

城市生态系统的动力学演化模型研究进展

郁亚娟 郭怀成* 刘 永 黄 凯 王 真

(北京大学环境学院 北京 100871)

摘要 :从系统分析出发 ,对城市生态系统的动力学演化模型的发展历程、建模的方法和步骤过程、软件开发方法和目前的模型软件等进行了总结。归纳了城市生态系统的动力学演化建模的方法 ,主要包括模型定义、模拟、实现、验证、分析和应用等六大步骤。目前国内外用于城市生态系统动力学演化模型的主要方法有 :基于数理模型的方法、生态控制论和灵敏度模型、系统动力学模型、多目标规划法等。已经开发的用于城市生态系统的动力学模拟的软件可以划分为两类 :基于土地利用和交通规划的专业模型和基于系统动力学和灵敏度模型的一般软件。总结了常用的城市演化模型软件 ,讨论了模型的研究对象和应用范围。分析了城市生态系统的动力学演化模型建模的不确定性的来源 ,并指出 :向宏观和微观两极化发展是城市生态系统动力学演化模型的发展趋势之一 ,而与人工智能和地理信息系统等新方法的集成是发展的另一趋势。城市生态系统动力学演化模型的开发前景在于对不确定性问题的定性、定量分析 ,而多模型的耦合和集成是发展的必然趋势。

关键词 动力学演化模型 城市生态系统 不确定性

文章编号 :1000-0933 (2007)06-2603-12 中图分类号 :Q141 ,Q147 ,X21 ,TU984 文献标识码 :A

On the progress in urban ecosystem dynamic modeling

YU Ya-Juan , GUO Huai-Cheng* , LIU Yong , HUANG Kai , WANG Zhen

College of Environmental Sciences , Peking University , Beijing 100871 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (6) 2603 ~ 2614.

Abstract :This paper presents a comprehensive literature review on the progress in Dynamic Urban Ecosystem Modeling (DUEM) , summarizing various perspectives such as the history , method , procedure , and software development and availability that are pertinent to the urban ecosystem modeling area. DUEM represents a multi-disciplinary research area , which covers many related scientific disciplines including landscape ecology , urban demography , sociology , urban planning , environmental planning , environmental economics , disaster prevention science , urban hygiene , and public health. The history of the DUEM area can be traced back to the 19th century when researchers started to study the process of urban expansion and evolution. Since then , researchers throughout the world have developed a wide range of modeling approaches to help understand the dynamics and evolution of urban ecosystems. Before 1960s , the ecological and environmental aspects of urban development have rarely been considered in an urban system modeling study. This trend started to change in 1960s , which was manifested by the fashion of developing comprehensive urban ecosystem models that simulate not only the social-economic but also the ecological and environmental components in urban systems.

Based on the difference in mathematical formulation and system representation , all the existing urban ecosystem models

基金项目 国家重点基础研究发展计划 (973)资助项目 (2005CB724205)

收稿日期 2006-06-08 ;修订日期 2006-12-18

作者简介 郁亚娟 (1978 ~) ,女 ,江苏南通人 ,博士生 ,主要从事环境规划与管理研究. E-mail :pkuyuyj@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :hcguo@pku.edu.cn

致谢 感谢美国 Rui Zou (Tetra Tech Inc)博士对本文写作给予的帮助

Foundation item :The project was financially supported by National Basic Research (973) Program Project , China (No.2005CB724205)

Received date 2006-06-08 ;**Accepted date** 2006-12-18

Biography :YU Ya-Juan , Ph. D. candidate ,mainly engaged in environmental planning and management. E-mail :pkuyuyj@126.com

can be roughly classified into four broad categories : (1) mathematical mechanistic models ; (2) eco-cybernetics based sensitivity models ; (3) system dynamics model ; and (4) multi-objective models. In addition to these four branches of methods , other types of modeling approaches such as the ecological footprint method , the scenario analysis method , and the entropy-based approach have also attracted wide attentions from researchers. Despite of their difference in appearance , all these modeling methods follow a same general procedure , which involves six steps including model definition , model formulation , computer realization , calibration/validation , model performance evaluation , and model application.

Since the day researchers began to research the possibility of using mathematical models to study urban systems , numerous modeling systems have been developed. Some of these models are developed through direct computer programming with general computer languages , and the others are developed using popular simulation and optimization software packages such as the VENSIM , STELLA , DYNAMO , and Matlab's Simulink toolbox. Table 1 in the present paper lists a number of the most widely applied urban ecosystem models along with information regarding their developers and applicability.

This paper further addresses the issue of uncertainty in urban system modeling , indicating that an urban system modeling is always subjected to uncertainty originated from the entire model development and application process. Due to the significant implication of uncertainty , it is proposed that special efforts need to be dedicated to improve the capability of handling model uncertainty in a DUEM study. Finally , this paper summarizes potential research directions for the DUEM area , suggesting that technologies and methods need to be extended to both macro and micro scales to achieve further advancement in this area. In addition , to develop hybrid approach through integrating advanced artificial intelligence technologies and geographical information systems might offer another promising way for model improvement.

Key Words :dynamic modeling ; urban ecosystem ; uncertainty

从动力学角度来看 ,城市生态系统是一个动态平衡状态的系统 ,也是一个与周围市郊及有关区域紧密联系的开放系统 ,它不仅涉及城市的自然生态系统 ,如空气、水体、土地、绿地、动植物、能源等 ,也涉及城市的人工环境系统 ,如经济系统、社会系统等 ,是一个以人的行为为主导 ,自然环境为依托 ,资源流动为命脉 ,社会体制为经络的社会-经济-自然的复合系统^[1]。城市生态系统内各个子系统的演化表现为一系列演化状态的集合 ,而城市生态系统的动力学过程就是这些状态的连续转移过程 ,是一个系统的复杂演化过程^[2]。城市高度非均匀的空间结构、时间序列特征与其高度有序的动力学过程紧密耦合。因此 ,要对城市生态系统进行建模 ,就需要综合考虑这一特殊生态系统的各个方面 ,并对它的各变量本身与变量之间相互作用的参数进行理论方面和操作层面的研究。

由于城市生态系统本身的非线性和复杂性 ,因此对于城市生态系统的动力学演化模型研究 ,多个领域的专家学者都从本学科出发 ,形成了一系列的成果 ,目前涉及到的领域主要有 :景观生态学、城市人口学、社会学、城市规划学、环境规划学、环境经济学、城市灾害预防和卫生科学等。城市生态系统作为一个复杂系统 ,不可以分解和还原成某一部分 ,因为任何一个部分都会通过迭代和反馈彼此不断相互包容而成为了城市生态系统的整体 ,系统的每一个细节的实施、改变都有可能对整个城市产生难以估量的影响。而上述各领域的研究反映了城市生态系统的某些方面和特征 ,这些成果对于城市生态系统动力学模型的发展起到了很好的推进作用 ,但它们却不能综合完整的体现城市生态系统的动力学全过程 ,带有诸多不确定性 ,可以说 ,它们的研究对象是城市生态系统的各种子系统 ,所以 ,迫切需要有更多的学者参与到这一复杂系统动力学演化模型的研究中去。本文拟在总结城市生态系统动力学模型的发展历史、建模方法、常用模型和软件的基础上 ,分析城市生态系统动力学演化模型不确定性的来源 ,并指出城市生态系统动力学的发展趋势 ,为城市规划和管理者提供必要的决策支持和理论参考。

1 城市生态系统动力学演化模型方法

早期的城市生态系统动力学演化模型是基于城市土地利用模型而发展的 ,从 19 世纪末期到 20 世纪 80

年代,东西方学者普遍认同的城市演化模型对象仍主要倾向于土地利用的动力学过程^[3]。当时的研究热点为城市生态演替的动力学说,主要是基于城市规划的需要而产生的,常见的理论包括城市发生学、引力理论、空间扩展论、中心地理论、生态位势理论等。这些理论及相应的模型以城市土地利用的动力学过程为主要研究对象,把与此相关的社区、就业、贫富人口分布等作为影响城市土地利用的因素,而不是将它们看作城市生态系统内的子系统^[4],因此这种模型对城市生态系统的模拟难免流于片面和不足。

虽然城市生态系统是一个人工生态系统,但它也具有一般自然生态系统的某些基本特征,比如,它也是一个自组织系统,在一定的生态阈值范围内,具有自我调节、自我维持稳定、自我发展、以及一定的自我修复机制和功能。这个复杂系统在人口社会与环境、环境与经济、社会与经济^[5]等多重相互关系作用下所产生的城市内在发展的驱动动力,对城市生态系统的动力学过程产生积极的作用^[6]。因此,城市生态系统动力学演化模型,就是利用生态学中的理论和方法,并应用系统论、控制论和计算机科学等现代化技术,对城市的组合与分布、结构与功能、城市发展的动力学机制、城市系统的调节与控制进行研究,并将其用于城市的规划、建设和管理中,最终实现城市可持续发展。

虽然不同的文献^[7~9]对于城市生态系统动力学演化模型的过程不完全一致,但它们都可以归结为以下 6 个主要步骤(见图 1),依次为:

- ①定义 确定系统的组成和边界,辨识、抽提、模拟城市生态系统的时间、空间特性,画出概念框图;
- ②模拟 系统内部各变量的数学和逻辑表达,系统与外部的关联关系表达,系统内部和外部过程的数学表达,系统参数的确定等;
- ③实现 模型的程序或软件实现,可以用程序语言,如 C++、Basic、Fortran、MATLAB 等实现编程,也可以在 VENSIM、STELLA 等视窗软件界面下实现建模;
- ④验证 模型构建完成后,必须进行有效性验证和灵敏度分析,确保模型的合理性、可操作性和稳健性;
- ⑤分析 应用随机分布、Monte-Carlo 模拟、Kriging 插值、拉丁超立方抽样等方法,对模型参数进行估计和校正以及验证^[10],分析模型不确定性产生的原因,提出解决方案;

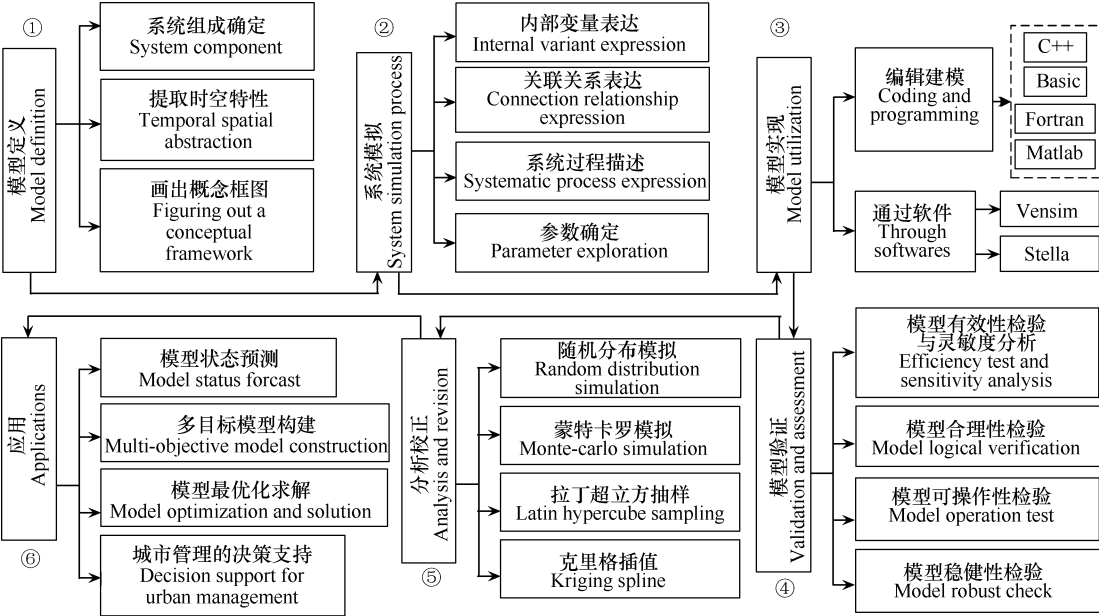


图 1 城市生态系统动力学演化模型的主要步骤

Fig. 1 The main steps of Dynamic Urban Ecosystem Modeling (DUEM)

⑥应用 用多元回归分析、神经网络、专家系统等方法进行模型状态预测,构建模型最优化的多属性、多判据、多目标函数,并用多目标模型或遗传算法、模拟退火算法等方法求解,将模型结果应用到实践工作中指

导规划,为城市建设决策者提供辅助决策支持等。

2 模型发展回顾

从 19 世纪以来,人们从不同角度建立了许多模型来揭示城市扩展、演化的动态机制。由于模型类型众多,模型发展的时间尺度也较长,而且,不同国家、不同学科的研究者们关注的重点和研究的切入点也不尽相同,因此划分模型类型的标准也有很多种,可以根据模型的建模原理划分,也可以根据模型的发展阶段划分。

2.1 根据建模原理划分

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,可以将城市生态系统演化模型划分为以下几个类型:静态结构模型、简单数学模拟模型(线性和非线性模型)、系统动力学模型、人工智能模拟模型。这些模型也反映了由远及近不同历史时期,人类对城市动力学过程的认识水平和建模水平^[11]。其中,随着计算机科学的发展而产生的人工智能模拟-预测-优化模型近年来在城市生态系统动力学演化模型中得到了巨大的发展。

2.2 根据发展阶段划分

城市生态系统演化模型的发展阶段,以是否考虑生态环境因素作为分界点,可以划分为早期的城市演化模型阶段和当代的城市生态系统动力学演化模型阶段等两个阶段。

(1) 城市演化模型阶段(20 世纪初到 1960 年代)

1915 年英国生态学家 Geddes 出版《进化中的城市》,标志着人类对城市动力学演化研究的开端。1920 年代芝加哥 Burgess^[12]等研究城市的演替、空间分布、社会结构和调控机理,已经将城市的演化、即城市的动力学演化特征,作为城市问题研究的重点。格瑞-劳利模型是城市空间相互作用模型中的典型代表^[13]。但是,格瑞-劳利模型只考虑了居住地、服务地、人口分布、经济、服务市场等因素,没有将生态和环境^[14]因素单独考虑进去,而且没有考虑时间轴因子^[15]。韦格勒^[16]将交通、人口、雇员等城市子系统模型联系起来,建立了 Dortmund 模型,具有时间维特征,但模型中的时间因子是离散的时间阶段概念,不是连续的时间序列。

严格说来,这一阶段的模型都只能称为城市动力学演化模型,而不是城市生态系统动力学演化模型,因为它们普遍关注土地利用和人口特征,却忽略了城市作为生态系统这一显著特点,这和环境科学发展的时代背景也是有关的^[17]。上述模型对于生态环境因素的考虑不足是限于当时的时代背景,而对时间序列的忽视或考虑不周,客观上也是由于当时的计算机发展水平所限。

(2) 城市生态系统动力学演化模型阶段(1960 年到现在)

1960 年开始,随着环境科学的发展,人们开始关注城市生态系统演化的动力学特点,并进行了一系列有益的尝试,建立了一些兼容了城市土地利用、生态影响因子、环境变化因子等子系统。如对深圳的土地利用/覆盖变化与生态安全的分析^[18],探讨了环境污染特征与城镇用地比例的相关关系,并得到了显著性水平为 0.001 的结论;Grove 从社会生态学的角度,揭示了美国马里兰州的 Baltimore 市 1920 ~ 1990 年代的社会文化和生态特征的时空异质性^[19]。Nijkamp 将城市的交通系统发展与演变同城市环境问题相结合考虑^[20],分析了交通对于城市空间组织结构的影响、以及经济因子、社会因子与城市空间的相互作用,并采用基于专家战略的情景分析法,讨论交通发展对于城市演化的影响。随着辅助研究手段的改进,城市生态系统动力学模型逐渐呈现出综合化、集成化、大尺度、复杂化的趋势。

3 模型建立的方法

3.1 数理模型方法

传统的数理模型在城市生态系统动力学演化模型方面具有简单、抽象、易于构建等特点。统计建模的类型有:一元回归、多元回归、模糊建模、灰色建模、Markov 模型等。数理模型在城市生态系统动力学演化模型中的应用,从开始的描述城市演化的某些特征的简单方程,到更为真实地反映城市系统综合过程的复杂方程,再到随机化模型、系统模型、系统仿真模型等,得到了不断改进和广泛应用。由于软件的成熟和视窗软件的普及,研究者可以通过视图界面完成建模,并模拟城市生态系统演化的复杂过程。

虽然数理模型对于模拟和预测城市的某些子系统具有较大的优势,如建立城市水资源的供需模型、城市污染物的预测、城市环境质量的评价等^[21],但是由于它是由刚性系统衍生出来的,因此它在城市生态系统这样兼有柔性和灰色系统特征的综合研究中,就有一些不足。如何将城市生态系统的柔性和灰色特征、系统内部的复杂反馈机制、动力学特征、系统内部和外部的扰动特征、城市的时空动态演化特征等综合完善于一个集成化的数理模型,是数理模型与城市生态系统动力学模型结合发展的前提。

3.2 生态控制论和灵敏度模型

基于反馈机制的生态/生物控制论分析法 (Eco-cybernetics),可以解释和评价城市系统复杂的动力学行为。德国 F. Vester 提出的 8 条生物控制论的基本原理,在此基础上可以建立城市生态系统灵敏度模型。灵敏度模型将系统学、生态学及城市规划综合为一体,较好的模拟和评价了城市生态系统演化的动力学行为^[22]。它可以帮助分析城市的自然地理和社会经济条件对城市演化的促进或制约作用,分析系统结构的稳定性、系统适应能力、不可逆的变化趋势、系统瓦解的风险或突变的可能性,使城市管理的政策实验成为可能。

生物控制论被引入到国内的研究时,与我国的复合生态系统模型相结合,发展为生态控制论方法,形成了一类城市可持续发展的复合生态模型。城市生态系统调控方法以生态控制论为基础理论之一,突出强调城市生态系统内部人的宏观调控作用,构建城市生态系统演化的动力学模型,模拟城市生态演化进程,预测多种发展情景,通过各种生态规划策略的实施,达到人对城市功能进行调控的目标。

3.3 系统动力学理论与模型

系统动力学 (System Dynamics, SD),由美国 MIT 福瑞斯特 (Jay. w. Forrester) 教授于 1956 年创立。SD 理论与方法以反馈控制理论为基础,建立系统动态模型,借助计算机进行仿真试验^[23]。其突出特点是擅长处理非线性具有多重反馈结构的时变复杂系统,这正符合了城市生态系统的特征要求。运用该方法可实现如下功能:建立城市生态系统的简化模型,探讨城市发展与生态环境演变之间的关系,构造多个发展模式,模拟不同情况下的政策实施背景,依据仿真结果为制定政策提供决策支持,识别城市生态系统的潜在问题,并提出对策。

系统动力学模型能较好的体现城市生态系统的非线性复杂反馈过程,而且它的软件、程序发展已较为成熟,对研究者的计算机编程能力要求不高,因此在城市生态系统演化建模研究中便于推广,但 SD 模型也有不足,即它的空间表达性能较差,目前还没有开发出 SD 软件与地理信息系统的数据共享操作平台,因此,SD 对于城市生态系统的演化模拟也只能体现在数据和图表的形式,暂时无法直接显示到具体的城市空间图形上。

3.4 多目标规划法 (MOP)

多目标规划又称为“连续多准则决策”,是解决有多个矛盾的、不可公度的目标函数需要实现优化的问题。而城市生态系统的动力学优化目标就具有这样的特征,如:希望达到经济发展最大化、环境污染最小化、生态环境最优化、社会进步最大化、投入资金最小化等^[24]。因此,建立 MOP 模型并求解,可以获取敏感点最优解的集合,再针对具体情况设计模拟运行方案,与决策者进行人-机交互辅助决策,取得系统发展的优化规划方案。

随着 MOP 的研究深入,一系列的衍生模型也得到了开发,并应用于城市生态系统的动力学演化模型过程中。从不确定理论出发,引入灰色系统、模糊系统、不确定性等概念,有 IMOP、FMOP、IFMOP 等 MOP 的拓展模型类型^[25]。从演替思想出发,Simon 提出了无最终目标规划的观点,认为规划实施的每一步都是下一步规划的出发点,据此我国王如松提出了辨识-模拟-调控的生态规划方法和泛目标规划方法^[26]。

MOP 以及衍生模型在城市生态系统演化动力学建模方面已经有较多成功应用的实例^[27],而且可以预见,随着计算机技术的发展,各种智能算法逐渐被应用到 MOP 的求解中,而求解途径的拓宽使得 MOP 模型在城市生态演化方面的应用会越来越多。但 MOP 模型也有不足之处,同 SD 模型一样,MOP 与 GIS 的耦合也较为困难,因此构建 MOP-GIS 耦合平台是今后研究的重点之一。

3.5 其它

生态足迹 (ecological footprint, EF)可以按空间面积计量的支持城市生态系统的经济和人口的物质、能源

消费、废弃物处理所要求的土地和水等自然资本的数量^[28],因此用 EF 建立的城市生态系统动力学模型可以很直观的体现系统的动力学特征^[29],而且 EF 把城市生态系统的诸多方面都转化到同一个尺度,即土地占用的测度下,有利于对不同时空下的系统动力学特征进行比较^[30]。

情景分析法 (Scenario Analysis),包括趋势外推,目标反演,替代方案和对照遴选等^[31],对于城市生态系统的动力学预测、以及决策辅助也很有帮助。如预计英国 2030 年的城市交通对于土地利用的关系^[32],对荷兰到 2030 年的土地利用进行模拟和预测^[33],并进行情景分析,能够帮助决策者进行政策评估。

城市复合生态系统设计的 4 因子 (功能、结构、行为和内部关系)模型认为,能流物流变化、生境群落演替,营养结构及纵横等级关系变化等生态过程,会影响城市形态的演化,因此可以从时空尺度上评价和分析人类活动影响下的城市生态演化过程^[34]。

也有学者将物理化学的熵值分析引用到城市生态系统的动力学演化模型中,提出了基于信息熵的城市生态系统演化分析,用“代谢”过程描述城市生态系统的演化过程,并且表明:用氧化、还原等物化定义可以清晰地描述城市生态系统的时间轴动力学特征^[35],熵值分析的优点是对于时间序列的分析简单明了,易于被决策者理解和接受,它的缺点是不能很好的体现城市演化的空间特征。

还有一种表征城市生态系统的动力学演化的方法是建立城市生态系统的能流物流^[36]模型,仿照人体吸收、代谢的规律,把城市生态系统的活动分为两大类:生产和生活,这个系统需要输入燃料、矿产、粮食等基础资源和能源,同时生产出各种产品和建筑物、道路等基础设施,也排放“三废”污染物 (有机和无机排泄物)。能流物流模型能够比较清晰的显示出城市生态系统的能量、物质循环特征,但是该模型不擅长处理城市的空间演化特征,而且它本身需要的基础数据量较大。

4 模型软件

4.1 专业软件

早期的城市生态系统动力学模型主要是随着城市土地利用规划、城市交通规划的需求而开发的,因此,目前比较成熟的城市生态系统动力学专业软件主要是城市交通与城市土地利用的模型和软件。城市交通与城市土地利用关系问题是城市生态系统演化的表现最为突出层面之一。常用的交通与土地利用的一体化模型有:CURBA^[37],Markov^[38],METROSIM^[39],SAM-IM/LAM^[40],Smart Places^[41],UGrow^[42],CUF-1^[43],CUF-2^[44],GSM^[45],MEPLAN^[46],SLEUTH^[47],Smart Growth INDEX[®]^[48],TRANUS^[49],UPLAN^[50],UrbanSim^[51],What if?^[52],DELTA (DSCMODE)^[53],DRAM (EMPAL)^[54],INDEX[®]^[55],IRPUD (Dortmund)^[56],LTM^[57],LUCAS^[58]等。模型描述见表 1^①,其中,DRAM (EMPAL)是空间交互模型,TRANUS 和 MEPLAN 是空间输入-输出模型,CUF 系列模型是以 GIS 为平台的。

随着计算机科学的发展,此类专业软件不但能模拟土地利用和交通需求、空气质量、水供给/需求和基础设施成本的综合作用等方面,还能协调土地利用规划、交通运输规划和环境保护等多重关系,并预测城市动力学演化过程中可能出现的问题。而它们与 GIS 的 Arcinfo、Arcview、Mapgis 等软件的嵌套结合,更具有广泛的应用前景,对于未来开发城市生态系统的复合演化动力学模型具有重要意义。

4.2 一般软件

城市生态系统动力学演化模型常用的一般软件,是指一些普适软件工具,研究者可以从管理学、数理统计学等学科借用到城市生态系统动力学模型中,如系统动力学的 VENSIM、STELLA、DYNAMO 等软件,灵敏度模型等,以及 MATLAB 软件的 simulink 工具,都可以在城市生态系统动力学演化模型中得到良好的应用。Odum^[59]等和 Vester^[22]等分别采用系统动力学与灵敏度模型,以世界部分地区和城市为案例进行了分析,揭示了城市发展与其环境演变的交互作用机理。STELLA 模型是在 Forrester 用图像和注记来表示模型结构的系统动

① USEPA: Projecting Land-Use Change: A Summary of Models for Assessing the Effects of Community Growth and Change on Land-Use Patterns. (EPA/600/R-00/098). 2000. 30-144

表 1 常见模型描述与比较①

Table 1 Frequently used model description and comparison①

模型 Model	主要开发者 Developer	城市/非 城市土地 类型数 ^{a)}	文本 支持 ^{b)}	网页 支持 ^{c)}	专业技能 需求 ^{d)}	可移 植性 ^{e)}	模型描述 Model description
CUF-1	John Landis	1/6	√	×	S	√	模拟政策对城市发展的影响 ^{①)}
CUF-2	John Landis	5/6	√	×	S	√	目标同上,修正了上一版的漏洞 ^{②)}
CURBA	John Landis	0/6	√	×	N	√	评价各类城市发展政策对生物多样性和自然生境的影响 ^{③)}
DELTA	David Simmonds	5/0	√	√	E	√	模拟城市区域内社区、人口、就业、房地产的变化 ^{④)}
DRAM/EMPAL	S. H. Putman	4/6	√	√	E	√	反映在一定的地理条件下就业与居住的关系 ^{⑤)}
GSM	Joe Tassone	5/6	√	×	S	√	反映在不同情形下人口与经济发展对土地覆盖变化的作用 ^{⑥)}
INDEX ®	Criterion Plan. / Eng. , Inc.	5/6	√	√	E	√	衡量土地利用规划与城市设计与社区规划目标和政策的关系 ^{⑦)}
IRPUD	Michael Wegener	5/3	√	√	E	√	模拟长期发展对居住、交通、公共政策、土地及基础设施的作用 ^{⑧)}
LTM	Dr. Bryan C. Pijanowski	1/5	√	√	E	√	对影响土地利用的多个驱动因子进行集成分析 ^{⑨)}
LUCAS	Michael W. Berry	2/6	√	√	E	√	检验人类活动对土地利用、环境以及自然资源可持续性的影响 ^{⑩)}
Markov	Philip Emmi	1/0	√	×	N	√	分析社区内居住需求的变化 ^{⑪)}
MEPLAN	Ian Williams	5/6	√	√	S	√	对土地利用和交通发展的不同政策进行比较和分析 ^{⑫)}
METROSIM	Alex Anas	5/6	√	×	N	×	对交通和土地利用系统的经济和政策进行相关关系分析 ^{⑬)}
SAM-IM/LAM	Planning Tech. , LLC.	5/6	√	×	N	√	对各种规划理念下的未来土地利用进行情景分析和政策判断 ^{⑭)}
SLEUTH	Keith C. Clarke	5/6	√	√	S	√	分析城市化进程及其新兴城区对土地利用和自然环境的影响 ^{⑮)}
Smart Growth INDEX ®	Criterion Plan. / Eng. , Inc.	5/6	√	√	S	×	评估交通和土地利用替代方案,评价它们对出行需求、土地消耗、住宅与就业密度、污染排放的影响 ^{⑯)}
Smart Places	Paul Radcliffe	5/6	√	√	N	√	以环境效益指标对土地利用和交通发展替代方案进行模拟和评价 ^{⑰)}
TRANUS	Modelistica	5/6	√	√	S	×	综合分析土地利用与交通政策及土地市场各种行为的混合效应 ^{⑱)}
UGrow	Wilson W. Orr	5/6	×	×	N	√	分析交通财政政策的长期效应 ^{⑲)}
UPLAN	Robert Johnston	5/6	√	×	S	√	各种财政条件的发展情景分析 ^{⑳)}
UrbanSim	Paul Waddell	5/6	√	√	S	√	描述土地利用、交通、公共政策的相互作用对自然、社会的影响 ^{㉑)}
What if ?	Dr. Richard E. Klosterman	5/6	√	√	S	√	计算未来土地利用的需求与容量,社区规划的土地适用性分析 ^{㉒)}

N 不需要 None ; S 部分需要 Some ; E 需要全面的技能 Extensive ; a)Urban/nonurban land-use categories addressed ; b)Written documentation support ; c)Website support ; d)Technical expertise needed ; e)Transferring possibility to other locations ; fl) Simulating how growth and development

① USEPA : Projecting Land-Use Change : A Summary of Models for Assessing the Effects of Community Growth and Change on Land-Use Patterns. (EPA/600/R-00/098). 2000. 30 — 144

policies might alter urban development ; f2)Same as CUF-1 ,but addressed some of the theoretical holes of the former ; f3)Evaluating alternative urban growth patterns and policies on biodiversity and natural habitat quality change ; f4)Projects changes in urban areas , including the location of households , population , employment , and the amount of real estate development ; f5)Reflecting the interactions of employment and housing ; f6)Projecting population and development effects on land cover ; f7)Measuring land-use plans and urban designs with community goals and policies ; f8)Projecting long-range economic and technological change on housing , transportation , public policies , land uses , and infrastructure ; f9)Integrating multi driving variables on land use ; f10)Examining human impacts on land use , environmental and natural resource sustainability ; f11)Exploring changes in demand for various types of residential housing within a community ; f12)Comparing policies on land use and transportation ; f13)Economic and policy forecasting of transportation and land use systems ; f14)Future land use scenario analysis of alternative development concepts ; f15)Examining urban growth impact on land use and the natural environment ; f16)Assessing transportation and land-use alternatives and their impact on travel demand , land consumption , housing and employment density , and pollution emissions ; f17)Using environmental performance indicators to assists the simulation and evaluation of land-use and transportation alternatives ; f18)Combining land-use , transportation policies and various activities in land market ; f19)Projecting long-term response to transportation and fiscal policies ; f20)Scenario Analysis of alternative patterns on various fiscal conditions ; f21)Shaping the interactions between land use , transportation , and public policy on a community's development trends and natural environment ; f22)Projecting future land use capacity and demand , determining land use suitability in community planning

力学语言基础上发展而来的动态模拟软件 ,强调各个变量间的相互作用和反馈 ,然后通过这些指标与城市空间发展的相关关系来推演城市空间变化。用此类软件构建城市生态系统的动力学演化模型时 ,要求建模者掌握充分的城市生态专业知识 ,并对系统内部及各子系统之间的关系做出正确的分析。应用一般软件建模的优点在于 ,得到的模型具有开放性 ,便于不同的研究者之间进行交流。

4.3 对城市系统动力学演化模型的评价

尽管各种类型的城市生态系统动力学模型取得了良好效果 ,为城市发展的决策者提供了决策支持 ,但是 ,传统的城市系统动力学模型基本上都是基于单纯的“黑箱”策略 ,如何表征城市演化的时空特征、耦合特征是比较困难的。目前 ,城市生态系统动力学模型主要存在以下不足^[60] :①费用过高。开发调整和使用城市生态系统动力学模型需要很高的成本 ,而资料收集和整理也需要很高的费用 ;②一般是静态模型或者离散的阶段模型 ,忽略了时间维和空间维的耦合和集成 ;③对城市扩展过程的复杂性无法完全表征 ,只能截取某些子系统作为模拟对象 ;④对模型开发者和使用者的数学、计算机基础和专业技能要求较高 ,使得模型推广困难 ;⑤由于基础数据的不足 ,通常将空间简化管理为均质空间或进行简单的功能分区 ;⑥基于传统的数理方法建立的动力学模型是连续过程 ,而 GIS 环境下的数据却是离散的 ,因此接口比较困难 ;⑦对城市演化的不确定性考虑不充分 ,不符合城市扩展过程的随机性、模糊性特点 ,模型中许多不确定的变量使得模型很难操作 ;⑧由于人们对模型的期望值高于模型的发展速度 ,使得人们对于模型方法能够迅速成为一种规划分析、预测、决策支持的技术感到信心不足 ,因此也影响了模型的开发、研究、应用和推广。

5 模型的不确定性

城市生态系统是一个复杂巨系统 ,需要借助复杂性科学的思想 and 理论 ,从多学科交叉方面来进行整体上的探索。城市发展过程中的复杂性和不确定性是城市形态变化的主要因素 ,多样性、复杂性和不确定性渗透于城市生态系统演化的整个发展过程中。城市高度非均匀的空间结构与其高度有序的动力学过程是紧密耦合的。在城市生态系统的动力学演化模型和辅助决策过程中 ,数据信息表现为对象和属性之间的关系 ,这类数据信息中存在不确定性。城市生态系统动力学演化模型的不确定性来源按照时间顺序分为 3 个阶段 :首先是在建立模型之前 ,来源于研究者对城市生态系统的认识、分析、识别过程 ;其次是来源于城市生态系统动力学演化模型的过程中 ,包括选择哪个软件、如何进行参数调试、如何抽象等 ;第三是在模型初步完成后 ,进行多情景分析、方案执行、评估、反馈 ,也存在许多不确定性因素 (见图 2)。

6 发展趋势和展望

城市化是世界发展的必然趋势 ,而研究城市生态系统这一特殊的复杂巨系统 ,为城市规划建设者和决策者提供决策支持 ,也就显得越加重要。城市生态系统动力学演化模型的发展前景 :

6.1 宏观化与微观化发展

城市生态系统是一个复杂巨系统 ,一方面 ,研究者要系统完整的体现它的动力学特征 ,就必须使模型不断的宏观化 ,通过对模型持续的完整化、完备化 ,使模型能够兼容足够多的子系统 ,并且能够充分的体现和预测

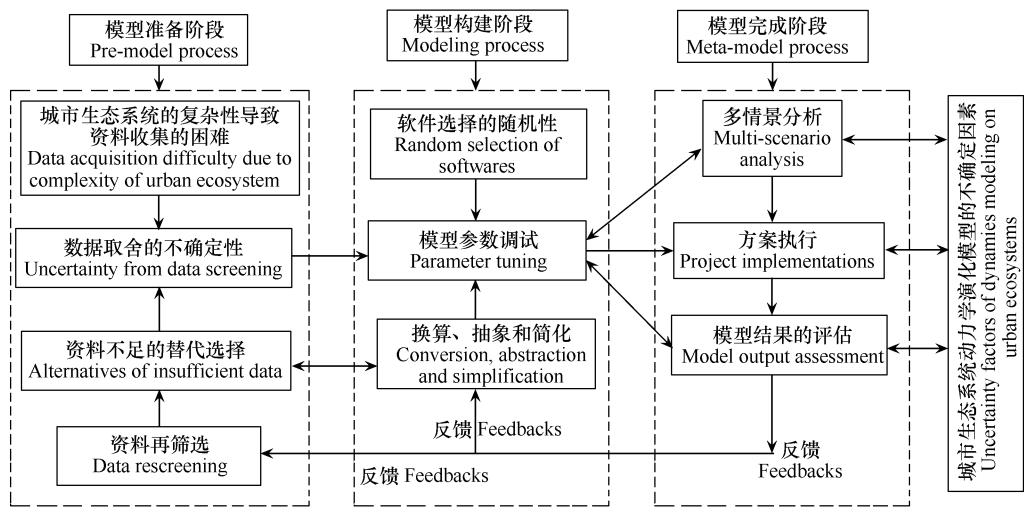


图2 不确定性来源分析
Fig. 2 Analysis of uncertainty factors

各个子系统内部、子系统之间的联系、反馈作用。这样对计算机软件和硬件、对软件开发人员的要求都较高，研究者需要同时具备城市生态和计算机方面的学科背景。而且，实现这样的宏观模型，对基础数据的要求也很高，还需要投入大量的资金。另一方面，对城市生态系统动力学模型的一些变化剧烈、对总体影响较大的子系统，需要展开微观化的研究，可以有针对性地开发系统的部分子系统模型，尤其是对于城市生态规划需要的动力学模型，例如，城市水资源模型、城市交通环境的优化模型、城市道路噪声控制模型等，从这些城市生态系统的子系统模型研究入手，开展子系统的优化。

6.2 新方法的应用

随着运筹学和优化方法在城市生态规划领域的逐渐引入和应用，以及计算机的广泛应用，使得一些人工智能 (Artificial Intelligence ,AI)方法例如人工神经网络 (Artificial Neural Network ,ANN)和遗传算法 (Genetic Algorithms ,GA)等，被应用到城市模型的模拟和优化中去，并取得了良好的效果。城市生态系统的最优化模型，最终得到的优化结果应该不是一个最优的点，而是集成了表达城市空间、时间的多维数组。ANN 和 GA 等不确定的方法，在面对城市生态系统这样的非线性、机理不明确的复杂系统时，显示出良好的优势。比如，席一凡^[61]将 GA 应用到城市土地规划的优化方法研究上，证明该方法可以得到更合理、符合实际的规划方案。与传统的统计模型相比，ANN 和 GA 更适合先验分布不明确的非线性问题^[62]。ANN 还可以与 CA 模型相结合，形成细胞神经网络 (Cellular Neural Network ,CNN)。

通过这些新方法建立的城市生态系统动力学模型，可以实现虚拟的城市生态系统复杂动态的仿真模拟，在 GIS 的平台下，能对实际的城市发展过程进行可靠性较高的模拟和预测，建立管理信息系统 (Management Information Systems ,MIS)或决策支持系统 (Decision Support System ,DSS)，为决策者提供决策支持。

6.3 对不确定问题的定性和定量探讨

城市生态系统是一个具有非线性、模糊性、复杂性的大系统，因此不确定性是到处存在的。随着计算机技术的迅速发展和 GIS 的广泛应用，对城市生态系统的动力学动态关系进行定量模拟分析也已成为可能，但是，城市生态系统对于人类发展可能存在承载能力的极限^[63]，但承载的极限不是一个点，而是一个不确定的范围，如何定性、定量地分析系统承载能力的不确定度，往往成为城市生态系统管理的约束前提，具体分析其不确定度的方法还有待进一步发展。

6.4 多模型的耦合和集成

多模型的耦合和集成，不仅是指数理模型的耦合或集成，也包括数理模型与专业软件的嵌套。如 SD 等

预测模型与 MOP ,MOP 与 LUCC 等模型的耦合 ,GIS 基础上的动力学模型等^[64]。此外 ,由于连接端口的不一致或者数据结构的不同 ,以往的模型连接往往是松散的连接 ,而如何开发不同模型之间的自动化端口 ,实现多个模型的有机耦合和集成 ,是未来的发展方向之一^[65]。

将可视化、三维建模和三维动画技术引入城市生态系统动力学模拟仿真中 ,从系统工程的观点 ,在城市演化的社会、经济、生态环境等动力学核心模块基础上进行研究 ,以土地利用和土地覆盖作为基础工作平台 ,提出面向对象的城市生态系统耦合动力学模拟仿真三维图形可视仿真模拟思路 ,形成一个为决策者提供三维可视界面的仿真环境 ,力求能表现城市生态系统动力学演化的动态过程。采用的技术有 :面向对象建模技术、基于变参数的模型适应技术 ,基于三维计算机图形学的建模技术 ,模型控制技术 ,动态演示功能技术 ,集三维模型、数据共享传递、模型计算为一体的系统集成技术等。

7 结语

城市生态系统的动力学演化建模是一种行之有效的城市生态规划手段。本文分别从动力学演化原理、建模方法、建模发展历史、模型和软件归类、模型的不确定性和复杂性等方面对城市生态系统动力学演化模型的复杂机制进行了综合探讨和研究 ,对城市生态系统的演化特征和建模问题做出了初步的解释。总结了人们对城市生态系统动力学研究的历史 ,以及对系统演化的认识 ,对城市土地利用、城市生态环境、城市人口社会和城市经济发展之间的关系进行了初步的探讨。对于城市生态系统的模拟-预测-优化模型而言 ,从城市生态系统的社会-经济-自然复合生态系统的动力学耦合效应来阐述其优化过程 ,并进行抽象、简化的动力学分析。文章为城市生态系统动力学模型机理的深层次揭示及特征尺度和时空耦合等问题的最终解决 ,展示了一些新的研究观点和方法 ,也为解决城市生态系统决策管理的不确定性问题 ,提出了一些建设性意见。

References :

- [1] Wang R S. The frontiers of urban ecological research in industrial transformation. *Acta Ecologica Sinica* ,2000 ,20 (5) :830 — 840.
- [2] Finco A ,*et al.* Pathways to urban sustainability. *Journal of Environmental Policy & Planning* ,2001 ,3 :289 — 302.
- [3] Wang X R. Environmental assessment and ecologic planning for the sustainable development of Shanghai-Pudong. *Urban Planning Forum* ,1995 ,5 :46 — 50.
- [4] Branch M. Continuous city planning :integrating municipal management and city planning. New York :John Wiley and Sons ,1981. 1 — 56.
- [5] Camagni R ,*et al.* Towards sustainable city policy :an economy-environment technology nexus. *Ecological Economics* ,1998 ,24 :103 — 118.
- [6] Jean L ,*et al.* Application of fuzzy sets and cognitive maps to incorporate social science scenarios in integrated assessment models :A case study of urbanization in Ujung Pandang ,Indonesia. *Integrated Assessment* ,2000 ,1 (3) :177 — 188.
- [7] Huang G Y ,Chen Y. Theory and planning method of ecocity. Beijing :Science Press ,2002. 15 — 60.
- [8] Hai R T ,Wang W X. Ecological environment assessment ,planning and management. Beijing :Chinese Environmental Science Press ,2004. 208 — 210.
- [9] Kong F D. Ecology protection conspectus. Beijing :Chinese Environmental Science Press ,2001. 17 — 45.
- [10] Mula J ,*et al.* Models for production planning under uncertainty :A review. *Int. J. Production Economics* ,2006 ,103 (1) :271 — 285.
- [11] Leitmann J. Sustaining cities :environmental planning and management in urban design. New York :McGraw-Hill ,1999. 35 — 76.
- [12] Burgess E W. The growth of the city — an Introduction to a research project. Chicago :University of Chicago Press ,1925. 17 — 53.
- [13] Shvetsov V I. Mathematical modeling of traffic flows. *Automation and Remote Control* ,2003 ,64 (11) :1651 — 1689.
- [14] Folke C ,*et al.* Ecosystem appropriation by cities. *Ambio* ,1997 ,26 :167 — 172.
- [15] Wolman A. The metabolism of cities. *Scientific American* ,1965 ,9 :179 — 188.
- [16] Wagener M. Operational urban models :State of the Art. *Journal of the American Planning Association* ,1994 ,60 (1) :17 — 29.
- [17] Miller D ,*et al.* Integrating city planning and environmental improvement :practicable strategies for sustainable urban development. Aldershot :Ashgate Publishers ,1999. 260 — 369.
- [18] Shi P J ,*et al.* Land use P cover change and environmental security in Shenzhen region. *Journal of Natural Resources* ,1999 ,14 (4) :293 — 299.
- [19] Grove J M ,*et al.* A social ecology approach and applications of urban ecosystem and landscape analyses :a case study of Baltimore. Maryland Urban Ecosystems ,1997 ,1 (4) :259 — 275.
- [20] Nijkamp P ,*et al.* Sustainable urban transport systems :an expert-based strategic scenario approach. *Urban Studies* ,1997 ,34 (4) :693 — 712.

[21] Yan S Y. Analyses and exploration to contents , definition and methods of urban ecology study. *Ecologic Science* ,2001 , 20 (1 2) :96 — 105.

[22] Vester F , *et al.* A. Ecology and planning in metropolitan areas sensitivity model. Berlin :Federal Environmental Agency ,1980. 48 — 89.

[23] Wang Q F. Higher systematic dynamics. Beijing :Tsinghua University Press ,1995. 145 — 220.

[24] Guo H C. Environmental planning methods and applications. Beijing :Chemical Engineering Press ,2006. 34 — 50.

[25] Wang J H , *et al.* An inexact multi-objective programming approach for strategic environmental assessment on regional development plan. *Progress in Natural Science* ,2004 , 14 (11) :950 — 959.

[26] Lu M , *et al.* Research progress of urban ecology and urban ecological environment. *Journal of Shandong Institute of Arch. And Eng.* ,2002 , 17 (4) #2 — 48.

[27] Zhang X H , *et al.* Application of SD-MOP integrated model in urban eco-environmental planning of Qinhuangdao. *Acta Scientiae Circumstantiae* , 2002 , 22 (1) 92 — 97.

[28] Rees W , Wackernagel M. Urban ecological footprint : why cities cannot be sustainable-and why they are a key to sustainability. *Environ. Impact Assess. Rev.* ,1996 , 16 :223 — 248.

[29] Holden E. Ecological footprints and sustainable urban form. *Journal of Housing and the Built Environment* ,2004 , 19 (1) :91 — 109.

[30] Bergh J , *et al.* Spatial sustainability , trade and indicators : an evaluation of the ‘ ecological footprint ’. *Ecological Economics* ,1999 , 29 (1) :61 — 72.

[31] Hugues D J. A brief methodological guide to scenario building. *Technological Forecasting and Social Change* ,2000 , 65 (1) 37 — 48.

[32] Chatterjee Kiron , *et al.* Planning for an unpredictable future : transport in Great Britain in 2030. *Transport Policy* ,2006 , 13 (3) :254 — 264.

[33] Nijs T C M , *et al.* Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030. *Journal of Environmental Management* ,2004 , 72 (1-32) :35 — 42.

[34] Wang R S. Integrative eco-management for resource , environment and industrial transformation. *Systems Engineering-Theory & Practice* ,2003 , 23 (2) :125 — 132 , 138.

[35] Miyano H. Identification model based on the maximum information entropy principle. *Journal of Mathematical Psychology* ,2001 , 45 :27 — 42.

[36] Liu Y L , *et al.* Urban environment analysis. Wuhan :Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press ,1999. 9 — 28.

[37] Landis J D. The California urban futures model : a new generation of metropolitan simulation models. *Environment and Planning B* ,1994 , 21 :399 — 420.

[38] Philip C E , Lena M. Opportunity and mobility in urban housing markets. *Progress in Planning* ,1995 , 43 (1) :1 — 88.

[39] Alex A , *et al.* Urban spatial structure. *Journal of Economic Literature* ,1998 , 36 (3) :1426 — 1464.

[40] Miller E , *et al.* Integrated urban models for simulation of transit and land-use policies. Washington DC :National Academy Press ,1999. 1 — 55.

[41] Kaiser E J , *et al.* Urban land use planning. 4th Edition. Chicago :University of Illinois Press ,1995. 12 — 39.

[42] Nelson A C , *et al.* Growth management principles and practice. Chicago :Planners Press ,1995. 7 — 38.

[43] Landis J D. Imagining land use futures-applying the California urban futures model. *Journal of the American Planning Association* ,1995 , 61 (4) :438 — 457.

[44] Landis J D , *et al.* The second generation of the California urban futures model. Part I. model logic and theory. *Environment and Planning , B : Planning and Design* ,1998 , 25 :657 — 666.

[45] Orfield M. Metropolitics : a regional agenda for community and stability. Washington D C :Brookings Institution Press ,1997. 1 — 58.

[46] Parsons B Q , *et al.* Land use impacts of transportation : a guidebook. Washington D C :National Academy Press ,1999. 27 — 65.

[47] Silva E A , Clarke K C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto , Portugal. *Computers , Environment and Urban Systems* ,2002 , 26 (6) :525 — 552.

[48] Smart Growth Index : <http://www.sgli.org/downloads/others/smartpolitics.pdf>

[49] Barra D. Integrated land use and transport modeling. New York :Cambridge University Press ,1989. 1 — 45.

[50] Rusk D. Inside game outside game : winning strategies for saving urban America. Washington D C :Brookings Institution Press ,1999. 21 — 39.

[51] Waddell P. UrbanSim : Modeling urban development for land use , transportation and environmental planning. *Journal of the American Planning Association* ,2002 , 68 (3) :297 — 314.

[52] Weitz J , *et al.* Development inside urban growth boundaries : Oregon ’ s empirical evidence of contiguous urban form. *Journal of American Planning Association* ,1998 , 64 (4) :424 — 440.

[53] Hunt J D , Simmonds D C. Theory and application of an integrated land-Use and transport modelling framework. *Environment and Planning : B* , 1993 , 20 :221 — 244.

[54] Kockelman K , Krishnamurthy S. Propagation of uncertainty in transportation-land use models : investigation of DRAM/EMPAL and UTPP predictions in Austin , Texas. *Transportation Research Record* ,2003 , 1831 :219 — 229.

[55] INDEX : <http://www.crit.com> <http://www.crit.com/documents/indexinsightteachingtool.pdf>

[56] Wagener M. Operational urban models : state of the art. *Journal of the American Planning Association* ,1994 ,60 (1):17 — 29.

[57] Pijanowski B C , *et al.* Using neural networks and GIS to forecast land use changes : a land transformation model. *Computers , Environment and Urban Systems* ,2002 ,26 (6) ,553 — 575.

[58] Hazen B C , Berry M W. The simulation of land-cover change using a distributed computing environment. *Simulation Practice and Theory* ,1997 ,5 (6) 489 — 514.

[59] Odum H T , Elisabeth C. Modeling for all scales : an introduction to system simulation. San Diego : Academic Press ,2000. 771 — 772.

[60] Tong M. Development and rethinking of city modeling. *Urban Planning Overseas* ,1997 ,3 :42 — 46.

[61] Xi Y F , *et al.* Application of genetic algorithm in land function allocation planning. *J. of NW Inst. of Arch. Eng. (Natural Science)* ,2001 ,18 (4) :190 — 194.

[62] Chen G , *et al.* The development and problems of urban models. *Economic Geography* ,2000 ,20 (5) 59 — 62 ,71.

[63] Beatley T. Planning and sustainability : the elements of a new paradigm. *Journal of Planning Literature* ,1995 ,9 (4) 383 — 395.

[64] Du Guoqing. Using GIS for analysis of urban systems. *Geo. Journal* ,2000 ,52 (3) :213 — 221.

[65] Alberti M , Waddell P. An integrated urban development and ecological simulation model. *Integrated Assessment* ,2000 ,1 (3) :215 — 227.

参考文献：

[1] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展. *生态学报* ,2000 ,20 (5) 830 ~ 840.

[3] 王祥荣. 上海浦东新区持续发展的环境评价及生态规划. *城市规划汇刊* ,1995 ,5 46 ~ 50.

[7] 黄光宇,陈勇. 生态城市理论与规划设计方法. 北京 :科学出版社,2002. 15 ~ 60.

[8] 海热提,王文兴. 生态环境评价、规划与管理. 北京 :中国环境科学出版社,2004. 208 ~ 210.

[9] 孔繁德. 生态保护概论. 北京 :中国环境科学出版社,2001. 17 ~ 45.

[18] 史培军,等. 深圳市土地利用 P 覆盖变化与生态环境安全分析. *自然资源学报*. 1999 ,14 (4) 293 ~ 299.

[21] 阎水玉. 城市生态学学科定义、研究内容、研究方法的分析与探索. *生态科学* ,2001 ,20 (1 2) :96 ~ 105.

[23] 王其藩. 高级系统动力学. 北京 :清华大学出版社,1995. 145 ~ 220.

[24] 郭怀成. 环境规划方法与应用. 北京 :化学工业出版社,2006. 34 ~ 50.

[26] 鲁敏,等. 城市生态学研究进展. *山东建筑工程学院学报* ,2002 ,17 (4) :42 ~ 48.

[27] 张雪花,等. SD-MOP 整合模型在秦皇岛市生态环境规划中的应用研究. *环境科学学报* ,2002 22 (1) :92 ~ 97.

[34] 王如松. 资源、环境与产业转型的复合生态管理. *系统工程理论与实践* ,2003 ,23 (2) :125 ~ 132 ,138.

[36] 刘耀林,等. 城市环境分析. 武汉 :武汉测绘科技大学出版社,1999. 9 ~ 28.

[60] 童明. 城市模型方法的发展与反思. *国外城市规划* ,1997 ,3 :42 ~ 46.

[61] 席一凡,等. 遗传算法在城市土地功能配置规划中的应用. *西北建筑工程学院学报 (自然科学版)* ,2001 ,18 (4) :190 ~ 194.

[62] 陈干,等. 城市模型的发展及其存在问题. *经济地理* ,2000 ,20 (5) 59 ~ 62 ,71.