

城市与区域定量研究进展

顾朝林^{1*}, 张悦¹, 翟炜¹, 管卫华², 李强³, 赵娜⁴, 刘晨⁵

(1. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;
3. 中国人民解放军95806部队, 北京 100076; 4. 中国科学院地理与资源科学研究所, 北京 100101;
5. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要:本文系统地梳理了城市与区域的定量研究方法, 主要包括数理模型和模拟方法、单个城市增长和动力系统研究、城市系统动力学模型及其发展过程模拟研究、空间一般均衡模型研究以及多模型复合/集成系统研究等。主要结论为: 1950年以前的城市与区域研究主要采取时间序列预测法, 依靠历史资料的时间数列进行趋势外推研究; 1960-1970年代主要采用数理统计分析方法, 应用人口统计学模型和线性回归方法进行研究; 1970-1980年代, 随着系统科学的发展, 采用系统分析方法发展了诸如交通、人口、土地等专业模型, 展开对城市与区域问题的深入分析; 1990-2000年代, 研究数据的获取手段得到极大的改善, 利用数据模型、地计算分析、模拟预测等分析手段使得研究的深度和广度均有了长足进步。近年来, 由于空间数据挖掘的突破, 大数据、云计算和巨型模型系统开始进入城市与区域研究领域, 多模型复合/集成系统研究成为主要研究方向。

关键词:城市; 区域; 定量研究; 数学模型; 元胞自动机; 多智能体; 数量经济模型; 系统动力学模型

1 引言

中国城市化正在进入加速发展时期。关于中国城市化的过程、最终状态、驱动因子越来越得到人们的关注。但相关研究大多基于定性的分析, 缺乏理性研究和深入的定量研究。本文试图就世界各国的城镇化研究中的定量研究进行综述, 揭示城市与区域定量研究的进展, 可为中国城市化研究提供参考。根据定量分析和建成模型的复杂程度, 将城市与区域的定量研究方法划分为数理模型、元胞自动机与智能体模型、数量经济模型、系统动力学模型和多模型复合/集成系统5种类型。

2 数理模型和模拟方法

数学模型在城市和区域规划领域的应用, 可追

溯至20世纪中叶。当时运用的模型以数理统计模型为主, 例如简单的统计模型等(张伟等, 2000)。早期的城市和城市定量研究, 主要采用时间序列回归分析和Logistic方程2种方法。

2.1 时间序列回归分析

国内外早期的城镇化研究尤其城镇化水平预测, 主要采取时间序列预测法, 依靠历史资料的时间数列进行趋势外推研究, 常用于时间序列预测的方法有算术平均法、加权序时平均法、移动平均法、加权移动平均法、趋势预测法、指数平滑法等(Wilson, 1974)。在中国, 许学强等(1986)在研究城镇化的省际差异时进行了城镇化水平的时间序列分析; 简新华等(2010)通过定性分析和时间序列预测法, 预测2020年中国的城镇化率将达到60%左右。此外, 还有学者利用MGM-Markov模型(石留杰等, 2010)、GM(1, 1)模型(白先春等, 2006)、ARIMA(陈

收稿日期: 2016-08; 修订日期: 2016-11。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590844); 清华大学自主科研计划项目(2015THZ01) [Foundation: Major Program of the National Natural Science Foundation of China, No.41590844; Tsinghua University Initiative Scientific Research Program, No.2015THZ01]。

作者简介: 顾朝林(1958-), 男, 教授, 研究方向为城市与区域规划, E-mail: gucl@tsinghua.edu.cn。

引用格式: 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[J]. Progress in Geography, 35(12): 1433-1446.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.12.001

夫凯等, 2014)、灰色 Verhulst 模型(曹飞, 2014)、神经网络模型(丁刚, 2008)等进行中国城镇化水平预测。刘青等(2013)则在指数平滑、灰色预测与回归预测 3 种方法基础上, 建立了 IOWHA 算子组合预测模型。

2.2 逻辑斯蒂方程

逻辑斯蒂方程(Logistic Function)属于多变量分析, 是社会学、生物统计学等统计实证分析的常用方法^①。1975 年美国城市地理学家诺瑟姆采用逻辑斯蒂方程进行发达国家的城市化水平回归分析, 发现城市化水平满足逻辑斯蒂方程并提出了“诺瑟姆曲线”, 即: 城市化进程呈现一条被拉平的倒 S 型曲线(Northam, 1975)。

在中国, 顾朝林(1992)较早将逻辑斯蒂曲线模型应用于中国城镇化研究, 采用 1949-1985 年全国城镇人口数据, 获得了中国城镇人口的逻辑斯蒂回归方程:

$$P1 = 75000 / (1 + e^{96.15915 - 0.048107t}) \quad (1)$$

$$P2 = 115000 / (1 + e^{96.15915 - 0.048107t}) \quad (2)$$

回归模型的相关系数 $R = -0.94545223$, 预测得出 2010、2030、2040、2050 年城镇化水平分别为 61%、65%、69% 和 73%(表 1)。

但是, 饶会林(1999)也利用诺瑟姆曲线对 1949 年以来中国的城镇化进程进行实证研究, 认为中国的案例并不符合标准的“S”型曲线。2000 年以来, 李文溥等(2002)、陈彦光等(2005)、屈晓杰等(2005)等借助 Logistic 模型的理论分析和城市系统指数模型的特征尺度修正和完善了诺瑟姆曲线。方创琳等(2008)、王建军等(2009)的研究进一步肯定中国城镇化过程可以采用诺瑟姆曲线进行描述。方创

琳(2009)用 Logistic 曲线模型预测: 到 2020 年, 中国城镇化水平为 54.45%, 2030 年为 61.63%, 2050 年将达到 70%; 陈彦光(2011)基于 Logistic 函数发展了第 3 种模型, 运用 3 种函数分别刻画单对数关系、双对数关系和分对数关系; 陈明星等(2011)发现诺瑟姆曲线中的加速阶段实际包含了加速和减速的 2 个子阶段; 马晓河(2011)以中国 1978-2008 年城镇化发展的历史数据为基础, 利用 Logistic 曲线预测 2030 年中国城镇化水平将达到 65.69%; 曹飞(2012)结合结构突变理论和 Logistic 模型, 预测 2030 年中国城镇化水平将达到 70% 左右。

3 元胞自动机与智能体模型

城市研究工作者最初依据城市发展的规律, 采用数学或物理学方法建立城市与区域模型。城市模型在计算机技术的支持下, 成功地应用于城市和城镇化研究, 其中元胞自动机(CA)模型和智能体(Agent)模型最具代表性。

3.1 城市与区域模型

从劳利模型(Lowry, 1964)建立以来, 城市和区域规划研究开始注重数学模型的应用, 并且模型构建以演绎为主(张伟等, 2000), 另一方面计算机的迅速发展也使得模型的应用更加广泛。1980 年前后城市与区域规划模型的方法趋于完善, 除去概率论和数理统计模型, 其他方法如运筹学、数学物理、模糊数学等方法也在城市与区域规划分析中广泛应用, 其中区域人口分布、产业结构演化、市政和基础设施配置、城镇空间相互作用、交通方式和交通网络、城市增长过程模拟等成为国外城市和区域定量研究的新亮点(Zeleny, 1980; Batten, 1982; Allen et al, 1984; Pumain et al, 1986)。后来, 随着人工智能科学(AI)的发展, 相继开展诸如耗散结构城市、协同城市、分形城市、网络城市等原型城市模型研究(陈彦光, 2003)。

3.2 元胞自动机(CA)模型

尽管在 1940 年代末美国数学家斯塔尼斯拉夫·乌拉姆(Ulam, 1961)和约翰·冯·诺依曼(Neumann, 1944)就发明了元胞自动机(Cellular Automata, CA)

表 1 早期的中国城镇化水平预测

Tab.1 China's urbanization level forecast in early years

年份	全国人口/万	市镇人口/万	城镇化水平/%
2020	137940	84452.4	61.24
2030	143680	93986.2	65.41
2040	146110	101036.6	69.15
2050	144970	105949.2	73.08

资料来源: 世界银行 1984 年预测方案(B)(引自顾朝林, 1992)。

①逻辑斯蒂方程, 即: 常微分方程: $dN/dt = rN(K-N)/K$ 。式中: N 为人口数量; t 为时间; r 为人口增长潜力指数; K 为人口最大容量。诺瑟姆把城市化进程分为以下 3 个阶段: a. 城市化起步阶段。城市化水平较低, 发展速度也较慢, 农业占据主导地位; b. 城市化加速阶段。当城市化水平超过 30% 时, 人口向城市迅速聚集, 进入了快速提升阶段; c. 城市化成熟阶段。当城市化水平达到 70% 时, 城市化增长率缓慢下降, 并渐渐逼近最大容纳量。

概念,并利用CA模拟了复杂动态系统^②;1960年代末英国数学家约翰·H·康威采用CA模型设计了著名的生命游戏(the "Game of Life")^③,但直到1970年代美国Tobler(1979)才将CA模型用来模拟底特律城市发展。1980年代以后,由于3S技术和互联网、计算机技术的飞速发展,城市与区域模型的研究在原有区域科学和规划理论的基础上进入了模型分析的新时代,城市与区域模型也从确定性模型转向随机性模型,从静态模型转向动态模型(张伟等, 2000)。为进一步揭示城市增长模型的空间动力机制和复杂性,基于栅格的地理信息处理技术和编程技术相结合的元胞自动机(CA)分析成为重要的方法(图1)。Couclelis(1988)应用CA模型研究了啮齿类动物种群复杂的空间动态过程,并将其研究成果应用到大都市的宏观结构和微观行为研究;Phipps(1992)将CA模型应用于人口、城镇和生态系统并探索从地方和全球尺度的复杂结构。到1990年代, Batty等(1994)应用CA原理发表了著名的“从细胞到城市”一文,正式开启了CA城市模型的研究; White等运用CA模型分析城市土地利用分形形态的演化过程(White et al, 1993),并应用约束型CA模型进行城市土地利用动态高分辨率建模研究(White et al, 1997);Wu等将CA模型、GIS和层次分析法结合模拟城市建成区用地演变过程(Wu, 1998; Wu et al, 1998);Li等(2000)则将CA模型与GIS相结合构建了可持续城市发展模型。此外,还有一些研究集中在城市规划(Itami, 1994)和工程遥感(Chen et al, 2002)领域;有些研究证明了CA模型在评估城市发展中具有重要价值(Wagner, 1997; Batty et al, 1999; Wu, 2002)。进入21世纪, Portugali (2012)提出基于元胞空间自由智能体框架的FACS模型;Batty(2005)结合地理信息系统GIS的建模方法进一步推进了可视化多情景城市空间增殖模拟分析方法。

在中国,周成虎等(1999)出版了专著《地理元胞自动机研究》;黎夏等(1999, 2001, 2002)分别探索了约束性单元自动演化CA模型、神经网络的单元自动机CA模型以及主成分分析与CA模型结合,进行城市空间模拟和优化;张显峰等(2000)探索了GIS

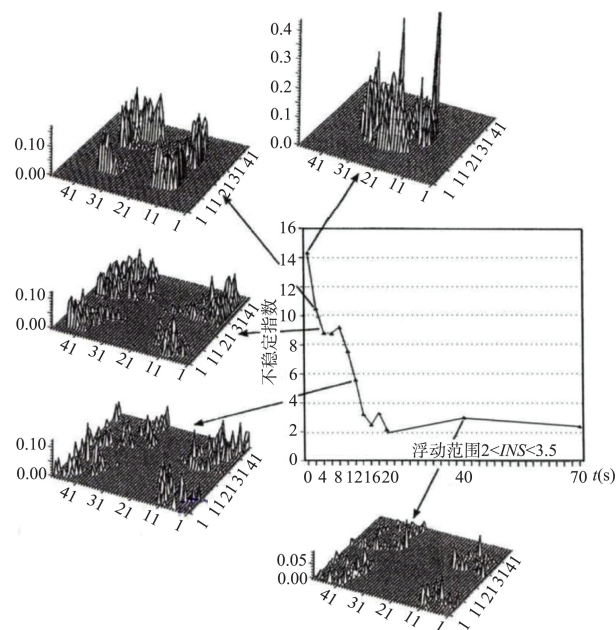


图1 元胞自动机(CA)城市时空模型研究
案例(Portugali, 2000)

Fig.1 A case of cellular automata in an urban spatiotemporal model (Portugali, 2000)

和CA模型的时空建模方法;陈彦光等(2000)进行了CA与城市系统的空间复杂性模拟研究;杜宁睿等(2001)进行了CA在城市时空演化过程中的模拟研究。此外,还有何春阳等(2002)用CA模型进行城市空间动态研究、武晓波等(2002)将CA模型用于海口城市发展模拟、王红等(2002)将CA模型应用于南京城市演化预测研究等,CA模型方法在中国城市扩展模拟研究中已得到广泛应用。

由于城市系统的复杂性和CA模型更注重空间模拟时空变化,对城市发展演化的自然、社会、经济、基础设施等驱动因素解释不够,导致了CA模型应用研究的深度和广度受到影响。

3.3 智能体(Agent)模型

自1950年代人工智能创始人麦卡锡提出智能体(Agent)思想以来,智能体理论与方法取得了很大进展,并被应用到许多领域。由于智能体具有智能性和社会交互性,可作为复杂系统的模型化研究基础(Glansdorff et al, 1971)。虽然Agent的定义至今还存在争议^④,但该领域的研究仍然层出不穷

②Cellular Automata Laboratory, <http://www.fourmilab.ch/cellab/manual/chap5.html>。

③<https://drawception.com/game/NWLct2ZnS8/conways-game-of-life-cellular-automata/>。

④Redlands Institute. What is Agent Analyst? <http://www.institute.redlands.edu/agentanalyst/AgentAnalyst.html>。

(Wooldridge et al, 1995)。在不断地研究探索过程中, Franklin 等(1996)、Epstein(1999)、Torrens(2004)、Macal 等(2005)等逐步对此概念进行诠释。Brown 等(2004)采用智能体分析模型对城市绿带的使用效率进行了模拟及评估; Crooks(2006)将智能体模型和 GIS 结合进行城市研究。在国内, 关于单一智能体 (Agent) 模型在城市研究的应用主要有: 应申(2011)将视域引入智能体研究, 通过 Agent 个体在微观城市空间的行为模拟, 分析城市人流运动与城市布局之间的关系; 梁育填等(2013)以广东省为研究区域, 模拟珠三角地区企业向广东省东西两翼和粤北山区迁移的产业空间变化格局; 肖琳等(2014)基于 Agent 模型, 构建城市扩张占用耕地模型, 探索了政府、居民和农民不同主体采取的决策行为。

3.4 多智能体系统(MAS)模型

近年来, 由于计算机技术和信息技术的突破, 已使得城市研究从单一智能体模型向多智能体模型系统(Multi-agent System, MAS)转变, 开发出面向复杂系统研究的新工具(Wooldridge et al, 1995; 项后军等, 2001)。多智能体的优势不仅在于能呈现全局产生的动态过程, 还可研究空间格局内在机制, 从而弥补 CA 模型关于空间演化动力机制解释的不足。在国外, Batty 等(2003)应用多智能体模型模拟人群的拥挤现象。在国内, 夏冰等(2002)基于多智能体模型进行城市交通诱导系统可视化模拟研究。

美国圣塔菲研究所(SFI)开发了基于多智能体的模拟软件系统 SWARM, 该模型系统是一个高效、可信和可重复的模拟平台(表 2)。SWARM 最早应用于生物领域, 用以解释生物现象的内部机制。SWARM 之所以可以模拟任何自然系统和社会系统, 主要是由于其没有对模型要素交互作用任何限制。薛领等(2003)在 SWARM 模型系统中运用多智能体建模方法, 研究城市中居民、企业个体的空间结构变化过程; 李强等(2015)提出了基于多智能体

系统(Multi-agent System, MAS)和地理信息系统 (GIS)的城市公共安全应急响应动态地理模型, 对北京市公共安全应急响应复杂动态地理过程进行模拟和仿真(图 2)。

4 数量经济模型

在国外, 经济学家长期致力于经济系统的定量研究与过程模拟, 建立了数量经济模型研究范式。城市经济学者和城市研究工作者经常采用宏观经济模型和一般均衡模型进行城市或区域研究。

4.1 宏观经济模型

经济增长与城镇化水平存在相关性, 已被许多学者所证明, 据此城镇化研究构建了宏观经济模型。根据城镇化水平与经济增长存在相关性, Northam(1975)最早采用线性关系建立经济计量模型进行城镇化水平预测。在中国, 周一星(1982)采用对数模型进行回归分析; 张颖等(2003)采用双曲线函数进行回归分析, 开展了中国城镇化与经济增长关系的开拓性研究; 陈明星等(2009)基于 1980-2011 年世界主要国家城镇化和经济发展数据研究了城镇化与经济发展的互动关系; 王凯等(2013)通过中国和其他国家的人均 GDP 与城镇化水平之间关系对中国城镇化水平进行了预测。还有学者研究了城镇化速度与经济增长速度之间的关系(Chen et al, 2014), 并定量分析了 1960-2010 年间的中国城镇化过程与经济发展的关系(Chen et al, 2013)。中国特色新型城镇化发展战略研究课题组通过对农业劳动力向非农产业转移数量, 以及对全国新出生人口和新进入劳动年龄的农村人口数量分析, 测算出 2020 年中国城镇化水平将达到 60%, 2033 年将达到 65%(徐匡迪等, 2013)。高春亮等(2013)结合曲线拟合法、经济模型法和城乡人口比增长率法进行城镇化水平预测, 预计到 2030 年中国城镇化水平将达到 68.38%, 2050 年将达到 81.63%。

表2 基于多智能体的模拟软件系统 SWARM
Tab.2 SWARM: Simulation software based on multi-agent system

名称	开发机构	特点	开发语言	版权许可	网址
SWARM	圣塔菲研究所 (SFI)	该模型中包含系列仿真库, 系统整体而言使用性能良好, 能够实现图像界面与模型设置的独立, 但是对于模型中的错误辨识能力不足。	Objective C	共享/免费	http://wiki.swarm.org
Java SWARM	圣塔菲研究所 (SFI)	该模型是基于 Java 语言开发的, 实现了与 Java 用户的对接, 但是问题是不能将 Objective C 更好地融入其中。	Java	开源	http://wiki.swarm.org

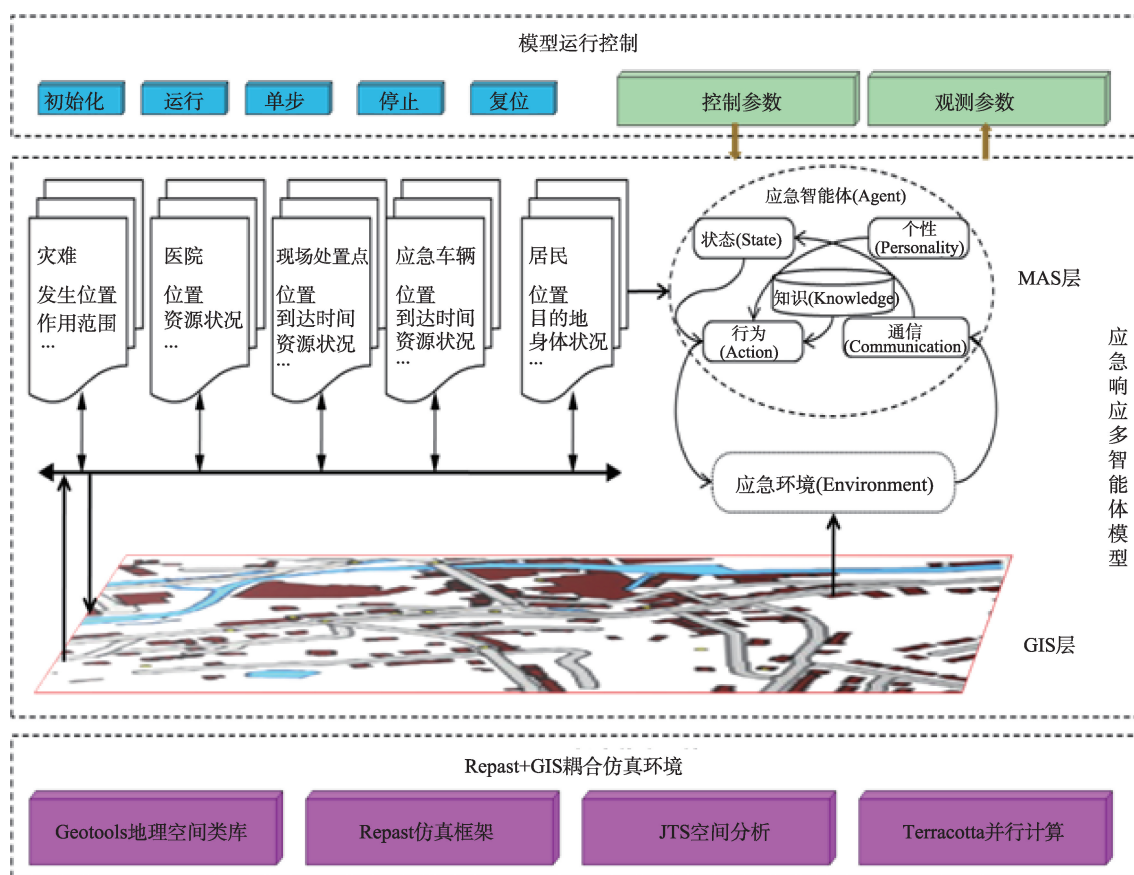


图2 多智能体系统模型案例(李强等, 2015)

Fig.2 A case of multi-agent system model (Li et al, 2015)

4.2 一般均衡模型

1960年, Johansen(1960)运用经济学一般均衡理论建立了可计算一般均衡模型(Computable General Equilibrium, CGE)。经过50多年的发展,这类模型在城市和区域经济研究中得到广泛应用,并发展成为应用经济学的一个分支。借鉴CGE模型,城市与区域的复杂系统研究也具有比较广阔的前景。在中国,薛领等(2003)尝试将CGE模型引入城市研究领域,构建了空间一般均衡模型(Spatial Computable General Equilibrium, SCGE),并通过SCGE将各城市的模拟模型连接成“城市群系统”进行研究;沈体雁(2006)则通过有效集成CGE模型、GIS空间分析和网格动力学模型,开发出多区域可计算一般均衡模型系统,并试图建立多维度、多尺度、可运行的中国城市体系模拟模型框架;李娜等(2010)基于CGE模型模拟认为,如果各地区实施同一碳税政策,对区域经济的影响存在着区域差异,尤其能源富集地区、欠发达地区的经济损失较大,对发达地区则产生正面影响;解伟(2012)等以2008

年南方雨雪冰冻灾害为例,基于CGE模型评估了交通中断对湖南省的间接经济影响;赵晶等(2013)构建了黑龙江省的区域静态CGE模型,对近几年供水投资实际增长规模设计了3种投资方案。

5 系统动力学(SD)模型

Forrester(1969)构建了城市系统动力学(Urban Dynamics)模型,并首次开发成功基于城市动态模拟的模型系统,该系统主要贡献在于引入了时间变量。系统动力学模型(System Dynamics, SD)被认为是采用定性和定量相结合的方式来解决实际问题的有效工具(王其藩, 2004)。由于系统动力学具有定性与定量分析相结合,避免主观臆断,变单纯的静态为动态模拟(贾仁安等, 2002),同时其模型具有非固定结构、方程形式灵活、可有多种组合方式等优点,能有效地进行系统的动力研究,有助于进行多方案比较分析,因此在城市和城镇化研究中倍受青睐。Forrester公司最早进行了自然资源、技术和

经济部门之间的相互作用研究(Meadows et al, 1972; Georgiadiset al, 2008)。1970年代,Forrester公司与罗马俱乐部一起出版《世界动力学》(World Dynamics)(Forrester, 1971)和《增长的极限》(The Limits to Growth)(Meadows et al, 1972)。此后,城市与区域研究中广泛应用系统动力学(SD)模型,主要体现在以下5个方面:

5.1 城市单要素研究

Zhou等(2009)依据城市化—工业化—CO₂排放关系,构建城市化与CO₂排放的系统动力学模型,根据中国的产业结构和各行业考虑能源消耗,模拟了不同能源消费结构中的CO₂排放量;Feng等(2013)通过STELLA平台开发的系统动力学模型对北京市2005-2030能源消耗和CO₂排放量趋势进行模拟,发现服务业将逐步取代工业所占的主导地位,成为最大的能源消耗部门,其次是工业和运输部门;Dace等(2015)基于IPCC指南,采用系统动力学模型,以拉脱维亚国为例,从土地管理、畜禽养殖、土壤肥力和作物产量以及元素之间的反馈机制,进行农业温室气体排放量模拟,通过改变某些参数的数值,该模型可应用于其他国家的决策和措施分析。

5.2 城市土地扩张研究

许多研究都报告了系统动力学模型被应用于土地利用变化中驱动力的分析以及检验可持续城市发展政策影响(Wolstenholme, 1983; Mohapatra et al, 1994; Guo et al, 2001; Liu et al, 2007; Chang et al, 2008)。例如,何春阳等(2005)采用系统动力学模型和元胞自动机方法开发了土地利用情景动力学模型LUSD(Land Use Scenarios Dynamics Model),并利用该模型对中国北方13省未来20年土地利用变化的情景进行模拟;Shen等(2007)将城市系统动力学模型与元胞自动机(CA)结合,构建了城市增长管理的时空动态模型,并应用该模型模拟了北京大都市区城市增长的情景和过程;Tian等(2014)应用结构方程模型(SEM),采用4个时期(1973-1979、1995-1995、1995-2003、2003-2009年)的数据,研究了深圳经济特区土地覆盖变化情况,以及探讨了城市土地扩张、土地利用政策和社会经济变化对城市景观动态变化的影响。但是,在城市发展的空间格局变化研究中,一些影响城市扩展的空间变量在系统动力学模型建模时往往被忽视,相关的研究还有待进一步加强。

5.3 可持续城市研究

系统动力学方法(SD Methodology)广泛应用于可持续发展研究。张荣等(2005)将城市可持续发展系统划分为人口、经济、资源、环境、社会发展、科技教育6个子系统,构建城市可持续发展系统动力学模型框架,并以郑州市为例进行了方案优选。He等(2006)应用相同的模型,采用1991-2004数据进行了北京空间扩展研究,并对2004-2020年进行了可持续发展预测,结果表明,北京城市扩张与有限的水资源和环境恶化形成两难境地;赵璟等(2008)建立了基于经济增长和空间结构特征的城市群系统动力学模型;Armah等(2010)认识到经济发展和城市化给交通系统带来的挑战,以加纳首都阿克拉为例,构建了交通拥堵和空气污染的驱动程序和因果关系,提出交通拥挤和环境健康风险等负外部性及其机制;Venkatesan等(2011)运用系统动力学模型对美国拉斯维加斯谷地城市增长与水质量平衡影响进行研究;Guan(2011)为了解经济快速增长带来的环境问题在时间和空间之间的协同互动和反馈,在SD模型中扩展了GIS的空间分析功能,实现了动态模拟和趋势预测ERE系统的开发,并提出了用动态组合方法SD-GIS模型评价重庆市受资源枯竭和环境退化因素的影响;Egilmez等(2012)应用系统动力学模型研究了美国公路系统的可持续性,并测试了决策中的3个潜在战略;李海燕等(2014)应用系统动力学方法,基于黑龙江省东部煤电化基地案例,构建了城市化与生态环境耦合的系统动力学模型;Qiu等(2015)针对北京物流需求,在复杂系统背景下运用SD模型进行模拟研究;Haghshenas等(2015)选取9个可持续交通指标,3个环境、经济和社会指标,建立了SD模型,对伊朗伊斯法罕(Isfahan)历史城市可持续交通进行研究,实现出行生成、模式共享、供应与需求之间的交通供需平衡,模型结果反映交通网络的发展是该市可持续发展的最重要政策。

5.4 社会经济与生态环境耦合研究

在中国,左其亭等(2001)最早从社会经济系统、生态环境系统及两者的相互联系出发,建立经济系统与生态环境系统相耦合的系统动力学模型。宋学锋等(2006)建立了江苏省城市化与生态环境系统动力学模型,由人口、经济、生态环境和城市化等4个子系统组成,并进一步细分为总人口、第一产业产出、第二产业产出、第三产业产出、废气储量、废

水储量、固体废物储量、耕地面积、人口城市化水平、城镇住房面积、城镇建成区面积、科技水平、教育水平、医疗水平等14个子模块;Jin等(2009)试图将系统动力学方法整合到经济预测中,以开发动态经济预测平台,为城市可持续发展的改善提供决策支持;蔡林(2009)基于绿色GDP核算方法,应用人口、资本、生态环境和经济四大子模块,建立了动态、可预测、具有反馈机制的城市经济系统动力学模型;佟贺丰等(2010)在北京的实证研究中构建了包括经济、社会、环境3个子系统模型的SD模型,并在此基础上通过构建数学模型解释了各个子系统的相互作用关系。

5.5 城市化与生态环境交互胁迫研究

近年来,城市化与生态环境胁迫研究成为热点。Wang等(2014)从交互胁迫理论视角通过使用交互胁迫模型(ICM)进行城市化与生态环境系统研究,提出了一种新的城市化和生态环境综合评价指标体系,用于京津冀地区实证研究,发现双指数曲线的城市化与生态环境是倒U型曲线,S形曲线演变成初级共生期和和谐发展期,表明快速城市化对环境已经造成巨大的压力;王少剑等(2015)构建了城市化和生态环境系统综合评价指标体系,采用1980-2011年数据对京津冀地区城市化与生态环境耦合过程进行分析。

6 多模型复合/集成系统研究

GIS在早期的应用跟城市与区域研究模型毫无联系。但从1980年代开始,2个领域的研究人员都

开始意识到学科融合的重要性,GIS的分析能力也因此提高并且得以拓展(Goodchild, 1992; Fischer et al, 1996),模型的集成成为一种趋势。因为模型的集成一方面提高了GIS空间分析的能力,使其运行能力在过去数据存储的基础上有了显著的提升;另一方面对于城市与区域规划模型而言,GIS实际上提供了一种多元化表达的方式(张伟等, 2000)。因此,在城市化的研究过程中,城市与区域模型与GIS的集成特征越来越明显。最近的研究表明,CA模型和SD模型、SD模型和GIS的复合集成成为多模型复合/集成的新趋势。

6.1 CA+SD复合模型系统

Theobald等(1994)将GIS、CA和SD模型结合起来进行景观的时空动力学分析;Wu等(1998)通过CA模型与多准则计量经济模型(a Multi-Criteria Econometric Model)的链接,模拟城市土地空间变化;White等(2000)采用高分辨率集成CA模型和区域发展模型进行城市发展研究;Shen等(2007)将Forretter(1969)的城市动力学模型和CA模型集合,提出了一种用于城市增长模拟的空间建模环境;Han等(2009)以上海为例,提出了一个集成的系统动力学和元胞自动机模型,并用于快速城市化背景下准确评估城市增长,认为上海市区建成区面积在2000-2020年间将以每年3%的速度增长,到2020年达到1474 km²。

6.2 SD+GIS集成模型系统

最近,一些研究开始将SD模型与3S(RS、GPS、GIS)技术结合在一起(图3),开发出动态、可视、数据不断更新的计算机系统(a Dynamic, Visible, Updat-

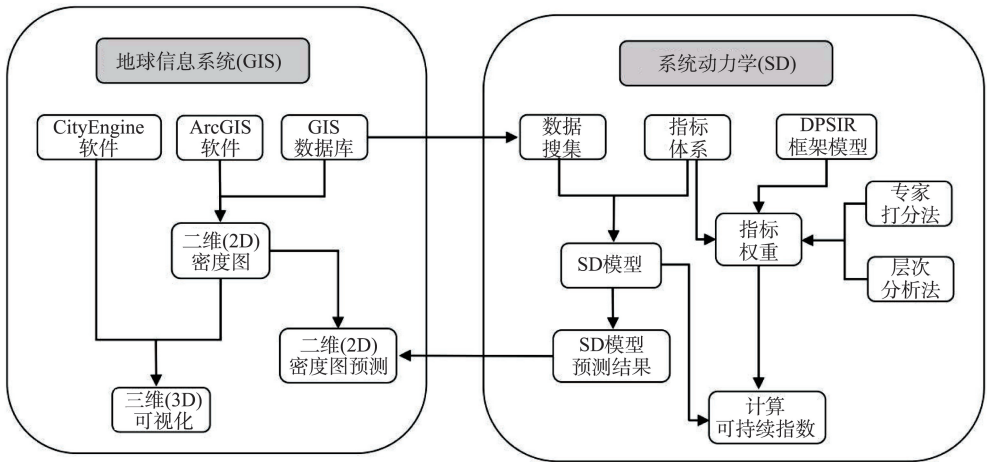


图3 SD与GIS集成模型
Fig.3 A case of SD model and GIS

ing and Computer-transforming System)(Cai, 2008)。Xu等(2012)基于DPSIR(驱动力、合并的压力、状态、影响和响应)框架和层次分析法(AHP)与系统动力学(SD)仿真模型,构建一个系统化的可持续发展模型,并以德国南部巴登符腾堡州及普林尼根区为例,通过SD模型和三维可视化系统的地理信息系统集成(GISSD系统),在CityEngine环境下进行三维可视化显示,解释了住宅发展的可持续性指标作用与变化,为城市居住区的可持续发展提供决策支持。

7 结论与讨论

综合上述各类城市与区域模型和方法可以看出,简单线性回归法简便易行,但缺乏严密的数理逻辑分析基础;时间序列分析方法如自回归移动平均(ARMA)模型和灰色系统(GM)模型均较适用于短期预测,但不适合中长期预测,因而变化趋势固定的时间序列模型不适合于人口城镇化水平的中长期预测(宋丽敏, 2007; 黄长军等, 2012; 曹飞, 2014; 陈夫凯等, 2014)。Logistic模型是模拟城镇化过程曲线的较佳方法,但一般适用于长时段研究,有时因缺乏对各阶段临界指标的严密分析(更多的是基于经验的假设判断),往往造成误解(王凯等, 2013)。经济计量预测法由于选择数据限制,因而导致误差被放大(高春亮等, 2013)。在实际用于预测时,需要依赖时序数据才能建立相应的计量模型,能否科学构建计量模型和采集各项合理参数(能否通过适当的假设检验)成为预测成功与否的关键(丁刚, 2008)。

对于元胞自动机CA模型,可通过空间、时间和城市系统状态变量的离散化,揭示城市空间格局乃至城市内部各单元之间相互作用机制。然而,当模拟城市发展时,这些宏观层面的社会经济变量,如区域经济差距、人口迁移和政策影响等都很少考虑。相反,大部分元胞自动机(CA)模型只是推断城市土地增长的历史趋势,或只是根据城市规划设定的增长速度及目标值。尽管多智能体(Agent)模型代表了采用人工智能技术进行城市空间增长模拟研究的前沿领域和发展方向,但在智能体空间行为的形式化、空间智能体的宏观行为之间的通信机制等方面的研究仍显不足,与实际应用和操作还有一定距离,需要作进一步深入研究。

系统动力学模型是一种基于系统结构前提的

问题评价方法,即基本的系统部件是嵌套方式连接而产生的行为(Richardson et al, 1989; Sterman, 2000)。系统动力学模型非常适用于研究多个时间段、具有相互反馈关系的要素(Vennix, 1996)。也因此,系统动力学模型本身的存在明显的不足,对多因素、多情景的模拟往往会显得简单问题复杂化。

因此,开发和建立能有效地整合各种模型方法的多因素、多情景、集时空动态于一体的城市和区域研究模型平台,是当前城市群空间、城镇化过程和城镇化水平预测动态模拟切实可行的解决方案。但是,在已有的用于城镇化问题研究的系统动力建模方法中,主要都是针对单一城市,较少进行城市群或全国尺度的研究,而且也很少涉及城镇化机制在城镇化过程中的作用,虽然也有研究给出了针对不同系统动力的预测方案,但没有对不同系统动力作用大小进行对比,从而影响到中国城镇化水平的预测、过程仿真和城市群发展模拟方案的合理性和科学性(顾朝林等, 2008)。与此同时,从现有的研究方法和模型来看,大多缺乏区分城镇化阶段并进行多方案的比较,因此研究成果往往背离实际状况较多。

不难看出,针对中国的城市和区域研究,需要探索建立大尺度、多因素、多情景、集合性的定量研究方法和模型系统模拟平台,为国家新型城镇化和城市群增长管理以及国家发展规划提供决策依据,就显得越发重要和紧迫。

参考文献(References)

- 白先春, 李炳俊. 2006. 基于新陈代谢GM(1, 1)模型的我国人口城市化水平分析[J]. 统计与决策, (3): 40-41. [Bai X C, Li B J. 2006. Jiyu xinchendaixie GM(1, 1) moxing de woguo renkou chengshihua shuiping fenxi[J]. Tongji yu Juece, (3): 40-41.]
- 蔡林. 2008. 系统动力学在可持续发展研究中的应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社. [Cai L. 2008. The application of system dynamics in the research of sustainable development[J]. Beijing, China: China Environmental Science Press.]
- 蔡林, 高速进. 2009. 环境与经济综合核算的系统动力学模型[J]. 环境工程学报, 3(5): 941-946. [Cai L, Gao S J. 2009. A system dynamics model for integrated environmental and economic accounting[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 3(5): 941-946.]
- 曹飞. 2012. 中国人口城市化Logistic模型及其应用: 基于结构突变的理论分析[J]. 西北人口, 33(6): 18-22. [Cao F. 2012. The logistic model of population urbanization in Chi-

- na: Based on structure break theory[J]. Northwest Population, 33(6): 18-22.]
- 曹飞. 2014. 基于灰色 Verhulst 模型的陕西省人口城镇化率预测[J]. 西安石油大学学报: 社会科学版, 23(3): 21-24. [Cao F. 2014. Prediction of population urbanization rate in Shaanxi Province based on the gray Verhulst model[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Social Science Edition, 23(3): 21-24.]
- 陈夫凯, 夏乐天. 2014. 运用 ARIMA 模型的我国城镇化水平预测[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 28(4): 133-137. [Chen F K, Xia L T. 2014. Forecast of our country's urbanization level based on ARIMA model[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 28(4): 133-137.]
- 陈明星, 陆大道, 张华. 2009. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 64(4): 387-398. [Chen M X, Lu D D, Zhang H. 2009. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization[J]. Acta Geographica Sinica, 64(4): 387-398.]
- 陈明星, 叶超, 周义. 2011. 城市化速度曲线及其政策启示: 对诺瑟姆曲线的讨论与发展[J]. 地理研究, 30(8): 1499-1507. [Chen M X, Ye C, Zhou Y. 2011. Urbanization rate and its policy implications: Discussion and development of Northam's curve[J]. Geographical Research, 30(8): 1499-1507.]
- 陈彦光. 2003. 自组织与自组织城市[J]. 城市规划, 27(10): 17-22. [Chen Y G. 2003. Self-organization and self-organizing cities[J]. City Planning Review, 27(10): 17-22.]
- 陈彦光. 2011. 城市化与经济发展水平关系的三种模型及其动力学分析[J]. 地理科学, 31(1): 1-6. [Chen Y G. 2011. Modelling the relationships between urbanization and economic development levels with three functions[J]. Scientia Geographica Sinica, 31(1): 1-6.]
- 陈彦光, 周一星. 2000. 细胞自动机与城市系统的空间复杂性模拟: 历史、现状与前景[J]. 经济地理, 20(3): 35-39. [Chen Y G, Zhou Y X. 2000. Cellular Automata and simulation of spatial complexity of urban systems: History, present situation and future[J]. Economic Geography, 20(3): 35-39.]
- 陈彦光, 周一星. 2005. 城市化 Logistic 过程的阶段划分及其空间解释: 对 Northam 曲线的修正与发展[J]. 经济地理, 25(6): 817-822. [Chen Y G, Zhou Y X. 2005. Logistic process of urbanization falls into four successive phases: Revising Northam's curve with new spatial interpretation[J]. Economic Geography, 25(6): 817-822.]
- 丁刚. 2008. 城镇化水平预测方法新探: 以神经网络模型的应用为例[J]. 哈尔滨工业大学学报: 社会科学版, 10(3): 128-133. [Ding G. 2008. A research on the forecasting methods of urbanization level: Taking neural network model as an example[J]. Journal of Harbin Institute of Technology: Social Sciences Edition, 10(3): 128-133.]
- 杜宁睿, 邓冰. 2001. 细胞自动机及其在模拟城市时空演化过程中的应用[J]. 武汉大学学报: 工学版, 34(6): 8-11. [Du N R, Deng B. 2001. Cellular Automata and their application to modeling spatial-temporal process of urban development[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 34(6): 8-11.]
- 方创琳. 2009. 中国城市化进程及资源环境保障报告[M]. 北京: 科学出版社. [Fang C L. 2009. Zhongguo chengshihua jincheng ji ziyuan huanjing baozhang baogao[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 方创琳, 刘晓丽, 蔺雪芹. 2008. 中国城市化发展阶段的修正及规律性分析[J]. 干旱区地理, 31(4): 512-523. [Fang C L, Liu X L, Lin X Q. 2008. Stages correction and regularity analysis of urbanization course of China[J]. Arid Land Geography, 31(4): 512-523.]
- 高春亮, 魏后凯. 2013. 中国城镇化趋势预测研究[J]. 当代经济科学, 35(4): 85-90. [Gao C L, Wei H K. 2013. Prediction study on the urbanization trends of China[J]. Modern Economic Science, 35(4): 85-90.]
- 顾朝林. 1992. 中国城镇体系: 历史·现状·展望[M]. 北京: 商务印书馆: 334-350. [Gu C L. 1992. Zhongguo chenzhen tixi: Lishi, xianzhuang, zhanwang[M]. Beijing, China: The Commercial Press: 334-350.]
- 顾朝林, 于涛方, 李王鸣, 等. 2008. 中国城市化: 格局·过程·机理[M]. 北京: 科学出版社. [Gu C L, Yu T F, Li W M, et al. 2008. Zhongguo chengshihua: Geju, guocheng, jili[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 何春阳, 陈晋, 史培军, 等. 2002. 基于 CA 的城市空间动态模型研究[J]. 地球科学进展, 17(2): 188-195. [He C Y, Chen J, Shi P J, et al. 2002. Study on the spatial dynamic city based on CA (cellular automata) model[J]. Advance in Earth Sciences, 17(2): 188-195.]
- 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 2005. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J]. 中国科学: 地球科学, 35(5): 464-473. [He C Y, Shi P J, Chen J, et al. 2005. Jiyu xitong donglixue moxing he yuanbao zidongji moxing de tudi liyong qingjing moxing yanjiu[J]. Science in China: Earth Sciences, 35(5): 464-473.]
- 黄长军, 曹元志, 胡丽敏, 等. 2012. 基于新陈代谢 GM(1, 1) 模型的益阳城市化水平分析[J]. 地理空间信息, 10(3): 124-126. [Huang C J, Cao Y Z, Hu L M, et al. 2012. Analysis of Yiyang urbanization level based on information renewal GM(1, 1)[J]. Geospatial Information, 10(3): 124-126.]
- 贾仁安, 丁荣华. 2002. 系统动力学: 反馈动态性复杂分析[M]. 北京: 高等教育出版社. [Jia R A, Ding R H. 2002. Xitong donglixue: Fankui dongtaixing fuza fenxi[M]. Beijing, China: Higher Education Press.]
- 简新华, 黄锬. 2010. 中国城镇化水平和速度的实证分析与前景预测[J]. 经济研究, (3): 28-39. [Jian X H, Huang K.

2010. Empirical analysis and forecast of the level and speed of urbanization in China[J]. *Economic Research Journal*, (3): 28-39.]
- 黎夏, 叶嘉安. 1999. 约束性单元自动演化CA模型及可持续发展形态的模拟[J]. *地理学报*, 54(4): 289-298. [Li X, Yeh A G O. 1999. Constrained cellular automata for modelling sustainable urban forms[J]. *Acta Geographica Sinica*, 54(4): 289-298.]
- 黎夏, 叶嘉安. 2001. 主成分分析与 cellular automata 在空间决策与城市模拟中的应用[J]. *中国科学: 地球科学*, 31(8): 683-690. [Li X, Yeh A G O. 2001. Zhuchengfen fenxi yu cellular automata zai kongjian juece yu chengshi moni zhong de yingyong[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 31(8): 683-690.]
- 黎夏, 叶嘉安. 2002. 基于神经网络的单元自动机CA及真实和优化的城市模拟[J]. *地理学报*, 57(2): 159-166. [Li X, Yeh A G O. 2002. Neural-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 57(2): 159-166.]
- 李海燕, 陈晓红. 2014. 基于SD的城市化与生态环境耦合发展研究: 以黑龙江省东部煤电化基地为例[J]. *生态经济*, 30(12): 109-115. [Li H Y, Chen X H. 2014. Research on urbanization and ecological environment coupling development based on SD model: A case in eastern coal-electricity base of Heilongjiang Province[J]. *Ecological Economy*, 30(12): 109-115.]
- 李娜, 石敏俊, 袁永娜. 2010. 低碳经济政策对区域发展格局演进的影响: 基于动态多区域CGE模型的模拟分析[J]. *地理学报*, 65(12): 1569-1580. [Li N, Shi M J, Yuan Y N. 2010. Impacts of carbon tax policy on regional development in China: A dynamic simulation based on a multi-regional CGE model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 65(12): 1569-1580.]
- 李强, 顾朝林. 2015. 城市公共安全应急响应动态地理模拟研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 45(3): 290-304. [Li Q, Gu C L. 2015. Dynamic geographical simulation for urban public safety emergency response[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 45(3): 290-304.]
- 李文博, 陈永杰. 2002. 中国的城市化: 水平与结构偏差[M]//陈甬军, 陈爱民. 中国城市化: 实证分析与对策研究. 厦门: 厦门大学出版社. [Li W P, Chen Y J. 2002. Zhongguo de chengshihua: Shuiping yu jigou piancha[M]//Chen Y J, Chen A M. An analysis of urbanization in China. Xiamen, China: Xiamen University Press.]
- 梁育填, 李文涛, 柳林. 2013. 基于智能体的企业迁移模拟: 以广东省产业转移为例[J]. *经济地理*, 33(7): 96-101. [Liang Y T, Li W T, Liu L. 2013. Agent based simulation of enterprises migration: A case study of Guangdong Province [J]. *Economic Geography*, 33(7): 96-101.]
- 刘青, 杨桂元. 2013. 安徽省城镇化水平预测: 基于IOWHA算子的组合预测[J]. *重庆工商大学学报: 自然科学版*, 30(8): 38-44. [Liu Q, Yang G Y. 2013. Predication for urbanization level of Anhui Province: Combined forecast based on IOWHA operator[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition*, 30(8): 38-44.]
- 马晓河. 2011. 中国城镇化实践与未来战略构想[M]. 北京: 中国计划出版社: 165-166. [Ma X H. 2011. Urbanization in China and strategic conception in the future[M]. Beijing, China: China Planning Press: 165-166.]
- 屈晓杰, 王理平. 2005. 我国城市化进程的模型分析[J]. *安徽农业科学*, 33(10): 1938-1940. [Qu X J, Wang L P. 2005. Analysis of the model of urbanization procedure in China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 33(10): 1938-1940.]
- 饶会林. 1999. 城市经济学[M]. 大连: 东北财经大学出版社. [Rao H L. 1999. Chengshi jingjixue[M]. Dalian, China: Northeast University of Finance and Economics Press.]
- 沈体雁. 2006. CGE与GIS集成的中国城市增长情景模拟框架研究[J]. *地球科学进展*, 21(11): 1153-1163. [Shen T Y. 2006. China urban future simulation: An integrated framework of CGE and GIS[J]. *Advances in Earth Science*, 21(11): 1153-1163.]
- 石留杰, 李艳军, 臧雨亭, 等. 2010. 基于GM(1, 1)-Markov模型的我国人口城市化水平预测[J]. *四川理工学院学报: 自然科学版*, 23(6): 648-650. [Shi L J, Li Y J, Zang Y T, et al. 2010. Forecast of the level of China's urbanization based on GM(1, 1)-Markov model[J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering: Natural Science Edition*, 23(6): 648-650.]
- 宋丽敏. 2007. 中国人口城市化水平预测分析[J]. *辽宁大学学报: 哲学社会科学版*, 35(3): 115-119. [Song L M. 2007. An analysis of the level of China's urbanization[J]. *Journal of Liaoning University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 35(3): 115-119.]
- 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*, 26(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[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 26(3): 124-130.]
- 佟贺丰, 曹燕, 于洁, 等. 2010. 基于系统动力学的城市可持续发展模型: 以北京市为例[J]. *未来与发展*, (12): 10-17. [Tong H F, Cao Y, Yu J, et al. 2010. The urban sustainable development based on system dynamics model: The case of Beijing[J]. *Future and Development*, (12): 10-17.]
- 王红, 闫国年, 陈干. 2002. 细胞自动机及在南京城市演化预测中的应用[J]. *人文地理*, 17(1): 47-50. [Wang H, Lv G N, Chen G. 2002. Application of cellular automata to urban dynamic process modelling for Nanjing City[J]. Hu-

- man Geography, 17(1): 47-50.]
- 王建军, 吴志强. 2009. 城镇化发展阶段划分[J]. 地理学报, 64(2): 177-188. [Wang J J, Wu Z Q. 2009. Delimiting the stages of urbanization growth process: A method based on Northam's theory and logistic growth model[J]. Acta Geographica Sinica, 64(2): 177-188.]
- 王凯, 陈明. 2013. 中国城镇化的速度与质量[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Wang K, Chen M. 2013. Trend and evaluation of China's urbanization[M]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]
- 王其藩. 2004. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社. [Wang Q P. 2004. System dynamics[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press.]
- 王少剑, 方创琳, 王洋. 2015. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. 生态学报, 35(7): 2244-2254. [Wang S J, Fang C L, Wang Y. 2015. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(7): 2244-2254.]
- 武晓波, 赵健, 魏成阶, 等. 2002. 细胞自动机模型用于城市发展模拟的方法初探: 以海口市为例[J]. 城市规划, 26(8): 69-73. [Wu X B, Zhao J, Wei C J, et al. 2002. The urban expanding simulation with the cellular automata model in Haikou[J]. City Planning Review, 26(8): 69-73.]
- 夏冰, 胡坚明, 张佐, 等. 2002. 基于多智能体的城市交通诱导系统可视化模拟[J]. 系统工程, 20(5): 72-78. [Xia B, Hu J M, Zhang Z, et al. 2002. Visualized simulation of urban traffic guidance system based on PARAMICS[J]. Systems Engineering, 20(5): 72-78.]
- 项后军, 周昌乐. 2001. 人工智能的前沿: 智能体(Agent)理论及其哲理[J]. 自然辩证法研究, 17(10): 29-33. [Xiang H J, Zhou C L. 2001. The frontier of AI: The development of Agent theory and its philosophy[J]. Studies in Dialectics of Nature, 17(10): 29-33.]
- 徐匡迪. 2013. 中国特色新型城镇化发展战略研究(综合卷)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Xu K D. 2013. Zhongguo tese xinxing chengzhenhua fazhan zhanlue yanjiu (zonghejuan) [M]. Beijing, China: China Architecture & Building Press.]
- 许学强, 叶嘉安. 1986. 我国城市化的省际差异[J]. 地理学报, 41(1): 8-22. [Xu X Q, Yeh A G O. 1986. Provincial variation of urbanization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 41(1): 8-22.]
- 肖琳, 田光进, 乔治. 2014. 基于Agent的城市扩张占用耕地动态模型及模拟[J]. 自然资源学报, 29(3): 516-527. [Xiao L, Tian G J, Qiao Z. 2014. An agent-based approach for urban encroachment on cropland dynamic model and simulation[J]. Journal of Natural Resources, 29(3): 516-527.]
- 解伟, 李宁, 胡爱军, 等. 2012. 基于CGE模型的环境灾害经济影响评估: 以湖南雪灾为例[J]. 中国人口·资源与环境, 22(11): 26-31. [Xie W, Li N, Hu A J, et al. 2012. Assessing the economic impact of environmental disaster: A computable general equilibrium analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 22(11): 26-31.]
- 薛领, 杨开忠. 2003. 城市演化的多主体(multi-agent)模型研究[J]. 系统工程理论与实践, (12): 1-9, 17. [Xue L, Yang K Z. 2003. Research on urban evolution using agent-based simulation[J]. Systems Engineering- Theory & Practice, (12): 1-9, 17.]
- 应申, 李霖, 高玉荣. 2011. 利用可视引导的Agent模拟城市人流运动[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 36(11): 1367-1370. [Ying S, Li L, Gao Y R. 2011. Pedestrian simulation in urban space based on visibility analysis and agent techniques[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 36(11): 1367-1370.]
- 张荣, 梁保松, 刘斌, 等. 2005. 城市可持续发展系统动力学模型及实证研究[J]. 河南农业大学学报, 39(2): 229-234. [Zhang R, Liang B S, Liu B, et al. 2005. Study on system dynamics model of urban sustainable development and demonstration[J]. Journal of Henan Agricultural University, 39(2): 229-234.]
- 张伟, 顾朝林. 2000. 城市与区域规划模型系统[M]. 南京: 东南大学出版社. [Zhang W, Gu C L. 2000. Chengshi yu quyu guihua moxing xitong[M]. Nanjing, China: Southeast University Press.]
- 张显峰, 崔伟宏. 2000. 基于GIS和CA模型的时空建模方法研究[J]. 中国图象图形学报, 5(12): 1012-1018. [Zhang X F, Cui W H. 2000. Spatio-temporal analysis and modeling based on the integration of GIS and CA model[J]. Journal of Image and Graphics, 5(12): 1012-1018.]
- 张颖, 赵民. 2003. 论城市化与经济发展的相关性: 对钱纳里研究成果的辨析与延伸[J]. 城市规划汇刊, (4): 10-18. [Zhang Y, Zhao M. 2003. Urbanization and economic development: Review and extension of Hollis Chenery's study[J]. Urban Planning Forum, (4): 10-18.]
- 赵晶, 黄晓丽, 倪红珍, 等. 2013. 基于CGE模型的供水投资对经济影响研究: 以黑龙江省为例[J]. 自然资源学报, 28(4): 696-704. [Zhao J, Huang X L, Ni H Z, et al. 2013. A study on economic impact of water investment based on CGE model: A case of Heilongjiang Province[J]. Journal of Natural Resources, 28(4): 696-704.]
- 赵璟, 党兴华. 2008. 系统动力学模型在城市群发展规划中的应用[J]. 系统管理学报, 17(4): 395-400, 408. [Zhao J, Dang X H. 2008. Application of system dynamic model in urban agglomeration development planning[J]. Journal of Systems Management, 17(4): 395-400, 408.]
- 周成虎, 孙战利, 谢一春. 1999. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社. [Zhou C H, Sun Z L, Xie Y C. 1999. Dili yuanbao zidongji yanjiu[M]. Beijing, China: Science

- Press.]
- 周一星. 1982. 城市化与国民生产总值关系的规律性探讨[J]. 人口与经济, (1): 28-33. [Zhou Y X. 1982. Chenshihua yu guomin shengchan zongzhi guanxi de guilv xing tantao [J]. Population & Economics, (1): 28-33.]
- 左其亨, 陈略. 2001. 社会经济—生态环境耦合系统动力学模型[J]. 上海环境科学, 20(12): 592-594. [Zuo Q T, Chen L. 2001. Dynamic model of coupling system for social-economy and eco-environment[J]. Shanghai Environmental Sciences, 20(12): 592-594.]
- Allen P M, Boon F, Engelen G, et al. 1984. Modeling evolving spatial choice patterns[J]. Applied Mathematics and Computation, 14(1): 97-129.
- Armah F A, Yawson D O, Pappoe A A N M. 2010. A Systems dynamics approach to explore traffic congestion and air pollution link in the city of accra, Ghana[J]. Sustainability, 2(1): 252-265.
- Batten D. 1982. On the dynamics of industrial evolution[J]. Regional Science and Urban Economics, 12(3): 449-462.
- Batty M. 2005. Agents, cells, and cities: New representational models for simulating multiscale urban dynamics[J]. Environment and Planning A, 37(8): 1373-1394.
- Batty M, Desyllas J, Duxbury E. 2003. Safety in numbers? Modelling crowds and designing control for the Notting Hill Carnival[J]. Urban Studies, 40(8): 1573-1590.
- Batty M, Xie Y. 1994. From cells to cities[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 21(7): S31-S48.
- Batty M, Xie Y C, Sun Z L. 1999. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 23(3): 205-233.
- Brown D G, Page S E, Riolo R, et al. 2004. Agent-based and analytical modeling to evaluate the effectiveness of greenbelts[J]. Environmental Modelling & Software, 19(12): 1097-1109.
- Chang Y C, Hong F W, Lee M T. 2008. A system dynamic based DSS for sustainable coral reef management in Kenting coastal zone, Taiwan[J]. Ecological Modelling, 211(1-2): 153-168.
- Chen J, Gong P, He C Y, et al. 2002. Assessment of the urban development plan of Beijing by using a CA-based urban growth model[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68(10): 1063-1071.
- Chen M X, Liu W D, Tao X L. 2013. Evolution and assessment on China's urbanization 1960-2010: Under-urbanization or over-urbanization[J]. Habitat International, 38: 25-33.
- Chen M X, Zhang H, Liu W D, et al. 2014. The global pattern of urbanization and economic growth: Evidence from the last three decades[J]. PLoS One, 9(8): doi: 10.1371/journal.pone.0103799.
- Couclelis H. 1988. Of mice and men: What rodent populations can teach us about complex spatial dynamics[J]. Environment and Planning A, 20(1): 99-109.
- Crooks A T. 2006. Exploring cities using agent based models and GIS[C]//Proceedings of the agent 2006 conference on social agents: Results and prospects. Chicago, IL: University of Chicago and Argonne National Laboratory.
- Dace E, Muizniece I, Blumberga A, et al. 2015. Searching for solutions to mitigate greenhouse gas emissions by agricultural policy decisions: Application of system dynamics modeling for the case of Latvia[J]. Science of the Total Environment, 527-528: 80-90.
- Egilmez G, Tatari O. 2012. A dynamic modeling approach to highway sustainability: Strategies to reduce overall impact [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46 (7): 1086-1096.
- Epstein J M. 1999. Agent-based computational models and generative social science[J]. Complexity, 4(5): 41-60.
- Feng Y Y, Chen S Q, Zhang L X. 2013. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China[J]. Ecological Modelling, 252: 44-52.
- Fischer M M. 1996. Spatial analytical[M]. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Forrester J W. 1969. Urban dynamics[M]. Cambridge, MA: MIT Press.
- Forrester J W. 1971. World dynamics[M]. Cambridge, MA, UK: Wright-Allen Press.
- Franklin S, Graesser A. 1996. Is it an agent, or just a program: A taxonomy for autonomous agents[C]//Proceedings of ECAI'96 workshop (ATAL) budapest, hungary. Berlin & Heidelberg, Germany: Springer: 21-35.
- Georgiadis P, Besiou M. 2008. Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A system dynamics approach[J]. Journal of Cleaner Production, 16 (15): 1665-1678.
- Glansdorff P, Prigogine I. 1971. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations[M]. London, UK: Wiley-Interscience.
- Goodchild M F. 1992. Geographical information science[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 6 (1): 31-45.
- Guan D J, Gao W J, Su W C, 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.
- Guo H C, Liu L, Huang G H, et al. 2001. A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin[J]. Journal of Environmental Management, 61(1): 93-111.

- Haghshenas H, Vaziri M, Gholamialam A. 2015. Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan[J]. *Cities*, 45: 104-115.
- Han J, Hayashi Y, Cao X, et al. 2009. Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 91(3): 133-141.
- He C Y, Okada N, Zhang Q F, 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.
- Itami R M. 1994. Simulating spatial dynamics: Cellular automata theory[J]. *Landscape and Urban Planning*, 30(1-2): 27-47.
- Jin W, Xu L Y, Yang Z F. 2009. Modeling a policy making framework for urban sustainability: Incorporating system dynamics into the ecological footprint[J]. *Ecological Economics*, 68(12): 2938-2949.
- Johansen L. 1960. A multi-sectoral study of economic growth [M]. Amsterdam, the Netherlands: North-Holland.
- Li X, Yeh A G O. 2000. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2): 131-152.
- Liu Y, Lv X J, Qin X S, et al. 2007. An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe[J]. *Landscape and Urban Planning*, 82(4): 233-246.
- Lowry I S. 1964. A model of metropolis[R]. Santa Monica, CA: RAND Corporation: 8-18.
- Macal C M, North M J. 2005. Tutorial on agent-based modeling and simulation[C]//Proceedings of the 37th conference on winter simulation. Orlando, FL: IEEE: 2-15.
- Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. 1972. The limits to growth[J]. New York: Universe Books: 102.
- Mohapatra P K J, Mandal P, Bora M C. 1994. Introduction to system dynamics modeling[M]. Las Vegas, NE: University of Nevada Press.
- Mysore V, Gill O, Daruwala R S, et al. 2005. Multi-agent modeling and analysis of the Brazilian food-poisoning scenario[C]//The agent 2005 conference on generative social processes, models, and mechanisms. Chicago, IL: Argonne National Laboratory & the University of Chicago: 13-15.
- Neumann J, Morgenstern O. 1944. Theory of games and economic behavior[M]. Princeton, NJ: Princeton university press.
- Northam R M. 1975. Urban geography[M]. New York: John Wiley & Sons.
- Phipps M J. 1992. From local to global: The lesson of cellular automata[M]//DeAngelis D L, Gross L J. Individual-based models and approaches in ecology: Populations, communities and ecosystems. New York: Chapman & Hall: 165-187.
- Portugali J. 2000. Self-Organization and the City[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Portugali J. 2012. Self-organization and the city[M]. Berlin & Heidelberg, Germany: Springer.
- Pumain D, Saint-Julien T, Sanders L. 1986. Urban dynamics of some French cities[J]. *European Journal of Operational Research*, 25(1): 3-10.
- Qiu Y, Shi X L, Shi C H. 2015. A system dynamics model for simulating the logistics demand dynamics of metropolitans: A case study of Beijing, China[J]. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(3): 783-803.
- Richardson G P, Pugh A L. 1989. Introduction to system dynamics modeling, pegasus communications[M]. Waltham, UK: Pegasus Communications: 413.
- Theobald D M, Gross M D. 1994. EML: A modeling environment for exploring landscape dynamics[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 18(3): 193-204.
- Tian L, Chen J Q, Yu S X. 2014. Coupled dynamics of urban landscape pattern and socioeconomic drivers in Shenzhen, China[J]. *Landscape Ecology*, 29(4): 715-727.
- Tobler W R. 1979. Cellular geography[M]//Gale S, Olsson G. Philosophy in geography. Dordrecht, the Netherlands: Springer: 379-386.
- Torrens P M K. 2004. Simulating sprawl: A dynamic entity-based approach to modeling North American suburban sprawl using cellular automata and multi-agent systems [D]. London, UK: University College London.
- Ulam S M. 1961. On some statistical properties of dynamical systems[C]//Proceedings of the 4th Berkeley symposium on mathematical statistics and probability. University of California Press, 3: 315-320.
- Venkatesan A K, Ahmad S, Johnson W. 2011. Systems dynamic model to forecast salinity load to the Colorado River due to urbanization within the Las Vegas Valley[J]. *Science of the Total Environment*, 409(13): 2616-2625.
- Vennix J A M. 1996. Group model building: Facilitating team learning using system dynamics[M]. New York: Wiley.
- Wagner D F. 1997. Cellular automata and geographic information systems[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2): 219-234.
- Wang S J, Ma H T, Zhao Y B. 2014. Exploring the relationship between urbanization and the eco-environment: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Ecological Indicators*, 45: 171-183.
- White R, Engelen G. 1993. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution

- of urban land-use patterns[J]. *Environment and Planning A*, 25(8): 1175-1199.
- White R, Engelen G. 2000. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(5): 383-400.
- White R, Engelen G, Uljee I. 1997. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3): 323-343.
- Wilson A G. 1974. *Urban and regional models in geography and planning*[M]. London, UK: John Wiley & Sons.
- Wolstenholme E F. 1983. Modelling national development programmes: An exercise in system description and qualitative analysis using system dynamics[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 34(12): 1133-1148.
- Wooldridge M, Jennings N R. 1995. Intelligent agents: Theory and practice[J]. *The Knowledge Engineering Review*, 10 (2): 115-152.
- Wu F L. 1998. SimLand: A prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(1): 63-82.
- Wu F L. 2002. Calibration of stochastic cellular automata: The application to rural-urban land conversions[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(8): 795-818.
- Wu F L, Webster C J. 1998. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25(1): 103-126.
- Xu Z, Coors V. 2012. Combining system dynamics model, GIS and 3D visualization in sustainability assessment of urban residential development[J]. *Building and Environment*, 47: 272-287.
- Zeleny M. 1980. *Autopoiesis, dissipative structures, and spontaneous social orders*[M]. Boulder, CO: Westview Press.
- Zhou W, Mi H. 2009. Systems dynamics of future urbanization and energy-related CO₂ emissions in China[J]. *WSEAS Transactions on Systems*, 8(10): 1145-1154.

Progress in urban and regional quantitative research

GU Chaolin^{1*}, ZHANG Yue¹, ZHAI Wei¹, GUAN Weihua², LI Qiang³, ZHAO Na⁴, LIU Chen⁵

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

3. The Chinese People's Liberation Army 95806 Troops, Beijing 100076, China;

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

5. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: This article systematically reviews some quantitative research methods about urbanization, including mathematical and simulation models of the process of urbanization, single urban growth models (cellular automata, agent and multi-agent), system dynamics model and simulation of urbanization, spatial computable general equilibrium model of urbanization, and integrated multi-model system of urbanization. The article concludes that before 1950, the main method of urbanization forecast was time series model that predicts urbanization trend based on historical data. During the 1960s, the main method was mathematical statistics model and population statistics model; regression model was also applied in urbanization research. During the 1970s, with the development of system science, system analysis method contributed to the creation of transportation, population, and land use models, which all facilitated in-depth analysis of urbanization. Since 1990, access to urbanization data has been greatly improved and data-intensive simulation models expanded the scope and depth of urbanization research. In recent years, integrated multi-model system becomes a popular research area because of the breakthrough in spatial data mining, big data, cloud computing, and large-scale model system.

Key words: urban; region; quantitative research; mathematical model; cellular automata; multi-agent system; numerical economic model; system dynamics model