

# 城镇化与生态环境耦合动态模拟模型研究进展

崔学刚<sup>1,2</sup>, 方创琳<sup>1\*</sup>, 李 君<sup>3</sup>, 刘海猛<sup>1,2</sup>, 张 蕾<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

**摘 要:**按照地理学科发展趋势,对城镇化与生态环境耦合的研究将由定量描述转入动态模拟。目前,城镇化与生态环境耦合动态模拟模型呈现多元化。论文系统梳理了其中4类常见的动态模拟模型,包括城镇化与生态环境耦合系统动力学模型、基于人工智能算法的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型、基于土地利用变化的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型以及基于多模型集成的城镇化与生态环境耦合复合模型。主要结论如下:系统动力学模型被广泛应用于城市复杂系统、城市转型和可持续发展以及城镇化与生态环境单要素耦合的动态模拟之中,但存在空间解释不足以及忽视系统自适应性等问题;人工智能算法(ANN和BN)在自学习、自组织、自适应系统或不确定性系统模拟中具有显著优势,并被应用于城市扩张、环境变化、资源需求以及生态脆弱性的识别之中,但应用面相对狭窄且限制条件偏多;土地利用变化模型(CLUE/CLUE-S、CA和MAS)局限于从土地城镇化视角模拟城镇化与生态环境耦合;基于多模型集成的复合模型实现了各模型之间的优势互补,已成为城镇化与生态环境耦合动态模拟模型的发展趋势。今后,应从技术和理论2个层面实现城镇化与生态环境耦合动态模拟模型的进一步发展,并加强对微观过程的模拟。

**关 键 词:**城镇化与生态环境耦合;动态模拟;系统动力学模型;人工智能算法;土地利用变化模型;复合模型

近年来,由于城镇化在中国引发显著的环境负效应,诸多地理学者的研究兴趣开始转向城镇化与生态环境耦合(方创琳等, 2016)。城镇化与生态环境之间存在复杂的非线性耦合关系,包括两者间的总体交互反馈、水-土-能源资源等的耗用与约束以及城镇化过程与生态安全格局间的交互胁迫等(Fang et al, 2016; Bao et al, 2017)。根据不同区域的已有历史数据,诸多学者定量测度了城镇化与生态环境间的耦合关系,结果呈现为双指数或倒“U”型等曲线形式(Li et al, 2012; 刘艳艳等, 2015; 孙黄平等, 2017)。随着研究的进一步深入,分析尺度开始由局地耦合逐渐扩展到远程耦合,期望揭示复杂时空维度下的城镇化与生态环境耦合的级联效应(Liu et al, 2013; 方创琳等, 2017)。然而,由于耦合

机制的复杂性,采用传统范式评估城镇化与生态环境的交互耦合效应已显得力不从心,且受限于以往的数理统计表象,其深层次的运行机制及演化趋势尚待进一步模拟及预测。地理学通常要经历一个由知识描述到过程模拟,再到决策与调控的发展趋势,而研究对象也将由简单系统进一步向复杂人地系统扩展(傅伯杰, 2017)。随着城镇化与生态环境耦合研究的不断深入,对该过程的动态模拟将成为今后研究的重要方向之一。

动态模拟在某种意义上可看作是对地理过程的历史重现,并在此基础上对地理过程的发展趋势进行科学预测(唐志鹏等, 2010)。目前,诸多学者采用系统仿真建模对城镇化与生态环境耦合进行了动态模拟,其中以系统动力学模型最为典型(宋学

收稿日期:2018-04-03;修订日期:2018-09-10。

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41590840, 41590842)。[Foundation: Major Program of National Natural Science Foundation of China, No. 41590840 and 41590842.]

第一作者简介:崔学刚(1990—),男,山东淄博人,博士生,主要从事城市地理与区域规划研究。E-mail: cuixg.16b@igsnrr.ac.cn

\*通信作者简介:方创琳(1966—),男,甘肃庆阳人,博士,研究员,主要从事城市发展与规划研究。E-mail: fangcl@igsnrr.ac.cn

引用格式:崔学刚, 方创琳, 李君, 等. 2019. 城镇化与生态环境耦合动态模拟模型研究进展 [J]. 地理科学进展, 38(1): 111-125. [Cui X G, Fang C L, Li J, et al. 2019. Progress in dynamic simulation modeling of urbanization and ecological environment coupling. Progress in Geography, 38(1): 111-125.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.01.010

锋等, 2006; Su, 2015)。而随着计算机仿真技术特别是人工智能技术的快速发展, 模型的种类和数量持续增多, 尤其是围绕土地系统动态模拟这一领域, 以元胞自动机、多智能体系统和土地利用变化及效应模型(CLU/CLUE-S)等为代表的一系列模型发展迅速, 这为土地城镇化的动态模拟提供了有效的科学方法(李少英等, 2017)。根据对城镇化与生态环境耦合动态模拟研究领域的掌握, 可依据理论和学科背景、演化时序和适用范围等将现有主要模型划分为城镇化与生态环境耦合系统动力学模型、基于人工智能算法的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型、基于土地利用变化的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型以及基于多模型集成的城镇化与生态环境耦合复合模型4大类。对城镇化与生态环境耦合这一典型人地系统过程作动态模拟, 可针对不同城镇化发展模式进行多情景模拟与风险预警, 进而比选适宜的优化调控方案, 为促进可持续城镇化提供决策支持。其中, 遴选适宜的模型是动态模拟的核心。在分析比较不同动态模拟模型的适用性和优缺点的基础上, 对现有模型作初步总结和展望, 以期为推动可持续城镇化遴选最优的技术支持手段。

## 1 城镇化与生态环境耦合系统动力学模型

### 1.1 模型介绍

系统动力学(System Dynamics, SD)是一门由系统科学理论与计算机仿真交叉而成的学科, 由麻省理工学院 J. W. Forrester 教授提出(Forrester, 1958)。基于定性和定量相结合的方法, 系统动力学通过构建反馈结构反映了系统的行为模式与特征。

系统动力学描述了复杂系统的高阶次、非线性和多重反馈特征(王其藩, 1999), 这与地理学所倡导的人地系统理论高度契合。通过灵活的建模方式, 系统动力学能够在剖析要素反馈关系的基础上构建城镇化与生态环境耦合结构, 从而将复杂的整体耦合过程分解为多子系统、多要素间的动态反馈集成, 并通过系统存流量检验、灵敏度分析、参数修正等环节提高模型精度(顾朝林等, 2017)。此外, 系统动力学建模过程较为理性直观, 形成了理论分析—指标体系构建—SD模型构建—动态模拟—情景调控的建模流程(图1)。基于以上优势, 在早期学者们

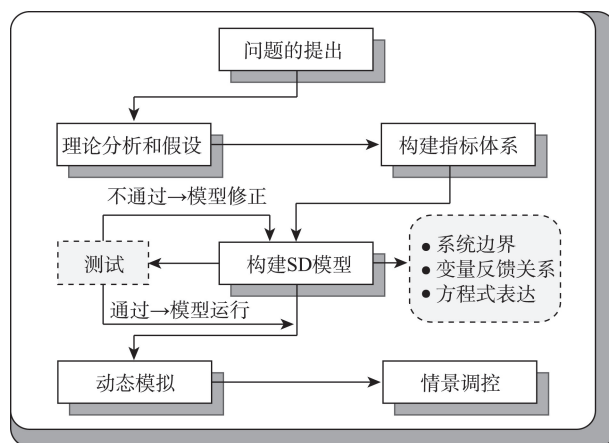


图1 系统动力学建模流程

Fig.1 The modeling process with system dynamics models

就已尝试利用系统动力学模型模拟社会-经济-环境复杂系统。1972年, 罗马俱乐部出版的《增长的极限》可谓一个里程碑。报告中构建了一个包括人口、农业生产、自然资源、工业生产和污染5个子系统的“世界模型”, 认为“唯增长是从”的发展模式必将导致“发展的极限”(Meadows et al, 1972)。尽管这份报告因浓厚的悲观主义色彩而广受质疑, 但其最早宣扬了可持续发展理念, 并推动了SD模型在社会-经济-环境复杂系统动态模拟中的应用。

系统动力学模型也存在一定缺陷。一方面, 社会-经济-环境复杂系统属于自适应、自学习和自组织系统(仇保兴, 2017), 而系统动力学模型结构的固定性导致无法体现该特点。另一方面, 由于系统动力学模型揭示的是要素关联性而非空间关联性, 因而空间分析功能相对欠缺。此外, 系统动力学模型反馈结构中“黑箱”问题显著, 部分变量关系局限于回归关系。但不可否认的是, 系统动力学模型是一类模拟社会-经济-环境复杂系统的有效工具。

### 1.2 主要应用

凭借简便的建模方式和对复杂非线性系统的科学模拟, 系统动力学被广泛用于城市复合系统、城市转型和可持续发展以及城镇化与生态环境单要素耦合的仿真模拟。

#### 1.2.1 城市复合系统仿真模拟

根据地理系统论的观点, 城镇化与生态环境耦合类似于城市复合系统演化。目前有关城市复合系统的定义较为多元化, 包括社会-经济-自然复合生态系统(Social-Economic-Natural Complex Ecosystem, SENCE)(王如松等, 2012; Yao et al, 2015)、经济-资源-环境复合系统(Economy-Resources-En-

vironment System, ERE)(刘承良等, 2013)和城市生态-经济系统(Urban Ecological-Economic Systems, UEE)(Fang et al, 2017)等。总体而言,城市复合系统具有动态性、多维性和协同性等特征。

在科学辨识系统组成模块的基础上,学者们基于SD模型动态模拟了城市复合系统演化。宋学锋等(2006)基于“ISM+SD”方法模拟了江苏省城镇化与生态环境的耦合过程,认为应制定差异性的城镇化模式;Guan等(2011)采用SD-GIS方法评估了重庆城市经济-资源-环境系统(ERE)的可持续性,认为环境子系统的可持续性有利于系统整体的可持续性;刘承良等(2013)以武汉都市圈为例,采用系统动力学模拟了经济-资源-环境系统的非线性演化过程;Su(2015)基于理论与模型相结合的研究方法,采用系统动力学分析了城市人口、资源和环境系统的综合发展模式;Li等(2016)通过对城市绿地系统、经济社会系统和环境系统协调发展过程的SD模拟,评估了北京绿色空间可持续发展能力;Fang等(2017)将系统动力学和能值方法做了集成,评估了北京生态-经济系统的可持续性;顾朝林等(2017)采用中国城镇化系统动力学模型对中国城镇化作了中长期预测,并在其中考虑到了环境容量的约束。综上可知,SD模型展现了城市复合系统子模块之间的动态与协同演化过程。

### 1.2.2 城市转型和可持续发展

城市转型的内涵具有综合性,包括经济、社会、生态转型等多个方面(金浩然等, 2016)。目前,部分研究借助SD模型分析了资源枯竭城市的转型模式,如卢万合等(2012)以辽源市为例,构建了一个由人口、资源产业、接续产业和其他工业4个子系统组成的SD模型,通过模拟资源枯竭约束下的城市发展过程,认为资源枯竭城市通过产业转型能够避免受到资源枯竭的显著影响。

更多学者利用SD模型评估了城市发展的可持续性,讨论了人口、经济、社会和资源环境要素如何实现协调发展,如朱杰等(2009)构建了一个包括人口、产业、污染和城镇化4个子系统的SD模型,模拟了不同情景下的常州市发展状态,认为通过产业转型和培育新兴产业将实现城镇化和生态环境的协调发展;张子珩等(2010)借助SD模型模拟了人口、经济与资源环境相互作用下的乌海城市可持续发展过程,认为如果不采取必要的节水、产业升级和人口迁移措施,未来将面临水和煤炭资源透支的威

胁;Mavrommati等(2013)借助SD模型模拟了雅典城市滨海系统的生态可持续发展过程,认为良好的制度框架有利于改善当前状态,而技术进步的效果具有不确定性;Li等(2014)以银川市为例,利用SD模型分析了人口-经济-环境系统协调发展过程,期望为西北地区城市可持续发展提供经验借鉴。SD模型模拟结果表明,促进城市可持续发展的根本不仅是合理控制发展规模,更要注重发展质量和结构。

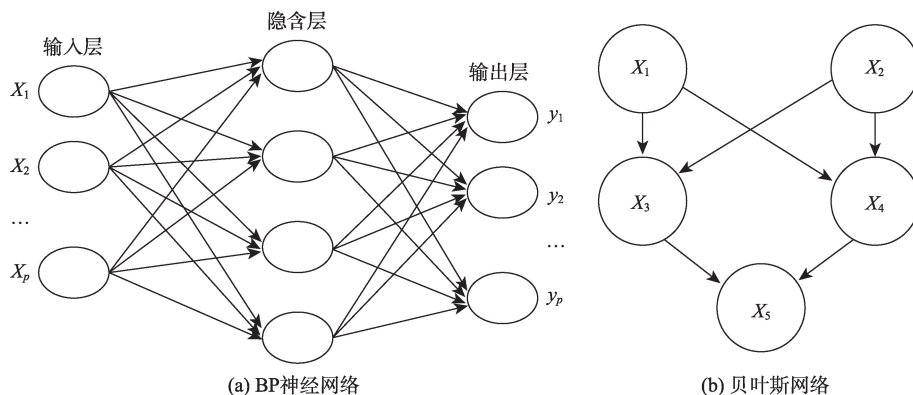
### 1.2.3 城镇化与生态环境单要素耦合

基于环境变化区域实践视角,学者们模拟了城镇化与生态环境单要素中关键胁迫因子的耦合过程。如He等(2006)基于CA-SD模型模拟了水资源约束下的北京城市扩展情景;左其亭(2007)构建了一个嵌入式系统动力学模型(ESD)框架,期望揭示人水系统的复杂演变过程;卢超等(2011)采用SD模型模拟了水资源约束下的小城镇发展过程,并提出了包含农业结构调整、产业结构转型和树立公众节水意识的三级治理体系;Egilmez等(2012)基于燃料效率、公共交通和电力汽车3种SD情景模拟,揭示了美国高速公路建设与CO<sub>2</sub>排放量的正相关性;Feng等(2013)基于STELLA平台建立了系统动力学模型,并对2005—2030年北京能源消费量和CO<sub>2</sub>排放量作了预测,认为转变经济发展方式和合理控制人口增长有利于抑制能源消费和碳排放;如严冬等(2016)借助“Dyna-CLUE+SD”模型模拟了地质条件约束下的山地城镇化过程。综上可知,学者们尤为关注城镇化与水资源、能源消费及其引起的碳排放以及地形地貌等要素的耦合过程。

## 2 基于人工智能算法的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型

人工神经网络和贝叶斯网络均是基于人工智能的计算机仿真模型,二者在训练方式、模式分类和算法复杂度上具有高度相似性,但在拓扑结构、算法原理、学习规则和测试方法上却存在较大不同。在拓扑结构方面,人工神经网络表现为一个有向图,既可为有向无环图,如模糊神经网络(FNN),也可为循环图,如递归神经网络(RNN),而最常见的BP神经网络是一个包含输入层、隐含层和输出层的有向无环图(Haykin, 2008);相反地,贝叶斯网络只能表现为一个有向无环图(张连文等, 2006)(图2)。





注:引自张连文等, 2006; 张晓瑞等, 2013

图2 BP神经网络和贝叶斯网络的拓扑结构

Fig.2 Topological structure of backpropagation (BP) neural network and Bayesian network

这2类模型也被用于城镇化与生态环境耦合动态模拟之中,前者主要用于城镇化进程中的用地扩张、环境演变、污染扩散和资源需求模拟等,而后者更多地用于城市生态脆弱性识别以及资源管理等。

## 2.1 人工神经网络模型

### 2.1.1 模型介绍

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)是一类模仿人脑信息处理功能的非线性模型(邢文训等, 2006)。Rosenblatt(1958)提出的感知器(Perceptron)是首个实现人工神经网络的装置,由输入节点、输出节点、权向量、偏置因和激活函数5个部分构成,为ANN的拓扑结构和学习规则奠定了基础。由于感知器的二进制激活函数难以解决异或问题,因而又改进为线性神经网络。线性神经网络采用线性激活函数,并主要遵循梯度下降法学习规则,可以有效解决异或问题,但也存在2个缺陷:一是学习率不容易确定,影响模型收敛;二是容易陷入局部最优解(朱大奇, 2006)。

到了20世纪80年代,通过引入非线性激活函数,ANN形成了分别以Hopfield和BP神经网络为结点的2条重要分支(焦李成等, 2016)。其中,Hopfield神经网络可通过训练实现联想记忆功能,从而在数据不完整的情况下输出完整结果(Hopfield, 1982);BP神经网络是一类常见的无反馈神经网络,通过加入隐含层(一层或多层)和采用误差反向传播算法,提供了解决多层神经网络训练的途径(杨晓帆等, 1994)。人工神经网络具有自学习、联想储存和高速寻优3个优势,并具有良好的非线性映射逼近性(徐建华, 2010)。然而,人工神经网络在学习、

因果解释等方面也存在部分缺陷,特别是不擅长处理不确定性问题(杨继琼, 2007)。

### 2.1.2 主要应用

一方面,人工神经网络可被用于模拟城镇用地扩张过程。刘柯(2007)基于主成分分析和BP神经网络预测了北京市城市建成区面积,认为该方法相较于BP神经网络精度可提高1.8个百分点;付玲等(2016)也基于BP神经网络和城市增长边界模型预测了2020年北京城市增长边界。另一方面,人工神经网络可预测城市环境变化和污染扩散等过程。Viotti等(2002)借助ANN预测了意大利Perugia市典型污染物浓度的短期和中长期变化趋势,认为该方法在24~48 h区间内有效;Lee等(2003)基于考虑时滞的藻类动力学构建了一个ANN,并以每周的采样数据为训练样本模拟了香港沿海水域的藻类爆发;Cai等(2009)采用BP神经网络预测了广州市交通干道附近的大气污染物浓度变化趋势,认为该方法优于多线性回归模型和CALINE线源模型;张颖等(2015)基于改进的T-S模糊神经网络预测了太湖流域的水质变化趋势,认为该方法能够有效预测10 d后的单因子水质状态。此外,可基于人工神经网络预测资源与能源需求。刘树锋等(2007)基于人工神经网络对比了不同供水情景下的惠州市水资源承载力差异,旨在解决水资源系统和社会经济系统的协同问题;李瑞等(2016)采用RBF神经网络预测了中国物流业的能源需求,认为到2020年物流业能源消费总量将突破5亿t标准煤。

在精度方面,Tirelli等(2011)比较了ANN和决策树(DT)在生态数据预处理方面的性能,认为ANN的表现更好;张晓瑞等(2013)比较了RBF神经网络、

BP神经网络和线性回归3种方法在城市建成区面积预测中的效果,认为RBF神经网络凭借以任意精度全局逼近任意非线性关系的优势,在效果上显著优于其他2种方法。

## 2.2 贝叶斯网络模型

### 2.2.1 模型介绍

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)是由概率论、统计学与图论结合而成,它兴起于20世纪80年代中期对人工智能中不确定性问题的研究(张连文等, 2006; 史志富, 2012)。根据贝叶斯定理( $P(H=h|E=e)=P(H=h)*P(E=e|H=h)/P(E=e)$ ),可由先验概率( $P(H=h)$ )推算出后验概率( $P(H=h|E=e)$ ),从而解决了训练数据集不完整的限制(黄影平, 2013)。此外,贝叶斯网络根据变量之间的条件独立关系将联合分布分解为多个概率分布,进而降低了不确定性推理的复杂程度(张连文等, 2006)。作为一个有向无环图(DAG),贝叶斯网络由节点集合( $V(G)$ )和弧集合( $E(G)$ )组成,呈现了模型的相关变量及其因果关系,而变量关系可用条件概率表(CPT)表征(李明等, 2018)。构建贝叶斯网络通常需要3个步骤:一是确定变量集或变量域;二是确定网络的拓扑结构;三是确定局部概率分布。

贝叶斯网络的优点主要包括:一是直观表现了事件的因果关系;二是可以进行“自顶而下”的因果推理和“自底而上”的诊断推理;三是证据可以不完整(黄影平, 2013)。与人工神经网络相比较,贝叶斯网络在处理不确定问题、不完整数据集以及明确因果关系等方面优势显著(杨继琼, 2007)。但贝叶斯网络也存在一些缺陷,现有的概率繁殖算法难以处理庞大的节点数目;而与人工神经网络相比较,贝叶斯网络的数据利用和结构学习能力甚至更低(李硕豪等, 2015)。

### 2.2.2 主要应用

一方面,研究者关注了城市生态脆弱性以及灾害风险,如Balbi等(2016)采用空间显式贝叶斯网络评估了瑞士苏黎世市的洪灾风险,认为改进预警系统将减少75%的死亡率和25%的受伤率;黎斌等(2018)基于生态用地历史变化与生态适应性2个角度,采用贝叶斯网络划定邻鄂州市城市生态红线。另一方面,也有研究关注了城市资源管理,如卢文喜等(2011)将贝叶斯网络应用到水资源管理之中,认为若要兼顾水环境保护和农民增收2个目标,合理的补偿款金额为7500元/hm<sup>2</sup>;Froelich(2015)基于

动态高斯贝叶斯网络(DGBN)模型预测了城市日常用水需求,认为模拟效果优于基于网络结构的自动学习模型。此外,一些学者关注了土地利用变化与土地适宜性评价,如Celio等(2014)利用贝叶斯网络对瑞士阿尔卑斯山前地区的土地利用决策进行了建模,认为土地开发者的意图对于改变农业用地类型更为重要;关小东等(2016)采用贝叶斯网络模型评估了大冶市农用地适宜性,从而构建了一种新的基本农田划定方法。

## 3 基于土地利用变化的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型

土地城镇化研究是城镇化与生态环境耦合研究的重要内容。综合地理学和生态学等学科理论,土地城镇化可被理解为由各类自然、半自然地表向以城市功能地域为主的人工地表演变的土地利用变化过程,可在近程尺度与耕地、生态等系统产生直接的关联作用(陆文勋等, 2017; 王甫园等, 2017)。近年来,基于土地利用变化的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型发展较快,并在计算机、GIS等技术的推动下发展为以土地利用变化及效应模型(CLUE/CLUE-S)、元胞自动机(CA)模型和多智能体系统(MAS)模型等为代表的模型家族(邓祥征等, 2009)。

### 3.1 土地利用变化及效应模型

#### 3.1.1 模型介绍

土地利用变化及效应模型是一类基于经验统计的土地利用变化模型,主要分为CLUE(the conversion of land use and its effects)模型及其改进后的CLUE-S(the conversion of land use and its effects at small region extent)模型(唐智华等, 2011)。其中,CLUE模型是一种基于系统理论、综合考虑社会经济和生物物理等驱动因子的多尺度土地利用动态模拟模型,主要应用于大尺度空间研究,而CLUE-S模型在小尺度空间中得到了应用(吴健生等, 2012)。CLUE-S模型分为5个部分,包括4个输入模块(非空间模块)和1个空间分配模块。另外,CLUE-S的建模过程主要包括4个步骤:一是确定主要用地类型的概率分布;二是设定土地利用变化弹性系数;三是预测土地利用需求;四是完成土地利用的空间分配(Verburg et al, 2002)。

CLUE/CLUE-S模型也存在部分局限性。由于

该类模型偏重“人类-环境”耦合系统(Coupled Human-Environment System)中的某一方面,因而导致其只能算是一类“局部均衡分析”(Partial Equilibrium Analysis)模型,难以体现人类活动(如城镇化过程)与土地系统的交互耦合过程(唐华俊等, 2009; 胡喜生等, 2013)。

### 3.1.2 主要应用

土地利用变化及效应模型主要用于多尺度的土地利用空间分配研究之中,如 Orekan(2007)采用 CLUE-S 模型模拟了贝宁中部稀树草原地区的土地利用变化情景,期望为西非地区提供土地可持续利用规划方案; Ahmed 等(2014)以达卡为例,运用 CLUE-S 模型模拟了影响该类特大城市快速发展的驱动因素,并基于 Logistic 回归测试发现该模型的整体表现与其他城市增长模型相一致; Mohamady 等(2017)基于 CLUE-S 和 WetSpa 模型评估了伊朗 Baghsalian 流域土地利用变化对径流参数的影响程度,同时发现该区域土地利用变化主要为森林和牧地向农业和住宅用地类型转变。国内研究在近 10 年来也开始兴起,如周锐等(2011)基于 CLUE-S 和 Markov 模型预测了常熟市辛庄镇这一乡镇小尺度区域的土地利用变化趋势,发现建设用地增长居于主导地位;戴声佩等(2013)通过在 CLUE-S 模型中引入改进后的 Autologistic 回归模型,预测了 5 种情景下的黑河中游土地利用变化趋势。由上可知,CLUE/CLUE-S 模型可模拟多尺度下不同地块类型的交替演化,简单反映城市与生态空间的转换过程,但缺少对耦合机制的有效解释。

## 3.2 元胞自动机模型

### 3.2.1 模型介绍

元胞自动机(Cellular Automata, CA)是一类模拟复杂离散系统动态演化的动力学模型,由 Stanislaw Ulam 和 John von Neumann 在 1940 年代提出(引自赵莉等, 2016)。1970 年,基于 CA 原理的“生命游戏”被开发(Conway, 1970)。之后,随着 3S 和计算机技术的发展,CA 模型被大量用于城市土地系统模拟之中,并在元胞及邻域、空间维度和数据结构等方面被不断改进(赵莉等, 2016)。CA 模型主要由转换规则、元胞、状态和邻域 4 个要素构成(郭欢欢等, 2011)。CA 模型的运转依赖于预先设定的转换规则,其中元胞在  $t$  时刻的状态由前一时刻( $t-1$ )的状态及其邻域状态决定(黎夏等, 2009)。

CA 模型是一类空间信息动态模拟模型,它具

有如下优势:一是基于“自下而上”的建模过程将复杂问题拆解;二是表现为可用计算机语言表达的时空离散化特征;三是不依赖比例尺,可以进行局部和区域的土地系统模拟;四是元胞与 GIS 栅格单元的相似性促成了 2 种方法的集成(秦向东等, 2007)。但是,标准 CA 模型是一类建立在空间均质假设上的理想化模型,难以解决城市土地系统的空间异质问题,需要被拓展和改进(罗平等, 2005)。为此,CA 模型的限制条件被放宽以便加入各类地理控制变量,但加剧了转换规则的复杂性(杨俊等, 2015)。

### 3.2.2 主要应用

部分学者在研究城市扩张时借鉴了元胞自动机思想。Tobler(1979)首次借用元胞自动机概念模拟了美国底特律大都市区的城市扩展过程。之后, Couclelis(1985)基于离散模型理论概括了元胞规则,并奠定了 CA 模型在地理学应用中的潜力和理论框架。Batten(2007)在模拟城市复杂系统时发现,CA 模型的“自下而上”特征导致结果不确定,需要结合分形理论和混沌动力学进行改进; White 等(2008)采用 CA 模型模拟了美国辛辛那提的土地利用模式,并通过真实性检验和敏感性分析认为该模型可用于区域规划之中。CA 模型在国内发展也较快。全泉等(2011)在 GIS 支持下基于 CA 和 MAS 模型预测了上海市 2010 年和 2020 年的城市扩张结果,认为城市建设用地将向东部和南部显著扩张。宇林军等(2013)基于局部化转换规则提高了传统 CA 模型的模拟精度,在一定程度上减少了由于空间均质假设导致的误差。杨青生等(2013)将 CA 模型应用到城市生态安全模拟之中,通过在转换规则中嵌入基于生态安全的  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的城市化元胞,模拟了东莞市综合景观生态安全指数的变化状况。

事实上,城市垂直形态(3D 形态)与密度也可产生直接或间接的生态效应,如黄巍等(2014)在城市 3D 建模的基础上,采用流体力学模型模拟了成都市建成区密度和高度对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响。显然,CA 模型局限于城市平面形态(土地利用类型与格局)的动态模拟,仅能反映城市水平扩展过程及其对生态空间的干扰与挤占。未来,应更多地考虑城市垂直形态、密度等特征产生的生态效应。

## 3.3 多智能体系统模型

### 3.3.1 模型介绍

多智能体系统(Multi-agent System, MAS)模型



是一种建立在复杂自适应系统(Complex Adaptive System,CAS)理论基础上的“自下而上”的动态模拟模型,有效弥补了以往研究对行为、决策等因素的忽视(龙瀛等, 2011)。通过将智能体(Agent)扩展为多个,MAS模型确保了行为主体更加符合实际(陈海等, 2008)。MAS模型既可以展现全局动态过程,还可以解释土地利用变化的动力机制(顾朝林等, 2016)。MAS模型可与CA模型相集成,如刘小平等(2006)基于2类模型的集成构建了城市土地资源可持续发展及规划模型,从环境、宏观和微观决策3个方面揭示了土地利用变化的动力机制。但MAS模型也存在一些缺陷,如正处在理论探讨和初步应用阶段,研究区域被抽象为均质空间,且验证难度较高(田光进等, 2008)。

3.3.2 主要应用

诸多学者基于MAS模型从政策角度模拟了土地系统的演化过程。Le等(2010)提出了一个土地利用动态模拟器(LUDAS)框架用于越南中部山区流域的土地利用变化模拟,该框架基于MAS模型构建了人类-土地耦合系统动力学模型,评估了政策干预对土地复杂系统的相对影响。Abreu等(2013)采用多智能体系统模型来表征土地利用的动态变化过程,并基于Landsat ETM图像对巴西Cer-

rado地区进行了实证。由于MAS模型发展尚不成熟,更多学者尝试将其与CA模型集成。杨青生等(2007)基于CA和MAS模型模拟了城郊地区(樟木头镇)的扩展过程,从而给土地利用变化过程的不确定性提供了地理学解释。李维乾等(2013)基于CA与MAS模型模拟了渭河宝鸡段的水污染扩散过程,以期突发性水污染事件提供预警支撑。在考虑社会经济等驱动因子的基础上,Liu等(2017)也提出构建面向未来的土地利用模拟(FLUS)模型,相比其他模型又加入了背景气候条件。综合来看,土地利用变化驱动力已在模型中不断被完善。

4 模型对比与多模型集成

4.1 模型对比

通过比较上述6种城镇化与生态环境耦合动态模拟模型,可以发现该类模型呈现多元化特征。此外,不同模型的优缺点显著(表1)。

对比可知,SD模型是一类最为综合、简便的模型。在城镇化与生态环境耦合动态模拟中,首先基于系统科学理论将该过程视为复杂人地系统的非线性演化过程。其次,通过构建指标体系确定系统边界和相关变量。再次,根据变量关系完善反馈结

表1 城镇化与生态环境耦合动态模拟模型的对比  
Tab.1 Comparison of dynamic simulation models of urbanization and ecological environment coupling

模型名称	学科背景	模型优点	模型缺点	主要应用
系统动力学	由系统科学理论与计算机仿真结合	建模过程简便,可以同理论与指标体系构建结合,降低系统边界和相关变量的识别难度	难以体现系统自适应特点;空间解释不足;部分反馈关系局限于回归关系	适用于城市复杂系统、城市转型和可持续发展以及城镇化与生态环境单要素耦合动态模拟
人工神经网络	由人工智能和计算机仿真结合	是一种典型的类人脑模型,具有自学习、联想储存和高速寻优3个优势;具有良好的非线性映射逼近性	在学习、因果解释等方面存在缺陷,尤其是不擅长处理不确定性问题	适用于城镇用地扩张、环境演变、污染扩散和资源需求动态模拟
贝叶斯网络	起源于人工智能领域,由概率论、统计学与图论结合	直观表现了事件因果;可以进行因果和诊断2个方向的推理;证据可以不完整;尤其擅长处理不确定问题	现有的算法难以应付庞大的节点数目;学习能力较人工神经网络明显不足	适用于城市生态脆弱性识别以及资源需求动态模拟
土地利用变化及效应模型	由LUCC研究、系统科学理论与计算机仿真结合	基于经验统计,CLUE模型适用于大空间尺度;CLUE-S模型适用于小空间尺度	偏重局部均衡分析;难以体现城镇化过程与土地系统的交互耦合过程	适用于多空间尺度的土地利用空间分配动态模拟
元胞自动机	由LUCC研究、系统科学理论与计算机仿真结合	基于“自下而上”的建模过程将复杂问题拆解;可表现复杂离散系统的动态演化过程;可进行局部/区域土地系统模拟	建立在空间均质假设之上,难以解决空间异质问题;放宽限制条件加剧了转换规则的复杂性;对土地变化的机理解释不足	适用于城市扩展和土地利用变化动态模拟
多智能体系统	由人工智能和复杂性科学结合	基于复杂自适应系统理论,弥补了对政策因素的忽视;既可以展现全局动态过程,还可以解释土地变化的动力机制	尚停留在理论探讨和初步应用阶段;研究空间被抽象为均质空间;模型验证难度较大	适用于政策驱动下的城市扩展和土地利用变化动态模拟

构。最后,根据真实性检验、参数调整等方法提高精度。SD模型可以宏观模拟城镇化与生态环境全要素、单要素的耦合过程,但空间解释较为不足,且难以体现复杂系统的自适应性特征。

其他模型较为专门化,如人工神经网络和贝叶斯网络均起源于AI领域,前者基于非线性映射逼近功能模拟了城镇用地扩张、环境演变、污染扩散和资源需求,后者基于对因果关系的分解处理了城市生态脆弱性识别以及资源需求预测等不确定性问题。CLUE/CLUE-S、CA和MAS模型则分别基于经验统计、空间信息规则以及复杂自适应系统理论,从土地变化角度模拟了城镇化与生态环境耦合过程。由于以上模型的适用面较为狭窄,亟需找到与其他模型的接口。

#### 4.2 基于多模型集成的城镇化与生态环境耦合复合模型

基于不同模型的适宜性,可通过集成方式实现各模型之间的优势互补。其中,以“SD+”复合模型为代表的动态模拟模型得到了广泛应用,并弥补了空间解释不足、无法体现复杂系统自适应性等缺陷。

一方面,将SD模型与GIS集成是人地过程模拟的一个趋势。有的学者由此模拟了由人类活动导致的污染物扩散过程,如Zhang等(2011)基于SD-GIS方法模拟了松花江流域水污染事故突发时硝基苯浓度的时空演化过程,以期为决策者提供可量化的有效信息。更多学者研究了城市系统的可持续发展过程,如Wan等(2016)利用GIS/RS-SD技术模拟了哈大齐工业走廊社会发展与生态环境的协调发展过程,认为该地区是一个典型的人与自然高强度互动区域,应逐步推进PRED协调。另一方面,将SD与CA模型集成也成为一项技术热点,这可以增强对城市土地变化的解释。秦贤宏等(2009)基于SD-CA模型从宏观微观角度模拟了南通市城市用地扩张过程,并从规模变化和空间分布2个方面揭示了城市扩张结果。王行风等(2013)则将SD、CA和GIS三种方法进行了技术融合,以期从经济、社会、环境和工程4个方面模拟矿区土地利用变化的环境累积效应。

不少学者开发了一些其他模型,其中将SD模型和基于主体建模(Agent-Based Modelling, ABM)进行集成是一项正在兴起的技术尝试。Guerrero等(2016)揭示了进行以上技术尝试的初衷,他认为由于SD模型被限制于体现连续、确定性、空间总体性

和固定性等特征,因而难以解决离散、随机性、空间异质性和学习与适应性问题,而ABM模型的优势正在于弥补此类缺陷。Lewe等(2014)则在多模式的城际交通系统模拟中实践了2种模型的集成方法,并总结了并行架构、顺序架构、嵌入架构和协调架构4类集成架构模式。但是,将SD和ABM模型集成会成倍增加计算的复杂度,而且缺乏有效的检验方法(Lewe et al, 2014; Guerrero et al, 2016)。

还有学者尝试集成了SD和CLUE-S模型,如梁友嘉等(2011)基于SD与CLUE-S模型模拟了张掖市甘州区的土地利用变化,并设置了社会经济发展和土地利用需求驱动2种情景;田多松等(2016)则借助该方法模拟了上海崇明岛土地利用变化引起的土壤有机碳储量空间变化情景,认为应通过降低人类活动强度加以抑制。此外,胡健等(2017)在模糊积分(FI)、遗传算法(GA)与神经网络(NN)3类模型集成的基础上,对中国区域能源安全的外生警源进行了模拟。

由于多模型集成的技术难度较大,且缺乏有效的检验方法(即难以判断“真”或“仿真”),这类模型的发展面临着不小的挑战。然而,随着现阶段技术整合和对复杂系统认知的深入,复合模型迎来了快速发展。特别是在复杂性科学的基础上,Batty倡导发展基于多学科整合和多模型集成的、“自下而上”的城市新科学,以期实现城市复杂系统的动态模拟(Batty, 2007, 2008),这对复合模型的下一步发展具有重要指导意义。未来,如何在理论、技术等多层面实现整合,是模拟城镇化与生态环境耦合这一复杂动态过程的关键。

## 5 结论与讨论

由经验描述到过程模拟是地理学发展的趋势,因而城镇化与生态环境耦合研究将跨入动态模拟阶段(傅伯杰, 2017)。选择适宜的模型是动态模拟的核心,进而可通过多情景模拟与优化方案比选为促进可持续城镇化提供决策支持。

总结目前常见的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型,结果发现这类模型呈现多元化。其中,系统动力学是一类由系统科学理论与计算机仿真融合而成的动态仿真模型,已被广泛用于城市复杂系统、城市转型和可持续发展以及城镇化与生态环境单要素耦合的动态模拟之中。但是,空间解释的



不足以及对系统自适应性的忽视也导致模拟结果不理想;人工智能算法(ANN和BN)在自学习、自组织、自适应系统或不确定性系统模拟中具有显著优势,并被用于城市扩张、环境变化、资源需求以及城市生态脆弱性识别的模拟之中,但应用面相对狭窄且限制条件偏多;基于土地利用变化的城镇化与生态环境耦合动态模拟模型(CLUE/CLUE-S、CA和MAS)基于经验统计、空间信息规则以及复杂自适应系统理论模拟了城镇化与生态环境的耦合过程,但局限于土地城镇化视角。基于多模型集成的复合模型实现了各模型之间的优势互补,已成为城镇化与生态环境耦合动态模拟模型的发展趋势。其中,以“SD+”复合模型为代表,主要包括常见的“SD+GIS”和“SD+CA”以及正在兴起的“SD+ABM”等。复合模型在一定程度上弥补了部分单一模型存在的空间解释不足、无法体现复杂系统自适应性等缺陷,在模拟城镇化与生态环境耦合这一复杂时空过程时具有相对较好的效果。但是,由于建模过程的复杂性以及缺乏科学的检验方法,复合模型的发展面临着不小的挑战。

综合来看,SD模型是现阶段最为综合、简便的一种模型。今后,可基于SD模型实现城镇化与生态环境耦合动态模拟模型的两方面突破:一是实现技术层面的改进与集成,以SD模型为接口嵌入其他适宜模型,研发动态模拟集成技术链;二是确保与理论层面的联动,尤其是在远程耦合理论、复杂性科学等新兴理论发展的背景下,如何通过模型改进体现城镇化与生态环境耦合过程的复杂性、动态性、自适应性、多尺度性与级联性等特征,是今后研究的难点和重点。还应注意的是,当前模型侧重于城镇化与生态环境耦合的宏观格局模拟,包括全球与区域尺度或是单一城市的平面形态、土地类型与景观格局,而对城市内部空间结构、三维空间形态和密度等与生态环境的耦合效应关注不足。事实上,可持续城镇化不只包括经济、社会和土地的宏观层面,也包括可持续的微观城市形态。今后,应加强对微观过程的模拟。

## 参考文献(References)

陈海, 梁小英, 高海东, 等. 2008. Multi-Agent System 模型在土地利用/覆盖变化中的研究进展 [J]. 自然资源学报, 23(2): 345-352. [Chen H, Liang X Y, Gao H D, et al. 2008. A review on multi-agent system for the simulation of land-use and land-cover change. Journal of Natural Resources,

23(2): 345-352.]

戴声佩, 张勃. 2013. 基于CLUE-S模型的黑河中游土地利用情景模拟研究: 以张掖市甘州区为例 [J]. 自然资源学报, 28(2): 336-348. [Dai S P, Zhang B. 2013. Land use change scenarios simulation in the middle reaches of the Heihe River Basin based on CLUE-S model: A case of Ganzhou District of Zhangye City. Journal of Natural Resources, 28(2): 336-348.]

邓祥征, 林英志, 黄河清. 2009. 土地系统动态模拟方法研究进展 [J]. 生态学杂志, 28(10): 2123-2129. [Deng X Z, Lin Y Z, Huang H Q. 2009. Simulation of land system dynamics: A review. Chinese Journal of Ecology, 28(10): 2123-2129.]

方创琳, 任宇飞. 2017. 京津冀城市群地区城镇化与生态环境远程耦合能值代谢效率及环境压力分析 [J]. 中国科学(地球科学), 47(7): 833-846. [Fang C L, Ren Y F. 2017. Analysis of emergy-based metabolic efficiency and environmental pressure on the local coupling and telecoupling between urbanization and the eco-environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Scientia Sinica Terrae, 47(7): 833-846.]

方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 2016. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径 [J]. 地理学报, 71(4): 531-550. [Fang C L, Zhou C H, Gu C L, et al. 2016. Theoretical analysis of interactive coupled effects between urbanization and eco-environment in mega-urban agglomerations. Acta Geographica Sinica, 71(4): 531-550.]

付玲, 胡业翠, 郑新奇. 2016. 基于BP神经网络的城市增长边界预测: 以北京市为例 [J]. 中国土地科学, 30(2): 22-30. [Fu L, Hu Y C, Zheng X Q. 2016. The prediction of urban growth boundary based on BP artificial neural networks: An application to Beijing. China Land Science, 30(2): 22-30.]

傅伯杰. 2017. 地理学: 从知识、科学到决策 [J]. 地理学报, 72(11): 1923-1932. [Fu B J. 2017. Geography: From knowledge, science to decision making support. Acta Geographica Sinica, 72(11): 1923-1932.]

顾朝林, 管卫华, 刘合林. 2017. 中国城镇化2050: SD模型与过程模拟 [J]. 中国科学(地球科学), 47(7): 818-832. [Gu C L, Guan W H, Liu H L. 2017. Chinese urbanization 2050: SD modeling and process simulation. Scientia Sinica Terrae, 47(7): 818-832.]

顾朝林, 张悦, 翟炜, 等. 2016. 城市与区域定量研究进展 [J]. 地理科学进展, 35(12): 1433-1446. [Gu C L, Zhang Y, Zhai W, et al. 2016. Progress in urban and regional quantitative research. Progress in Geography, 35(12): 1433-

1446. ]
- 关小东, 何建华. 2016. 基于贝叶斯网络的基本农田划定方法 [J]. 自然资源学报, 31(6): 1061-1072. [Guan X D, He J H. 2016. Prime farmland protection zoning based on Bayesian network. *Journal of Natural Resources*, 31(6): 1061-1072. ]
- 郭欢欢, 李波, 侯鹰, 等. 2011. 元胞自动机和多主体模型在土地利用变化模拟中的应用 [J]. 地理科学进展, 30(11): 1336-1344. [Guo H H, Li B, Hou Y, et al. 2011. Cellular automata model and multi-agent model for the simulation of land use change: A review. *Progress in Geography*, 30(11): 1336-1344. ]
- 胡健, 孙金花. 2017. 基于FI-GA-NN融合的区域能源安全外生警源分级预警研究 [J]. 资源科学, 39(6): 1048-1058. [Hu J, Sun J H. 2017. Early classification warning for regional energy security exogenous sources based on FI-GA-NN model. *Resources Science*, 39(6): 1048-1058. ]
- 胡喜生, 洪伟, 吴承祯. 2013. 福州市土地生态系统服务与城市化耦合度分析 [J]. 地理科学, 33(10): 1216-1223. [Hu X S, Hong W, Wu C Z. 2013. Coupling degrees of land ecosystem services and urbanization of Fuzhou City. *Scientia Geographica Sinica*, 33(10): 1216-1223. ]
- 黄巍, 龙恩深. 2014. 成都PM<sub>2.5</sub>与气象条件的关系及城市空间形态的影响 [J]. 中国环境监测, 30(4): 93-99. [Huang W, Long E S. 2014. The relationship between PM<sub>2.5</sub> and meteorological conditions in Chengdu and the impact of urban spatial morphology. *Environmental Monitoring in China*, 30(4): 93-99. ]
- 黄影平. 2013. 贝叶斯网络发展及其应用综述 [J]. 北京理工大学学报, 33(12): 1211-1219. [Huang Y P. 2013. Survey on Bayesian network development and application. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 33(12): 1211-1219. ]
- 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 2016. 神经网络七十年: 回顾与展望 [J]. 计算机学报, 39(8): 1697-1716. [Jiao L C, Yang S Y, Yang F, et al. 2016. Seventy years beyond neural networks: Retrospect and prospect. *Chinese Journal of Computers*, 39(8): 1697-1716. ]
- 金浩然, 戚伟, 刘振, 等. 2016. 国内外城市转型的研究进展及展望 [J]. 世界地理研究, 25(6): 48-56. [Jin H R, Qi W, Liu Z, et al. 2016. The progress and prospect of studies on urban transformation. *World Regional Studies*, 25(6): 48-56. ]
- 黎斌, 何建华, 屈赛, 等. 2018. 基于贝叶斯网络的城市生态红线划定方法 [J]. 生态学报, 38(3): 1-12. [Li B, He J H, Qu S, et al. 2018. The progress and prospect of studies on urban transformation. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 1-12. ]
- 黎夏, 刘小平, 何晋强, 等. 2009. 基于耦合的地理模拟优化系统 [J]. 地理学报, 64(8): 1009-1018. [Li X, Liu X P, He J Q, et al. 2009. A geographical simulation and optimization system based on coupling strategies. *Acta Geographica Sinica*, 64(8): 1009-1018. ]
- 李明, 张韧, 洪梅. 2018. 基于加权贝叶斯网络的海洋灾害评估与管理 [J]. 海洋开发与管理, (1): 52-59. [Li M, Zhang R, Hong M, et al. 2018. Marine disaster assessment and management based on weighted Bayesian network. *Ocean Development and Management*, (1): 52-59. ]
- 李瑞, 张悟移. 2016. 基于RBF神经网络的物流业能源需求预测 [J]. 资源科学, 38(3): 450-460. [Li R, Zhang W Y. 2016. Energy demand forecast in the logistics sector based on RBF neural networks. *Resources Science*, 38(3): 450-460. ]
- 李少英, 刘小平, 黎夏, 等. 2017. 土地利用变化模拟模型及应用研究进展 [J]. 遥感学报, 21(3): 329-340. [Li S Y, Liu X P, Li X, et al. 2017. Simulation model of land use dynamics and application: Progress and prospects. *Journal of Remote Sensing*, 21(3): 329-340. ]
- 李硕豪, 张军. 2015. 贝叶斯网络结构学习综述 [J]. 计算机应用研究, 32(3): 641-646. [Li S H, Zhang J. 2015. Review of Bayesian networks structure learning. *Application Research of Computers*, 32(3): 641-646. ]
- 李维乾, 解建仓, 李建勋, 等. 2013. 基于元胞自动机与智能体的水污染可视化模拟仿真 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 41(3): 213-220. [Li W Q, Xie J C, Li J X, et al. 2013. Visualization simulation of water pollution based on cellular automata and intelligent agent. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 41(3): 213-220. ]
- 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 2011. 基于SD和CLUE-S模型的张掖市甘州区土地利用情景分析 [J]. 地理研究, 30(3): 564-576. [Liang Y J, Xu Z M, Zhong F L. 2011. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE-S model at regional scale: A case study of Ganzhou District of Zhangye City. *Geographical Research*, 30(3): 564-576. ]
- 刘承良, 颜琪, 罗静. 2013. 武汉城市圈经济资源环境耦合的系统动力学模拟 [J]. 地理研究, 32(5): 857-869. [Liu C L, Yan Q, Luo J. 2013. System dynamics simulation on the coupling of economy resources environment system in Wuhan metropolitan region. *Geographical Research*, 32(5): 857-869. ]
- 刘柯. 2007. 基于主成分分析的BP神经网络在城市建成区面积预测中的应用: 以北京市为例 [J]. 地理科学进展, 26(6): 129-137. [Liu K. 2007. Application of BP neural net-

- work in the prediction of urban Built-up area: A case study of Beijing. *Progress in Geography*, 26(6): 129-137. ]
- 刘树锋, 陈俊合. 2007. 基于神经网络理论的水资源承载力研究 [J]. *资源科学*, 29(1): 99-105. [Liu S F, Chen J H. 2007. Water resources carrying capacity based on the theory of ANN. *Resources Science*, 29(1): 99-105. ]
- 刘小平, 黎夏, 艾彬, 等. 2006. 基于多智能体的土地利用模拟与规划模型 [J]. *地理学报*, 61(10): 1101-1112. [Liu X P, Li X, Ai B, et al. 2006. Multi-agent systems for simulating and planning land use development. *Acta Geographica Sinica*, 61(10): 1101-1112. ]
- 刘艳艳, 王少剑. 2015. 珠三角地区城市化与生态环境的交互胁迫关系及耦合协调度 [J]. *人文地理*, 30(3): 64-71. [Liu Y Y, Wang S J. 2015. Coupling coordinative degree and interactive coercing relationship between urbanization and eco-environment in Pearl River Delta. *Human Geography*, 30(3): 64-71. ]
- 龙瀛, 毛其智, 杨东峰, 等. 2011. 城市形态、交通能耗和环境影响集成的多智能体模型 [J]. *地理学报*, 66(8): 1033-1044. [Long Y, Mao Q Z, Yang D F, et al. 2011. A multi-agent model for urban form, transportation energy consumption and environmental impact integrated simulation. *Acta Geographica Sinica*, 66(8): 1033-1044. ]
- 卢超, 王蕾娜, 张东山, 等. 2011. 水资源承载力约束下小城镇经济发展的系统动力学仿真 [J]. *资源科学*, 33(8): 1498-1504. [Lu C, Wang L N, Zhang D S, et al. 2011. System dynamics simulation of small towns' economy under the constraints of water resources' carrying capacity. *Resources Science*, 33(8): 1498-1504. ]
- 卢万合, 刘继生, 那伟. 2012. 基于系统动力学的资源枯竭型矿业城市产业转型仿真分析: 以吉林省辽源市为例 [J]. *地理科学*, 32(5): 577-583. [Lu W H, Liu J S, Na W. 2012. Industry conversion simulation analysis of resources-exhausted mining city based on the system dynamics: Taking Liaoyuan City of Jilin Province as example. *Scientia Geographica Sinica*, 32(5): 577-583. ]
- 卢文喜, 罗建男, 鲍新华. 2011. 贝叶斯网络在水资源管理中的应用 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(1): 153-158. [Lu W X, Luo J N, Bao X H. 2011. Application of Bayesian network in water resource management. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(1): 153-158. ]
- 陆文勋, 李峥, 孙鹏举, 等. 2017. 基于脱钩理论的城市化水平与耕地安全水平的近程耦合关系研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 33(11): 968-974. [Lu W X, Li Z, Sun P J, et al. 2017. Neighboring/adjacent coupling relationship between urbanization and farmland safety based on the decoupling theory. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 33(11): 968-974. ]
- 罗平, 耿继进, 李满春, 等. 2005. 元胞自动机的地理过程模拟机制及扩展 [J]. *地理科学*, 25(6): 6724-6730. [Luo P, Geng J J, Li M C, et al. 2005. Mechanism of simulating geographic process and extension of cellular automata. *Scientia Geographica Sinica*, 25(6): 6724-6730. ]
- 秦贤宏, 段学军, 李慧, 等. 2009. 基于SD和CA的城镇土地扩展模拟模型: 以江苏省南通地区为例 [J]. *地理科学*, 29(3): 439-444. [Qin X H, Duan X J, Li H, et al. 2009. Urban land expansion simulation model based on SD and CA: A case study of Nantong City. *Scientia Geographica Sinica*, 29(3): 439-444. ]
- 秦向东, 闵庆文. 2007. 元胞自动机在景观格局优化中的应用 [J]. *资源科学*, 29(4): 85-91. [Qin X D, Min Q W. 2007. Application of cellular automata in landscape pattern optimization. *Resources Science*, 29(4): 85-91. ]
- 仇保兴. 2017. 城市规划学新理性主义思想初探: 复杂自适应系统(CAS)视角 [J]. *城市发展研究*, 24(1): 1-8. [Qiu B X. 2017. A preliminary research on the neo-rationality in urban planning: From the perspective of complex adaptive system (CAS). *Urban Development Studies*, 24(1): 1-8. ]
- 全泉, 田光进, 沙默泉. 2011. 基于多智能体与元胞自动机的上海城市扩展动态模拟 [J]. *生态学报*, 31(10): 2875-2887. [Quan Q, Tian G J, Sha M Q. 2011. Dynamic simulation of Shanghai urban expansion based on multi-agent system and cellular automata model. *Acta Ecologica Sinica*, 31(10): 2875-2887. ]
- 史志富. 2012. 贝叶斯网络理论及其在军事系统中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社. [Shi Z F. 2012. Bayesian network theory and its application in military systems. Beijing, China: National Defense Industry Press. ]
- 宋学锋, 刘耀彬. 2006. 基于SD的江苏省城市化与生态环境耦合发展情景分析 [J]. *系统工程理论与实践*, (3): 124-130. [Song X F, Liu Y B. 2006. Scenarios simulation of urbanization and ecological environment coupling in Jiangsu Province by system dynamic model. *Systems Engineering—Theory & Practice*, (3): 124-130. ]
- 孙黄平, 黄震方, 徐冬冬, 等. 2017. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制 [J]. *经济地理*, 37(2): 163-170. [Sun H P, Huang Z F, Xu D D, et al. 2017. The spatial characteristics and drive mechanism of coupling relationship between urbanization and eco-environment in the Pan Yangtze River Delta. *Economic Geography*, 37(2): 163-170. ]
- 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 2009. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展 [J]. *地理学报*, 64(4): 456-468. [Tang H J, Wu W B, Yang P, et al. 2009. Recent progresses



- of land use and land cover change (LUCC) models. *Acta Geographica Sinica*, 64(4): 456-468. ]
- 唐志鹏, 张进, 刘卫东. 2010. 自然过程与人文过程模拟之差异比较分析 [J]. *地理学报*, 65(12): 1581-1590. [Tang Z P, Zhang J, Liu W D, et al. 2010. A comparative study on the differences of physical process and human process modeling. *Acta Geographica Sinica*, 65(12): 1581-1590. ]
- 唐智华, 朱现龙, 李成. 2011. 土地利用/土地覆被变化 CLUE-S 模型与应用分析: 以扬州市为例 [J]. *地球信息科学学报*, 13(5): 695-700. [Tang Z H, Zhu X L, Li C. 2011. Analysis of land use/land cover change in Yangzhou City based on CLUE-S model. *Journal of Geo-information Science*, 13(5): 695-700. ]
- 田多松, 傅碧天, 吕永鹏, 等. 2016. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 25(4): 613-620. [Tian D S, Fu B T, Lv Y P, et al. 2016. Effect of regional land-use change on soil organic carbon storage based on SD and CLUE-S model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 25(4): 613-620. ]
- 田光进, 鄢建国. 2008. 基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展 [J]. *生态学报*, 28(9): 4451-4459. [Tian G J, Wu J G. 2008. Simulating land use change with agent-based models: Progress and prospect. *Acta Ecologica Sinica*, 28(9): 4451-4459. ]
- 王甫园, 王开泳, 陈田, 等. 2017. 城市生态空间研究进展与展望 [J]. *地理科学进展*, 36(2): 207-218. [Wang F Y, Wang K Y, Chen T, et al. 2017. Progress and prospect of research on urban ecological space. *Progress in Geography*, 36(2): 207-218. ]
- 王其藩. 1999. 复杂大系统综合动态分析与模型体系 [J]. *管理科学学报*, 2(2): 17-21. [Wang Q F. 1999. Comprehensive and dynamic analysis and model set of large complex system. *Journal of Management Sciences in China*, 2(2): 17-21. ]
- 王如松, 欧阳志云. 2012. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展 [J]. *中国科学院院刊*, 27(3): 337-345. [Wang R S, Ouyang Z Y. 2012. Social-economic-natural complex ecosystem and sustainability. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 27(3): 337-345. ]
- 王行风, 汪云甲, 李永峰. 2013. 基于 SD-CA-GIS 的环境累积效应时空分析模型及应用 [J]. *环境科学学报*, 33(7): 2078-2086. [Wang X F, Wang Y J, Li Y F. 2013. Analysis and assessment model of environmental cumulative effects based on the integration of SD, CA and GIS methods and its application. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 33(7): 2078-2086. ]
- 吴健生, 冯喆, 高阳, 等. 2012. CLUE-S 模型应用进展与改进研究 [J]. *地理科学进展*, 31(1): 3-10. [Wu J S, Feng Z, Gao Y, et al. 2012. Recent progresses on the application and improvement of the CLUE-S model. *Progress in Geography*, 31(1): 3-10. ]
- 邢文训, 谢金星. 2006. 现代优化计算方法 [M]. 北京: 清华大学出版社. [Xing W X, Xie J X. 2006. Modern optimization calculation methods. Beijing, China: Tsinghua University Press. ]
- 徐建华. 2010. 地理建模方法 [M]. 北京: 科学出版社. [Xu J H. 2010. Geomodeling methods. Beijing, China: Science Press. ]
- 严冬, 李爱农, 南希, 等. 2016. 基于 Dyna-CLUE 改进模型和 SD 模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究: 以岷江上游地区为例 [J]. *地球信息科学学报*, 18(4): 514-525. [Yan D, Li A N, Nan X, et al. 2016. The study of urban land scenario simulation in mountain area based on modified Dyna-CLUE model and SDM: A case study of the upper reaches of Minjiang River. *Journal of Geo-information Science*, 18(4): 514-525. ]
- 杨继琼. 2007. 基于 Netica 的贝叶斯网络结构的设计与实现 [D]. 昆明: 云南大学. [Yang J Q. 2007. Design and implementation of Bayesian network structure based on Netica. Kunming, China: Yunnan University. ]
- 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 2015. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟: 以大连经济技术开发区为例 [J]. *地理学报*, 70(3): 461-475. [Yang J, Xie P, Xi J C, et al. 2015. LUCC simulation based on the cellular automata simulation: A case study of Dalian economic and technological development zone. *Acta Geographica Sinica*, 70(3): 461-475. ]
- 杨青生, 黎夏. 2007. 多智能体与元胞自动机结合及城市用地扩张模拟 [J]. *地理科学*, 27(4): 542-548. [Yang Q S, Li X. 2007. Mechanism of simulating geographic process and extension of cellular automata. *Scientia Geographica Sinica*, 27(4): 542-548. ]
- 杨青生, 乔纪纲, 艾彬. 2013. 基于元胞自动机的城市生态安全格局模拟: 以东莞市为例 [J]. *应用生态学报*, 24(9): 2599-2607. [Yang Q S, Qiao J G, Ai B. 2013. Simulation of urban ecological security pattern based on cellular automata: A case of Dongguan City, Guangdong Province of South China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(9): 2599-2607. ]
- 杨晓帆, 陈廷槐. 1994. 人工神经网络固有的优点和缺点 [J]. *计算机科学*, 21(2): 23-26. [Yang X F, Chen T H. 1994. The inherent advantages and disadvantages of artificial neural networks. *Computer Science*, 21(2): 23-26. ]

- 宇林军, 孙丹峰, 彭仲仁, 等. 2013. 基于局部化转换规则的元胞自动机土地利用模型 [J]. 地理研究, 32(4): 671-682. [Yu L J, Sun D F, Peng Z R, et al. 2013. A cellular automata land use model based on localized transition rules. *Geographical Research*, 32(4): 671-682. ]
- 张连文, 郭海鹏. 2006. 贝叶斯网引论 [M]. 北京: 科学出版社. [Zhang L W, Guo H P. 2006. *Introduction to Bayesian networks*. Beijing, China: Science Press. ]
- 张晓瑞, 方创琳, 王振波, 等. 2013. 基于RBF神经网络的城市建成区面积预测研究: 兼与BP神经网络和线性回归对比分析 [J]. 长江流域资源与环境, 22(6): 691-697. [Zhang X R, Fang C L, Wang Z B, et al. 2013. Prediction of urban built-up area based on RBF neural network: Comparative analysis with BP neural network and linear regression. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 22(6): 691-697. ]
- 张颖, 高倩倩. 2015. 基于灰色模型和模糊神经网络的综合水质预测模型研究 [J]. 环境工程学报, 9(2): 537-545. [Zhang Y, Gao Q Q. 2015. Comprehensive prediction model of water quality based on Grey model and fuzzy neural network. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 9(2): 537-545. ]
- 张子珩, 濮励杰, 周秀慧. 2010. 乌海市可持续发展的系统动力学模型仿真 [J]. 干旱区资源与环境, 24(12): 55-60. [Zhang Z H, Pu L J, Zhou X H. 2010. System dynamic model for sustainable development of Wuhai City. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 24(12): 55-60. ]
- 赵莉, 杨俊, 李闯, 等. 2016. 地理元胞自动机模型研究进展 [J]. 地理科学, 36(8): 1190-1196. [Zhao L, Yang J, Li C. 2016. System dynamic model for sustainable development of Wuhai City. *Scientia Geographica Sinica*, 36(8): 1190-1196. ]
- 周锐, 苏海龙, 王新军, 等. 2011. 基于CLUE-S模型和Markov模型的城镇土地利用变化模拟预测: 以江苏省常熟市辛庄镇为例 [J]. 资源科学, 33(12): 2262-2270. [Zhou R, Su H L, Wang X J, et al. 2011. Land use scenarios simulation based on CLUE-S and Markov composite model. *Resources Science*, 33(12): 2262-2270. ]
- 朱大奇. 2006. 人工神经网络原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社. [Zhu D Q. 1999. *Principle and application of artificial neural network*. Beijing, China: Science Press. ]
- 朱杰, 管卫华. 2009. 产业视角下常州城市可持续发展SD模型 [J]. 地理与地理信息科学, 25(3): 58-62. [Zhu J, Guan W H. 2009. SD model on sustainable development in Changzhou from industry perspective. *Geography and Geo-Information Science*, 25(3): 58-62. ]
- 左其亨. 2007. 人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型 [J]. 自然资源学报, 22(2): 268-274. [Zuo Q T. 2007. The embedded system dynamic model used to human-water system modeling. *Journal of Natural Resources*, 22(2): 268-274. ]
- Abreu C G, Zaghetto A, Macchiavello B, et al. 2013. A multi-agent model system for land-use change simulation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 42(4): 30-46.
- Ahmed S J, Bramley G, Verburg P H. 2014. Key driving factors influencing urban growth: Spatial-statistical modelling with CLUE-S [M]. Berlin, Germany: Springer.
- Balbi S, Villa F, Mojtahed V, et al. 2016. A spatial Bayesian network model to assess the benefits of early warning for urban flood risk to people [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 16(6): 1323-1337.
- Bao C, Chen X. 2017. Spatial econometric analysis on influencing factors of water consumption efficiency in urbanizing China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 27(12): 1450-1462.
- Batten D F. 2007. Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals, by Michael Batty [J]. *Journal of Regional Science*, 47(3): 624-627.
- Batty M. 2007. Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals [M]. Cambridge, America: The MIT Press.
- Batty M. 2008. The size, scale, and shape of cities [J]. *Science*, 319: 769-771.
- Cai M, Yin Y, Xie M. 2009. Prediction of hourly air pollutant concentrations near urban arterials using artificial neural network approach [J]. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 14(1): 32-41.
- Celio E, Koellner T, Grêt-Regamey A. 2014. Modeling land use decisions with Bayesian networks: Spatially explicit analysis of driving forces on land use change [J]. *Environmental Modelling & Software*, 52: 222-233.
- Conway J. 1970. Game of life [J]. *Scientific American*, 223: 120-123.
- Couclelis H M. 1985. Cellular worlds: A framework for modeling micro-macro dynamics [J]. *Environment & Planning A*, 17(5): 585-596.
- Egilmez G, Tatari O. 2012. A dynamic modeling approach to highway sustainability: Strategies to reduce overall impact [J]. *Transportation Research Part A*, 46(7): 1086-1096.
- Fang C L, Liu H M, Li G D. 2016. International progress and evaluation on interactive coupling effects between urbanization and the eco-environment [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 26(8): 1081-1116.

- Fang W, An H, Li H, et al. 2017. Accessing on the sustainability of urban ecological-economic systems by means of a coupled energy and system dynamics model: A case study of Beijing [J]. *Energy Policy*, 100: 326-337.
- Feng Y Y, Chen S Q, Zhang L X. 2013. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions: A case study of Beijing, China [J]. *Ecological Modelling*, 252: 44-52.
- Forrester J W. 1958. Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers [J]. *Harvard Business Review*, 36(4): 37-66.
- Froelich W. 2015. Forecasting daily urban water demand using dynamic gaussian Bayesian network [J]. *Communications in Computer & Information Science*, 521: 333-342.
- Guan D, Gao W, Su W, et al. 2011. Modeling and dynamic assessment of urban economy-resource-environment system with a coupled system dynamics-geographic information system model [J]. *Ecological Indicators*, 11(5): 1333-1344.
- Guerrero C N, Schwarz P, Slinger J H. 2016. A recent overview of the integration of system dynamics and agent-based modelling and simulation [C]// *Proceedings of the 34th International Conference of the System Dynamics Society*. Delft, Netherlands: 1-13.
- Haykin S S. 2008. *Neural networks and learning machines* [M]. Englewood, NJ: Prentice Hall.
- He C, Okada N, Zhang Q, et al. 2006. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China [J]. *Applied Geography*, 26(3-4): 323-345.
- Hopfield J J. 1982. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities [J]. *PNAS*, 79(8): 2554-2558.
- Le Q B, Park S J, Vlek P L G. 2010. Land use dynamic simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system: 2. Scenario-based application for impact assessment of land-use policies [J]. *Ecological Informatics*, 5(3): 203-221.
- Lee J H W, Huang Y, Dickman M, et al. 2003. Neural network modelling of coastal algal blooms [J]. *Ecological Modelling*, 159(2-3): 179-201.
- Lewe J H, Hivin L F, Mavris D N. 2014. A multi-paradigm approach to system dynamics modeling of intercity transportation [J]. *Transportation Research Part E*, 71: 188-202.
- Li F, Sun Y, Li X, et al. 2016. Research on the sustainable development of green-space in Beijing using the dynamic systems model [J]. *Sustainability*, 8(10): 965-981.
- Li J P, Duan H M, Qiu M. 2014. Study on urban sustainable development based on system dynamics [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 587-589: 171-175.
- Li Y F, Li Y, Zhou Y, et al. 2012. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment [J]. *Journal of Environmental Management*, 98(1): 127-133.
- Liu J G, Hull V, Batistella M, et al. 2013. Framing sustainability in a telecoupled world [J]. *Ecology & Society*, 18(2): 344-365.
- Liu X P, Liang X, Li X, et al. 2017. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. *Landscape & Urban Planning*, 168: 94-116.
- Mavrommati G, Bithas K, Panayiotidis P. 2013. Operationalizing sustainability in urban coastal systems: A system dynamics analysis [J]. *Water Research*, 47(20): 7235-7250.
- Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. 1972. *The limits to growth* [M]. New York: Universe Books.
- Mohammady M, Moradi H R, Zeinivand H, et al. 2017. Modeling and assessing the effects of land use changes on runoff generation with the CLUE-S and WetSpa models [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, (2): 1-13.
- Orekan V O A. 2007. Implementation of the local land-use and land-cover change model CLUE-S for central Benin by using socio-economic and remote sensing data [R]. Bonn, Germany: Universitäts und Landesbibliothek Bonn: 1-204.
- Rosenblatt F. 1958. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain [J]. *Psychological Review*, 65(6): 386.
- Su Y M. 2015. The research of urban development system model based on system dynamics [J]. *Advanced Materials Research*, 926-930: 4394-4397.
- Tirelli T, Pessani D. 2011. Importance of feature selection in decision-tree and artificial-neural-network ecological applications [J]. *Ecological Informatics*, 6(5): 309-315.
- Tobler W R. 1979. *Cellular geography* [M]// Gale S, Olsson G. *Philosophy in geography. Theory and Decision Library*, Vol 20. Springer, Dordrecht.
- Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model [J]. *Environmental Management*, 30(3): 391-405.
- Viotti P, Liuti G, Genova P D. 2002. Atmospheric urban pollution: Applications of an artificial neural network (ANN) to the city of Perugia [J]. *Ecological Modelling*, 148(1): 27-46.



- Wan L, Zhang Y, Qi S, et al. 2016. A study of regional sustainable development based on GIS/RS and SD model: Case of Hadaqi industrial corridor [J]. *Journal of Cleaner Production*, 142: 654-662.
- White R, Engelen G, Uljee I. 2008. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics [J]. *Environment and Planning B*, 24(3): 323-343.
- Yao L, Liu J, Wang R, et al. 2015. A qualitative network model for understanding regional metabolism in the context of social-economic-natural complex ecosystem theory [J]. *Ecological Informatics*, 26(1): 29-34.
- Zhang B, Qin Y, Huang M, et al. 2011. SD-GIS-based temporal-spatial simulation of water quality in sudden water pollution accidents [J]. *Computers & Geosciences*, 37(7): 874-882.

## Progress in dynamic simulation modeling of urbanization and ecological environment coupling

CUI Xuegang<sup>1,2</sup>, FANG Chuanglin<sup>1\*</sup>, LI Jun<sup>3</sup>, LIU Haimeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The development trend of geographical science indicates that the research on urbanization and ecological environment coupling will move from quantitative description to dynamic simulation. At present, the dynamic simulation models of urbanization and ecological environment coupling are diverse. This article reviewed and summarized four common types of models, including system dynamics model, artificial intelligence algorithm, land use change model, and composite model. The main conclusions are as follows: 1) System dynamics models are widely used in the dynamic simulation of urban complex nonlinear systems, urban transition and sustainable development, and urbanization and ecological environment elements coupling. However, spatial interpretation is insufficient and system adaptability is ignored. 2) Artificial intelligence algorithm has significant advantages in simulating self-learning, self-organizing, and adaptive systems, as well as uncertain systems. It is applied to identify urban expansion, environmental change, resource demand, and ecological vulnerability, but the application range is narrow. 3) Land use change models are limited to the simulation of urbanization and ecological environment coupling under the condition of land transfer to urban use. 4) To achieve complementarities between the various models, it has become a trend to develop composite models based on multi-model integration. In the future, we should develop dynamic simulation models from both the technical and theoretical aspects, and strengthen the simulation of microscopic processes.

**Keywords:** urbanization and ecological environment coupling; dynamic simulation; system dynamics model; artificial intelligence algorithm; land use change model; composite model