

# FUTURES:一种新型区域城市增长模型

邓 婧<sup>1,2,3</sup>,唐文武<sup>2,3</sup>,刘润润<sup>1</sup>,郑新奇<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083;

2. 北卡罗来纳大学夏洛特分校地理与地球科学学院,北卡罗来纳州,美国 28223;

3. 北卡罗来纳大学夏洛特分校GIS科学应用中心,北卡罗来纳州,美国 28223)

**摘 要:**如何更好地进行城市发展模拟是发展中国家快速城市化过程中面临的一个科学问题。传统研究往往基于单体或组合模型,不能为决策方案提供直接支持。本文介绍了国外一个新的城市发展模型FUTURES(FUTure Urban-Regional Environment Simulation)。该模型不仅考虑了城市发展区动态适宜性梯度计算、人均土地消耗的趋势分析以及基于空间位置的斑块变化可视化模拟,而且注重模块间的动态交互反馈过程,形成了独有的深度耦合机制,模型结构紧密又不失灵活性。基于高性能计算环境支持,该模型已经在美国北卡罗来纳州的多个区域进行实验并取得成功。本文主要介绍该模型设计思想、模型组成、关键建模方法,并总结了模型的主要优势,以期为我国城市发展模拟研究提供借鉴。

**关 键 词:** FUTURES模型;城市增长模拟;景观生态效益;动态适宜性;斑块增长算法

doi: 10.3724/SP.J.1033.2013.00041

## 1 引言

土地利用变化研究是土地资源可持续利用的支撑性研究,对于城市发展、人类环境变化研究有着重要支撑意义。由于土地变化驱动因素的多样性,人类活动的难以预测性,以及人与自然的交互影响等,土地利用系统具有复杂性特征,模拟土地利用动态变化过程已成为相关研究的难点和热点(Brown et al, 2005; Li et al, 2010; 于兴修等, 2004; 何春阳等, 2002)。土地利用变化模型是人们学习和理解土地利用系统的重要工具,对于人们分析土地变化的前因后果,进行土地利用规划相关政策制定具有重大意义。前人建立的土地利用变化模拟模型,从不同角度和侧重点对土地利用活动进行分析。根据建模目的不同,可分为描述性土地利用变化模型和土地利用优化模型(Verburg et al, 2004)。描述性土地利用变化模型用于预测未来短期内的土地利用发展模式;土地利用优化模型则根据一系列目标设置,找到最能满足目标的配置模式,从而优化土地利用结构。根据专业背景的不同,土地利

用变化模型又包括城市模型(Miller et al, 1999)、林地退化模型(Kaimowitz et al, 1998)、土地经济模型(Bockstael et al, 2001; 沈体雁, 2006)、土地生态环境模型(杨培峰, 2004)、土地社会学模型(人地相互关系模型)(Agarwal et al, 2002)等。学科交叉和综合研究的趋势使得土地利用变化模型得到了更加广泛的应用,相关研究试图从社会、自然、经济等各个角度和不同层面把握人类活动对土地利用变化的影响,丰富了土地利用变化模型库(田光进等, 2008; 裴彬等, 2010)。

当前,有更多的模型开始重视土地利用变化趋势对城市形态和景观破碎度的影响。相关研究表明,景观格局的改变,包括斑块的大小、形状和连通性的改变,可能会通过干扰能量和物质的交换而显著影响生态过程(Radeloff et al, 2005; Irwin et al, 2007; Alberti, 2005)。在土地利用和开发过程中,人类活动往往会对景观格局造成较大影响。城市化过程则通过改变景观格局的空间结构,影响生态系统服务供给(Alberti, 2010)。因而,此类研究对生态变化和可持续发展研究具有重要意义。

收稿日期:2012-08; 修订日期:2012-12.

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201111014);美国 Renaissance Computing Institute (RENCI), the National Science Foundation ULTRA-Ex Program (BCS-0949170)。

作者简介:邓婧(1987-),女,博士研究生,主要从事土地信息系统、复杂系统模拟与高性能地理计算等研究。

E-mail: jdengl@uncc.edu

通讯作者:郑新奇(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事GIS开发与应用、土地评价与规划、土地集约利用、空间数据挖掘、复杂系统仿真等研究。E-mail: zxqsd@126.com

然而,如何重现区域城乡系统景观变化的内在动态性和空间结构仍然是土地利用变化模拟的难点(Pontius et al, 2001)。克拉克等人曾断言,当模型能够从局部到景观尺度上模拟土地利用变化的现实空间结构时,才可能正确预测土地利用动态变化的社会生态效应(Herold et al, 2005)。为了更好地模拟空间形态的影响,北卡罗来纳大学夏洛特分校 GIS 应用研究中心开发了 FUTURES(FUTure Urban-Regional Environment Simulation)模型(Meentemeyer et al, in press),旨在通过自下而上的元胞层次的状态变化,带动宏观尺度的涌现现象,重现景观空间格局的变化过程和空间结构特征,从而研究土地利用变化过程的生态效应。目前该模型体系处于初步应用阶段,针对北卡罗来纳州南部夏洛特大都市区域 11 县,西部阿西维尔山区 4 县和科研三角区 17 县进行了建模实践及研究分析。本文主要介绍 FUTURES 的组成结构和基本原理,分析模型的特征及应用流程。关注该模型最初的开发目标,从而为我国土地利用变化模拟的相关研究提供参考。

2 FUTURES 模型原理

FUTURES 是一个多层次、可通用、可扩展的区

域城市扩张的建模框架,其核心模型属于描述性土地利用变化模型。FUTURES 基于自下而上的元胞自动机(Cellular Automata, CA)进行模拟,将研究区域分割成规整的网格元胞,通过微观层面元胞的状态转换,模拟土地利用状态的变化,转换概率取决于适宜性分值,通过相关图层的回归分析计算得到。结合面向对象思想,该模型将离散的开发斑块看作独立的土地开发事件,在每一次迭代的初始状态随机散播一定数量的“种子”,即土地开发事件,存活的种子进入下一步斑块生长阶段,通过经验和假设的参数来控制这些斑块的生长结构特征,使得模拟在景观层面上更接近现实扩张过程。在种子淘汰过程和元胞转换概率计算中引入一定的随机变量,以模拟现实世界的不确定性因素。

FUTURES 由 3 个子模型耦合而成(图 1),分别对应土地利用变化过程的关键驱动:人均用地需求、适宜性和土地转换事件发生的空间结构。需求子模型用于分析人均用地需求及其增长,从数量上把握土地开发的趋势。潜力子模型主要用于分析区域土地开发的驱动因素,并计算得到各驱动因素的影响系数,从而得到土地开发的概率图层;该模块回答了这样一个问题,即什么空间位置上得到开发的可能性更高。区域发展模拟子模型则对应发展过程的具

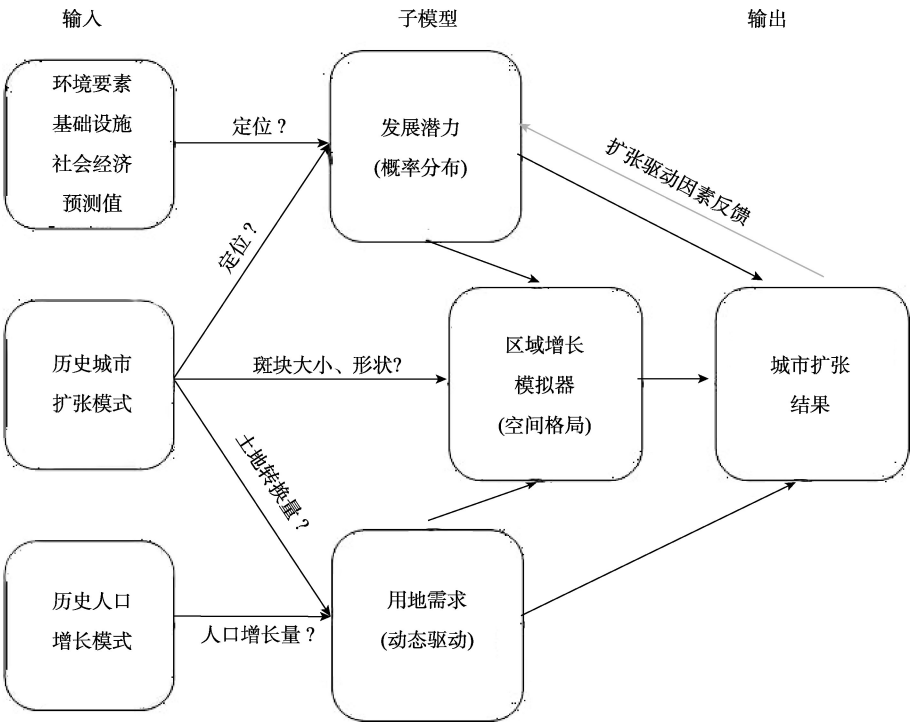


图 1 FUTURES 模型结构关系图

Fig. 1 FUTURES Model structure

体模拟,在此过程中综合考虑了定性的规则以及人类行为的随机性。

## 2.1 DEMAND:人均发展用地需求子模型

该子模型用于预测和量化不同区域的人均发展用地消耗。以历史人口和土地开发数据为基础,构建人口发展和用地需求之间的统计关系,从而推算未来某一时间点的人口数量和用地需求。描述性方法或统计方法均能用于构建人均消耗模型,而且可以针对不同的人口层级尺度。预测模型可采用 logistic 回归模型、灰色预测模型、加权平均增长法等。具体的统计模型参数可以根据政策或需求进行调整,例如模拟人口高增长和土地高消耗情形。该子模型的输入为历史人口及土地发展数据;输出为预测年的人口及土地开发需求。

## 2.2 POTENTIAL:发展潜力子模型

该子模型用于量化区域的土地开发可能性及潜力的空间梯度。主要基于多层次的社会经济要素、基础设施和环境要素,利用空间叠加分析和统计推断方法,得到对土地开发有显著驱动和影响因素图层;然后构造基于栅格单元的土地开发潜力公式,得到位置适宜性模型。叠加分析过程依赖专家知识来初步遴选可能影响土地开发利用的相关图层数据,然后用统计方法来量化变量变化和土地开发之间的关系。根据区域研究的需要,可以采用多层统计分析模型来拟合土地利用系统的层次性特征(Verburg et al, 2004)。在 FUTURES 模型中,层级是通过子区域划分和定义的,可以是一个社区单元,或是县、市等行政单元。对这一子模型继续深化,也可根据时间步长构建时空模型,创建多层潜力曲面,以提高时空模拟的精度和效率。各个元胞开发潜力的计算如公式(1)所示。

$$Y = \alpha_i + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} X_j \quad (1)$$

其中: $i$ 为子区域的编号; $Y$ 为具体元胞的开发潜力值; $\alpha_i$ 为 $i$ 区域的回归模型的截距; $\beta_{ij}$ 为 $i$ 区域的第 $j$ 个变量的回归系数; $X_j$ 为第 $j$ 个变量图层的具体值。

## 2.3 RGS:区域增长子模型

区域增长模拟器(Regional Growing Simulator, RGS)是一个模拟引擎,该子模型基于前两个模型的运行结果,以动态、空间显性的方式模拟城市扩张。该子模型的核心是斑块增长算法(Patch Growth Algorithm, PGA),它是一种基于元胞自动

机的随机性模拟方法,通过迭代式的选址和环境感知的区域生长机制,将合适的元胞从“未开发”状态变为“已开发”状态,来模拟土地开发的时间次序和空间范围。每一步迭代运算结果会反馈给全局转换概率的计算,从而影响下一代步骤的斑块生长过程。经过一定的迭代步数后,这些转变为开发状态的元胞,在宏观层面上组成了有一定大小和形状特征的斑块。将这些斑块的生长看成独立的土地开发事件,开发对象的选址决策和斑块配置则作为随机性要素输入算法中(Gagné et al, 2011),并通过元胞层面的转换来控制离散斑块的大小、形状和离散程度。模型的应用结果如图2所示。

# 3 FUTURES 工作流程

## 3.1 整体实现步骤

FUTURES 模型的具体实现主要步骤包括:①基础数据及基本图层准备;②变量遴选;③回归模型构建;④斑块演化模拟;⑤模型参数调试;⑥模拟预测。在变量挑选阶段,分析与城市扩张相关的影响因素,以此为指导搜集实证观测数据;之后构建回归模型,在统计最优层面上得到变量关系,用潜力子模型构建城市增长的概率分布图层;最后编辑参数配置文件,用 PGA 进行演化模拟,实现自下而上的土地利用过程。模型工作流程整体框架体系如图3所示。

## 3.2 参数制备

配置参数作为模型输入来影响或控制模型运行过程,FUTURES 参数主要包括3种:①图层参数;②情景参数;③控制参数。图层参数主要用于在潜力子模型中构建开发概率曲面,是通过统计模型遴选出的对区域土地利用变化有显著影响的图层及其回归系数,用于表征各图层对土地利用变化影响的强弱和方向。情景参数用于设置不同的情景以进行模拟实验,例如“人口增长”和“土地开发”参数,除了根据现实数据进行趋势预测,还可以人为进行控制调整,情景模式会从宏观层面以自上而下的形式影响模型的运行。控制参数则侧重于具体的模拟过程,通过元胞自动机以自下而上的方式实现模拟算法,集中在区域增长模拟子模型中,包括斑块的形态结构分布、种子的筛选过程等。图层参数和控制参数用来确保模型能够把握历史演化



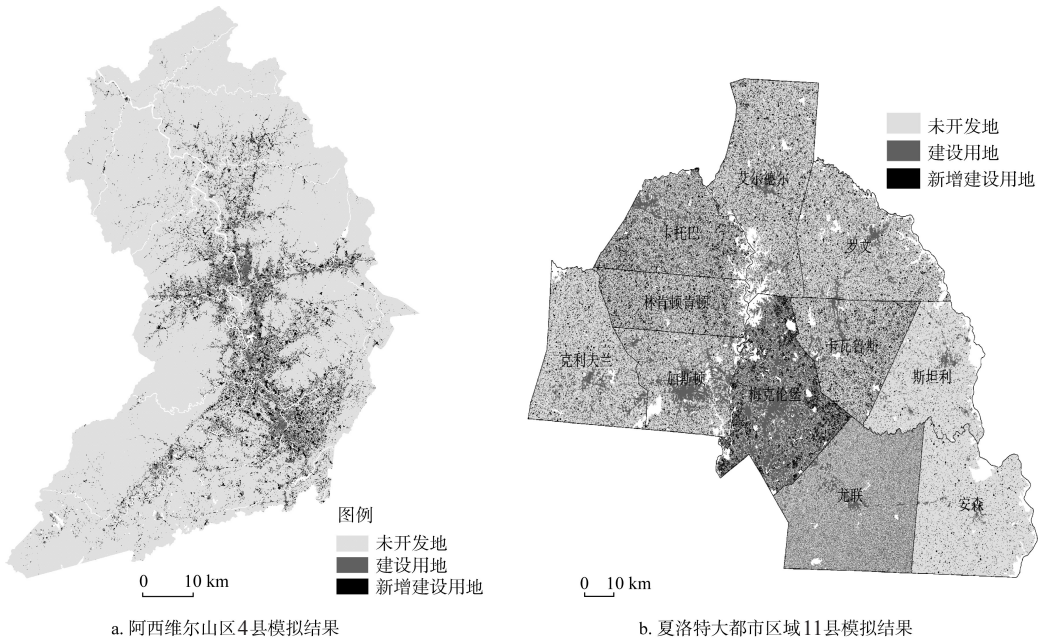
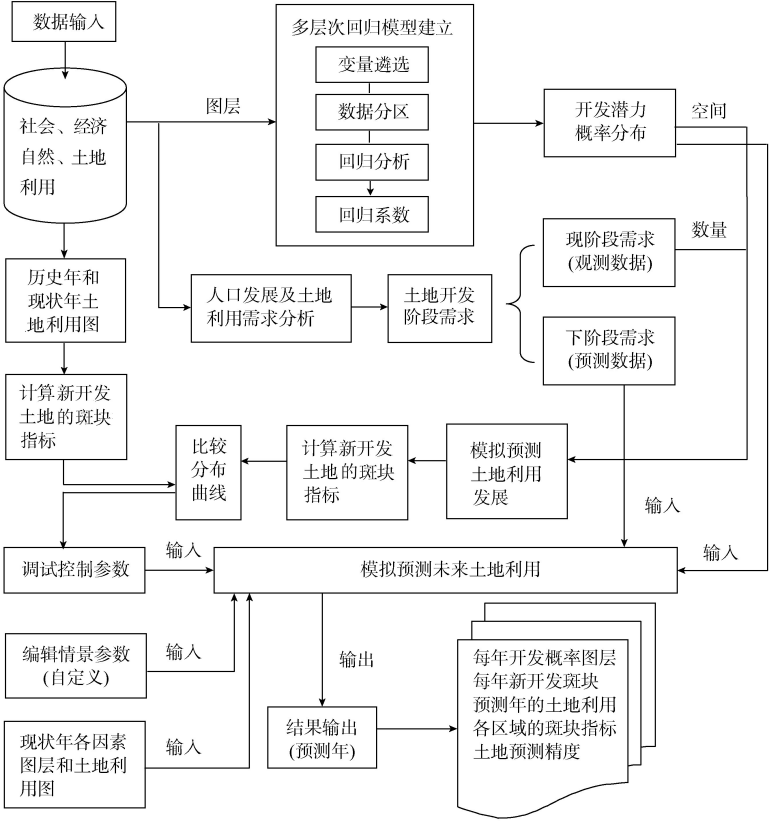


图2 美国案例研究  
Fig. 2 Case studies in America



注：模型至少需要两期数据，第一期为历史年数据，第二期为现状年。输出结果为预测年。

图3 模型应用总体流程图  
Fig. 3 Flow chart of model application

规律,从而保证历史状态的延续;情景参数则用来加入人为的发展控制,预测政策规划等的影响,也可反演出不同发展模式,例如紧缩型精明增长、离散式随机发展等。FUTURES用到的参数参考表1。

3.3 模型校正

模型的校正和调试是建模的一个重要环节,该过程旨在通过调整参数,提高模型预测精度,使预测结果更为合理、更接近现实情况。同时模型的校正也是一大难点,其复杂性取决于土地模型本身的结构复杂性。

FUTURES模型的校正和调试以提高预测开发地块的位置精度和形态精度为目标,并且位置精度控制和土地开发格局的控制是分别进行的,以保证在一定位置上土地开发事件能产生相似的增长形态。位置精度,即斑块应该出现在什么地方,通过回归模型的系数调试来控制。形态精度,即斑块应该呈现什么形态和尺寸,主要通过3个参数,即“斑

块均值”、“斑块值域”和“折扣因子”的调试来控制。整个过程利用遗传算法控制参数的优选;通过计算全局斑块的形状指标(Shape Index)的分布直方图和观测数据之间的区别,作为评价和反馈;并且在高性能计算平台上运行,实现了整个流程的自动化,能够高效遴选出优秀的参数组合,得到接近现实发展特征的预测结果。

4 模型优势及特征分析

FUTURES模型的方法和平台具有一定的先进性,对于土地需求迫切、城市快速扩张且开发事件离散程度较高的地区,有较好的预测结果。

4.1 操作简便灵活

要应用这一套建模流程,仅需按照参数配置参考表准备好需要的数据。所有图层参数的数据要求处理成ArcGIS所支持的ASCII文件格式,然后把

表1 参数制备参考表  
Tab. 1 Parameters preparation

子模型	参数		数据描述	年份
开发潜力	动态	开发压力	在搜索领域范围内的已开发栅格的数量,以距离为权重	历史年至预测年 动态更新
		环境		历史年、现状年
		农用地和林地		历史年、现状年
	基础 设施	开放空间	生态保存地	历史年、现状年
		地形地貌	包括高程图和坡度图层	现状年
		水文	距水体的距离	历史年、现状年
		可达性	距道路的距离	历史年
			距高速路交叉口的距离	
			道路密度	
			交通耗时	
	社会 经济	市政中心	距市政中心距离	历史年
		水体及水利设施	距水体距离	历史年
		年龄及收入	人口年龄结构、收入结构及分布	历史年
开发需求		工作吸引	距离城市中心的距离,将提供的工作数量作为加权	历史年
		人口增长	历史人口增长及预测	多年期历史数据及 现状年数据
		土地开发	历史土地开发及预测	多年期历史数据及 现状年数据
区域增长模拟		斑块大小	组成斑块的元胞的个数	历史年、现状年
		斑块紧凑度	控制每个新开发斑块形态复杂性	历史年、现状年
		激励因子	控制开发概率曲面的幂转换,用于进行不同紧凑度的开发模拟实验	
		时间步长	模拟期间的时间间隔	
		随机性	控制重新分配开发中心的程度	

相应数据放到指定的文件夹下,最后修改配置文件里的相应数据路径和其他控制参数,即可运行模型。数据的精度根据研究目标决定,可以针对宏观数据进行准备,也可从更微观层面上准备数据。

#### 4.2 多层次对象协同计算

该模型考虑了土地利用变化的区域异质性和多尺度特征,可以面向不同的层次进行模拟分析。当整体研究区域范围较大时,不同的子区域特征会有所差异。FUTURES可以针对全局进行建模,也可以分区建模,具体差别在于回归模型的构建分别对应全局回归建模和多层次回归建模。针对区域发展的形态特征,也提供区域的控制参数设置,从而影响区域斑块生长的大小和形态。

#### 4.3 数量、位置、形态同时兼顾

多方面控制和保障城市增长的模拟精度。首先,该模型通过需求子模型保障了数量精度,元胞转换的数量与实际需求相一致;其次,在潜力子模型中,利用回归拟合,寻找统计最优的拟合模型,从而保障位置精度;最后,从景观层面上保障城市发展斑块的形态分布与实际情况相符合。

#### 4.4 直接服务决策方案编制

通过情景参数的设置,可以进行模拟实验,得到不同人均需求情形下的发展状况。同样,也可以通过修改图层参数进行实验,例如修改生态保护用地分布,模拟不同保护用地政策下的城市发展对景观格局的影响。

#### 4.5 运行于高性能计算环境

FUTURES模型是通过shell脚本将模型运行和具体分析步骤串联起来,并且将多次独立的重复运算提交到高性能计算集群上实现的。高性能计算的支持使得该模型可张可弛,可以支持更大尺度、更大数据量的建模和微观尺度上的细节模拟。例如一个完整省级行政辖区范围的精细模拟(50 m×50 m)可以在半小时内完成计算,这种计算效率对于复杂模型的实现有很强的优势,是普通模型难以比拟的。

#### 4.6 方便的可扩展接口

该模型的可扩展性主要体现在两方面:一是研究的对象可拓展,不仅在时空层面上可以增大,增加时间切片数量、增大研究区域,还可增加影响因素图层;二是模型本身的方法体系可拓展,例如采用多元回归,或者当线性回归模型并不能很好地拟合研究区域影响因素时,可以采用决策树、神经网络

等非线性模型进行处理。需求子模型中,可以用线性拟合或者其他拟合方式去预测人均用地消耗。

## 5 结论与展望

FUTURES通过3个子模型,耦合了城市区域动态适宜性梯度计算、人均土地消耗趋势分析以及基于空间位置的斑块变化模拟。模型注重模块间的动态交互反馈过程,子模型的阶段性模拟结果会反馈给其他子模型,或是接着作为本子模型的输入数据,使模型处于自动更新和反馈平衡的状态,深化了动态性建模方式。这种独有的深度耦合机制使得模型结构紧密又不失灵活性。FUTURES重视微观层面的细微变化,并且切换尺度去分析问题,关注宏观层面的聚集涌现效应,适合模拟土地开发的空間形态结构和景观影响。同时,高性能地理计算的应用,大大提高模型运行效率,增加了模型的可实验性。

目前,该模型架构还在不断的完善之中,同时也在拓展应用领域。模型本身也需要进一步改进。主要努力方向包括:集成更多统计分析功能,增强适宜性评价的动态性互动反馈;增加非线性方法,如将遗传算法、智能体模型等模型引入转换规则的控制过程;从数量、结构、布局、形态、强度、功能、需求等多目标进行模型调试和优化等。

将FUTURES模型应用于中国案例需注意模型参数的调整。现阶段的模型参数均适用于美国城市快速离散式发展的案例。根据中国城市发展模式,需要引入更多的控制参数,来模拟更显著的区域差异性和更复杂的政策情景。相信FUTURES模型的引入将促进国内相关研究的深化,为我国城市发展规划提供一定的决策参考;并且随着模型的进一步完善和优化,FUTURES会有更广阔的应用前景。

## 参考文献(References)

- Agarwal C, Green G M, Grove J M, et al. 2002. A review and assessment of land use change models: Dynamics of space, time, and human choice [EB/OL]. Bloomington and South Burlington: Center for the Study of Institutions, Population, and Environmental Change, Indiana University and USDA Forest Service [2012-05].
- Alberti M. 2005. The effects of urban patterns on ecosystem

- function. *International Regional Science Review*, 28(2): 168-192.
- Alberti M. 2010. Maintaining ecological integrity and sustaining ecosystem function in urban areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(3): 178-184.
- Bockstael N E, Irwin E G. 2001. Economics and the land use-environment link//Tietenberg T, Folmer H. *The International Yearbook of Environmental and Resource Economics 2000/2001: A Survey of Current Issues*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing: 1-54.
- Brown D G, Page S, Riolo R, et al. 2005. Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2): 153-174.
- Gagné S A, Fahrig L. 2011. Do birds and beetles show similar responses to urbanization? *Ecological Applications*, 21(6): 2297-2312.
- He C Y, Chen J, Shi P J, et al. 2002. Study on the spatial dynamic city model based on CA(Cellular Automata) model. *Advance in Earth Sciences*, 17(2): 188-195. [何春阳, 陈晋, 史培军, 等. 2002. 基于CA的城市空间动态模型研究. *地球科学进展*, 17(2): 188-195.]
- Herold M, Couclelis H, Clarke K C. 2005. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(4): 369-399.
- Irwin E G, Bockstael N E. 2007. The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52): 20672-20677.
- Kaimowitz D, Angelsen A. 1998. *Economic Models of Tropical Deforestation: A Review*. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research.
- Li Y, Ye J H, Chen X H, et al. 2010. Transportation characteristics change under rapid urban expansion: A case study of Shanghai. *Chinese Geographical Science*, 20(6): 554-561.
- Meentemeyer R K, Tang W W, Dorning M, et al. In press. FUTURES: Multilevel simulations of emerging urban-rural landscape structure using a stochastic patch-growing algorithm. *Annals of the Association of American Geographers*.
- Miller E J, Kriger D S, Hunt J D. 1999. TCRP Web Document 9: Integrated Urban Models for Simulation of Transit and Land-Use Policies: Final Report, University of Toronto Joint Program in Transportation and DELCAN Corporation, Toronto.
- Pei B, Pan T. 2010. Land use system dynamic modeling: literature review and future research direction in China. *Progress in Geography*, 29(9): 1060-1066. [裴彬, 潘韬. 2010. 土地利用系统动态变化模拟研究进展. *地理科学进展*, 29(9): 1060-1066.]
- Pontius R G J, Cornell J D, Hall C A S. 2001. Modeling the spatial pattern of landuse change with GEOMOD2: Application and validation for Costa Rica. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 85, 191-203.
- Radeloff V C, Hammer R B, Stewart S I, et al. 2005. The wildland-urban interface in the United States. *Ecological Applications*, 15(3): 799-805.
- Shen T Y. 2006. China urban future simulation: An integrated framework of CGE and GIS. *Advances in Earth Science*, 21(11): 1153-1163. [沈体雁. 2006. CGE与GIS集成的中国城市增长情景模拟框架研究. *地球科学进展*, 21(11): 1153-1163.]
- Tian G J, Wu J G. 2008. Simulating land use change with agent-based models: progress and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 28(9): 4451-4459. [田光进, 邬建国. 2008. 基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展. *生态学报*, 28(9): 4451-4459.]
- Verburg P H, Schot P P, Dijst M J, et al. 2004. Land use change modelling: Current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4): 309-324.
- Yang P F. 2004. The research on the capacity mechanism of city space expanding and its ecological model. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 27(3): 138-142. [杨培峰. 2004. 城市空间拓展动力机制及生态模型. *重庆大学学报: 自然科学版*, 27(3): 138-142.]
- Yu X X, Yang G S, Wang Y. 2004. Advances in researches on environmental effects of Land Use/Cover Change. *Scientia Geographica Sinica*, 24(5): 627-633. [于兴修, 杨桂山, 王瑶. 2004. 土地利用/覆被变化的环境效应研究进展与动向. *地理科学*, 24(5): 627-633.]



# FUTURES: A new regional urban growth simulation model

DENG Jing<sup>1,2,3</sup>, TANG Wenwu<sup>2,3</sup>, LIU Runrun<sup>1</sup>, ZHENG Xinqi<sup>1</sup>

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Department of Geography & Earth Sciences, University of North Carolina at Charlotte, NC 28223, USA;

3. Center for Applied GIScience, University of North Carolina at Charlotte, NC 28223, USA)

**Abstract:** It is a critical scientific challenge to better simulate urban growth, especially for the regions undergoing rapid urbanization in developing countries. Conventional methods based on single or integrated models, however, can not provide direct support for decision-making. This paper introduces a new urban growth simulation model—FUTURES(FUTure Urban-Regional Environment Simulation). The model was developed by UNC Charlotte Center for Applied GIScience (CAGIS). FUTURES not only considers the gradient calculation of dynamic suitability for urban growth, analysis of the trend of per capita land consumption, and visual simulation of patch changes based on spatial locations, but also focuses on the feedback process of dynamic interactions between modules, thus forms a unique insightful coupling mechanism, and model structure is compact and flexible. A number of experiments have been executed in a high performance computing environment for several study areas of North Carolina, USA. This paper mainly describes the model design, model composition, and key modeling methods, and summarizes the characteristics and advantages of this model. This review provides a reference for urban growth simulation research in China, which will be meaningful and helpful for promoting related research from another point of view.

**Key words:** FUTURES model; urban growth simulation; ecological effects; dynamic suitability; patch growth algorithm