城市用地情景模拟

Fig. 2 The simulated urban development of Guangzhou through "Idealized "ecological niche CA model

模拟的发展情景侵占了大量的农田和果园,特别是海珠区的万亩果园,大部分被城市化了,这是一种不可持续的土地利用方式。而 '可持续发展生态位 'CA 模型模拟的发展情景不仅保留了大部分的农田和果园,也考虑了城市发展的生态位适宜度。

为了能够更好的定量评价不同规划方案下城市土地资源的利用效率,提出了土地利用生态位效益指数、土地利用生态位协调发展度指数,用来评价不同规划方案的合理性。土地利用生态位效益指数计算公式如下:

图 3　基于“现实化生态位”的广州城市用地情景模拟

Fig. 3　The simulated urban development of Guangzhou through “realized” ecological niche CA model

$$S_B = \sum_i \sum_j S_{DE}(i,j) - S_{AG}(i,j) \quad (4)$$

式中,S_B 为土地利用生态位效益指数,$S_{DE}(i,j)$ 和 $S_{AG}(i,j)$ 分别指转化为城市用地的城市发展生态位适宜度和农业生态位适宜度。式(4)中,只考虑土地利用生态位的绝对效益,然而,在城市土地利用可持续发展中,协调发展度是非常重要的一个衡量指标。把协调度引入城市“生态位”CA 模型中,即是度量转化为城市用地的农业生态位和城市发展生态位之间协调状况好坏程度的指标。综合考虑土地利用生态位效益指数和协调度,即为土地利用生态位协调发展度,用来度量农业生态位和城市发展生态位的效益及协调程度。对于单个元胞(已转化为城市用地)来说,该元胞的城市发展生态位适宜度和农业生态位适宜度的离差越大,生态位协调度

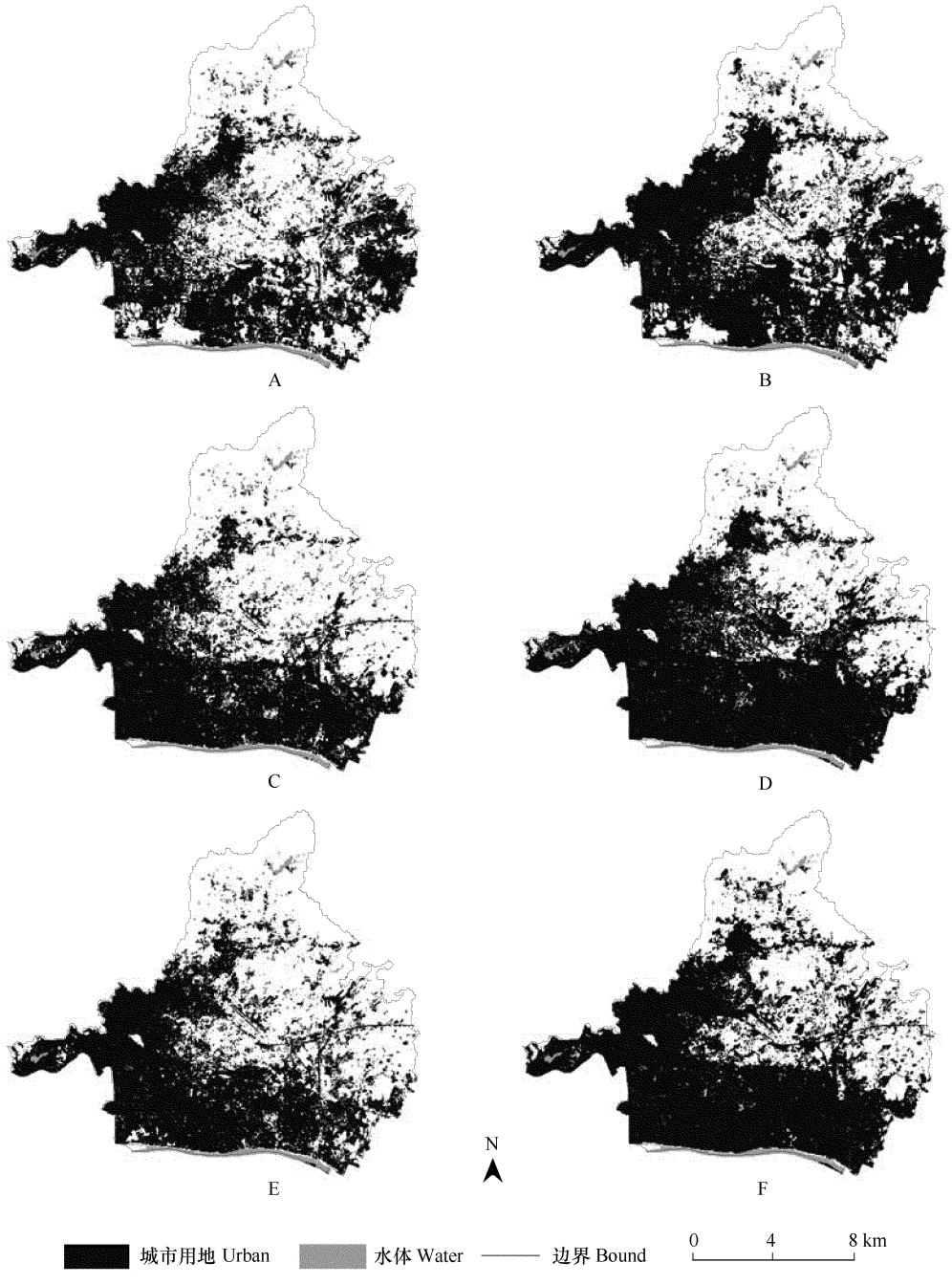

图 4 基于“现实化生态位”的天河区城市用地情景模拟

Fig. 4 The simulated urban development of Tianhe district through “realized” ecological niche CA model

越好,其生态位协调发展度也就越好。因此,土地利用生态位协调发展度指数可用下式表示:

$$S_C = \sum_i \sum_j \left(S_{DE}(i,j)) - S_{AG}(i,j)\right) \cdot \left(1 - \frac{4S_{DE}(i,j) \cdot S_{AG}(i,j)}{(S_{DE}(i,j) + S_{AG}(i,j))^2}\right) \quad (5)$$

根据式(4)、式(5)计算不同规划方案下的土地利用生态位效益指数 S_B、生态位协调发展度指数 S_C、果园损失量、农田损失量(表 3),从表 3 中可以得出以下的结论:

()无论是在“理想化”“生态位”CA 中,还是在“现实化”“生态位”CA 中,“可持续发展生态位”CA 模型的 S_B 和 S_C 总是最大的。这是因为“可持续发展生态位”CA 模型兼顾到“农业生态位”和“城市发展生态位”。“城市发展生态位”CA 模型的 S_B 和 S_C 指数值总是最小的,可能是因为城市发展侵占了大量的农田和果园;

真实情景的生态位效益指数 S_B 和生态位协调发展度指数 S_C 都比较小,其损失的果园和农田较多。

(2)无论是在“理想化”“生态位”CA 中,还是在“现实化”“生态位”CA 中,“农业生态位”CA 模型的果园及农田损失量总是最小的;“城市发展生态位”CA 模型的果园及农田损失量总是最大的。

(3)“现实化”CA 模型的 S_B 和 S_C 比相应的“理想化”CA 模型的 S_B 和 S_C 要小,这是因为“现实化”CA 模型更偏重于“城市发展生态位”,城市发展过程中导致农业用地的流失。

(4)随着城市的发展,无论是规划方案还是真实情景,生态位效益指数和生态位协调指数大幅度下降,甚至变为负值。这可能是城市的适宜发展空间已逐渐达到饱和,城市的继续扩展将会侵占大量的农业用地。

表 3　不同发展情景下的土地利用指数

Table 3　Index of land use under different development scenario

发展情景 Development scenario	时间 Time	土地利用生态位效益指数 S_B Niche benefit index of land use	土地利用生态位协调发展度指数 S_C Niche coordinated development index of land use	果园损失量(像元) Loss of orchard (pixel)	农田损失量(像元) Loss of agriculture (pixel)
规划方案 1	1995～2000	11218.18	1032.98	14375	36449
Planning scheme 1	2000～2005	3751.04	510.93	13752	38271
规划方案 2	1995～2000	10080.72	969.71	22429	60233
Planning scheme 2	2000～2005	1032.68	169.14	21487	62103
规划方案 3	1995～2000	13703.86	1211.65	16825	42961
Planning scheme 3	2000～2005	6257.63	640.25	16241	43850
规划方案 4	1995～2000	7445.18	689.32	15279	38475
Planning scheme 4	2000～2005	-410.63	-34.43	14451	40177
规划方案 5	1995～2000	6141.32	599.75	26798	69820
Planning scheme 5	2000～2005	-664.75	-48.47	24623	72517
规划方案 6	1995～2000	9432.63	874.53	18247	44712
Planning scheme 6	2000～2005	867.76	34.37	17641	45116
真实情景	1995～2000	65271.63	613.24	23625	61725
Actual scenario	2000～2005	-513.85	-38.92	19151	62410

3　结论

(1)本文提出了基于“生态位”的元胞自动机模型,在元胞自动机模型引入生态学中一个重要的概念:生态位,并探讨了“生态位”元胞自动机模型与 GIS 结合在城市土地利用规划中的应用。“生态位”CA 模型的转换规则的获取非常简单,并且其转换规则具有非常明显的生态学意义及规划意义,是土地利用生态规划的一种天然工具。

(2)城市规划对城市的土地利用变化起着决定作用,引导了整个城市的演化过程,也决定了城市发展模式。常规的土地利用规划模型往往是静态的,然而,城市是一个异常复杂的巨系统,它的发展并不一定按照政府“从上而下”的规划进行。如果规划者能够模拟在不同规划方案下,城市未来的发展情景,从中选择最优的规划方案,使城市的发展具有可持续性,则对指导城市规划有非常重要的意义。本文结合元胞自动机模型和土地利用生态规划模型,充分利用元胞自动机模型的时空动态特性,发展了具有时空动态变化特点的土地利用规划模型。

(3)将该模型应用在广州市原八区,利用不同年份的卫星遥感图像作为主要观察资料,通过 logistic 回归方法获取城市发展趋势。设计了 6 种不同的规划方案,并利用“生态位”元胞自动机模拟了不同规划方案下城市的发展情景(1995～2005 年)。为了能够更好的定量评价不同规划情景下城市土地资源的利用效率,提出了土地利用生态位效益指数和生态位协调发展度指数,用来评价不同规划方案的合理性。模拟及评价结果表明:“可持续发展生态位”CA 模型模拟的结果具有最高的生态位效益指数和生态位协调指数,“农业生态位”CA 模型次之,“城市发展生态位”CA 模型再次之。随着城市的发展,无论是规划方案还是真实情景,生态

位效益指数和生态位协调指数大幅度下降,可能是城市的适宜发展空间已逐渐达到饱和,城市的继续扩展将会侵占大量宝贵的农业用地。

(4)在计算元胞的生态位适宜度时,其中,需求生态位的资源选择、各种资源要求的最低值、最高值及最优值的确定需要进一步完善和改进。这一系列值一般是由规划者根据经验和规划目标来确定,具有一定的主观性。因此,本文的模拟结果只是一种可能的"情景结果",它更多反映的是某种特定条件下的可能情况,具有不确定性,不是与城市实际发展情况充分接近的"预测结果",甚至有可能出现与实际发展相差甚远的情况。但是,与常用的 CA 模型相比较,"生态位"CA 模型在土地利用规划方面具有很大的优势。

References:

[1] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. Environment and Planning A, 1993, 25: 1175-1199.

[2] Batty M, Y Xie. From cells to cities. Environment and Planning B, 1994, 21: 531-548.

[3] Couclelis H. From cellular automata to urban models: New principles for model development and implementation. Environment and Planning B, 1997, 24: 165-174.

[4] Clarke K C, Hoppen S, Gaydos L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 247-261.

[5] Zhou C, Shun Z, Xie Y. Geographic Cellular Automata Study. Beijing: Science Press, 1999.

[6] Wu F. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16 (8): 795-818.

[7] Li Xia, Yeh A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16 (4): 323-343.

[8] Li Xia, Yeh A G O. Data mining of cellular automata's transition rules. International Journal of Geographical Information Science, 2004, 18 (6): 723-744.

[9] Li Xia, Yeh A G O. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. International Journal of Geographical Information Science, 2000, 14 (2): 131-152.

[10] Li Xia, Yeh A G O. Constrained cellular automata for modelling sustainable urban forms. Acta Geographical Sinica, 1999, 54 (4): 289-298.

[11] Ward D P, Murray A T. An optimized cellular automata approach for sustainable urban development in rapidly urbanizing regions. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 7 (6): 235-250.

[12] Grinell J. The niche relationship of the California thrasher. Auk, 1917, 21: 364-382.

[13] Elton C. Animal ecology: Aims and methods, London: Pitman, 1927. 264.

[14] Ouyang Z, Weisman J, Wang R. Ecological niche suitability model with an application in Taojiang land use planning. Journal of Environment Science, 1994, 6 (4): 449-456.

[15] Ouyang Z, Wang R, Fu G. Ecological niche suitability model and its application in land suitability assessment. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16 (2): 113-120.

[16] Odum E P. Fundaments of Ecology. Philadelphia P H. A. B. Saunders Company, 1971.

[17] Wu F. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12 (1): 63-82

[18] White R, Engelen G, Uijee I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 323-343

[19] Liu Y, Stuart R. Modeling urban development with cellular automata incorporating fuzzy-set approaches. Computers, Environment and Urban Systems, 2003, 27: 637-658.

[20] Wu F, Webster C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. Environment and Planning B: Planning and Design, 1998, 25: 103-126.

参考文献:

[5] 周成虎,孙战利,谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京:科学出版社,1999.

[10] 黎夏,叶嘉安. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟. 地理学报,1999,54 (4):289~298.

[15] 欧阳志云,王如松,符贵南. 生态位适宜度模型及其在土地利用适宜性评价中的应用. 生态学报,1996,16 (2):113~120.