

面向空间规划的微观模拟： 数据、模拟与评价

(申请清华大学工学博士学位论文)

培 养 单 位： 建筑学院

学 科： 建筑学

研 究 生： 龙 瀛

指 导 教 师： 毛其智 教 授

副 指 导 教 师： 沈振江 副 教 授

二〇一一年四月

面向空间规划的微观模拟：数据、模拟与评价

龙

瀛

Urban Microsimulation for Spatial Plan: Data, Modelling, and Evaluation

Dissertation Submitted to
Tsinghua University
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Engineering

by
Long Ying
(Architecture)

Dissertation Supervisor: Professor Mao Qizhi

Associate Supervisor: Vice Professor Shen Zhenjiang

April, 2011

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；（3）根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》，向国家图书馆报送可以公开的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

作者签名： _____

导师签名： _____

日 期： _____

日 期： _____

摘要

本文旨在开展面向城市空间规划的微观模拟研究，对规划编制和评估中的规划支持方法进行探讨。城乡规划作为快速增长地区的空间管理手段，我国近年来这方面的计算机辅助规划技术应用水平不断深入，最主要的形式是地理信息系统（GIS）、RS、土地利用与交通模型等。但城市作为复杂自适应系统，由若干物理空间的地块和社会空间的城市活动主体构成，以元胞自动机（CA）和多主体系统（MAS）的自下而上的微观模拟方法在城市规划研究中有较大发展前景。本文以GIS、CA和MAS作为主要研究手段，构建相应的微观模拟模型，用于规划方案的模拟和评价，并在真实城市进行实证分析，具体包括：

一、探索为微观模拟模型提供数据条件的技术方法，在目前的数据稀缺环境下，综合考虑已有的统计数据、小规模典型调查数据，以及常识性知识，反演微观样本，作为微观模拟模型的数据支撑。

二、建立微观模拟模型，支持空间规划方案的制定：建立两个尺度的模拟模型，总规尺度的模型（BUDEM）将综合考虑多个方面对城市增长的约束条件，给出远景城市空间布局的各个情景，并基于模拟结果制定城市增长边界；控规尺度的模型（FEE-MAS）主要关注居民的居住区位、就业区位以及交通方式的选择行为，结合所生成的土地使用方式和容积率分布各异的城市形态对应的能源消耗和环境影响，识别一般规律，可以用于支持控规尺度规划方案的制定。

三、建立微观模拟模型，评估空间规划方案：这个方面开展两个方面的探索，其一为针对规划方案进行评估，分析是否有城市发展政策能够保证其实现，如果可以，则给出相应的政策参数；其二为针对北京市历次总规的空间布局方案进行评估，识别其在城市扩展中所起到的作用，并对其进行时空对比。

本文作为对在空间规划中采用微观模拟方法进行规划编制和评估支持的有益探索，开展了多个方面的研究工作，研究方法包括CA、MAS、空间分析、空间统计和人工智能等，研究对象包括总规和控规，有望提高我国规划支持系统领域的理论水平，改善规划实践中的量化分析能力。

关键词：空间规划；规划支持系统（PSS）；微观模拟；元胞自动机（CA）；多智能体（MAS）

Abstract

This dissertation aims to introduce microsimulation into spatial plans to support urban planning compilation and evaluation. The spatial plan as an effective measure for managing urban growth attracts extensive attentions from aspects of geographical information system (GIS), remote sensing (RS), as well as land use & transportation integrated models. Urban systems as a type of complex adaptive system, however, are composed by numerous parcels in the physical space and urban residents in the social space. The bottom-up microsimulation approaches, such as cellular automata (CA) and multi-agent system (MAS), have their opportunities in analyzing and simulating spatial plans. This dissertation will apply GIS, CA, and MAS based microsimulation techniques to develop microsimulation models for supporting urban spatial plan compilation and evaluation as follows.

Firstly, we proposed a data synthesis approach for urban microsimulation models. We disaggregate individual micro data using aggregate data, small-scale surveys and empirical researches to feed microsimulation models to tackle the current data sparse condition in China.

Secondly, we developed two microsimulation models for supporting spatial plan compilation. The first model, BUDEM, is developed based on CA incorporating four types of constraints to simulate future urban growth. The simulation results can be adopted as spatial plan alternatives as well as urban growth boundaries (UGB). The second model, FEE-MAS, is for calculating commuting energy consumption and environment impact for urban form in the inner city level. The quantitative relationships among them can then be identified accordingly using a global sensitivity analysis approach, thus supporting the compilation and evaluation of spatial plan.

Thirdly, we conducted two researches for evaluating spatial plan alternatives using the BUDEM model. One, spatial plan can be evaluated as possible or impossible in terms of the availability of urban policies, which is the reversed process of conventional urban growth scenario analysis. Two, spatial plan implementation effectiveness is spatiotemporally evaluated for five master plans in Beijing.

In sum, several key solutions are proposed in this thesis for introducing microsimulation into spatial plan with empirical researches in the hypothetical space and Beijing, respectively. The approaches included in this dissertation range from GIS, RS, CA, MAS, spatial analysis, and artificial intelligence, and the spatial plans cover both master plans and detail plans. Therefore, this dissertation is promising for promoting planning support techniques for spatial plans in China.

Key Words: Spatial plan; Planning support systems (PSS); Microsimulation; Cellular automata (CA); Multi-agent system (MAS)

目 录

第一篇 绪论篇	1
第 1 章 研究背景与意义	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	3
第 2 章 相关研究进展	6
2.1 城市系统微观模拟	6
2.2 总规尺度空间规划的微观模拟	7
2.3 详规尺度空间规划的微观模拟	8
2.4 微观模拟中的数据支持	10
2.5 小 结	12
第 3 章 研究内容	13
3.1 面向空间规划的微观模拟研究框架	13
3.2 本文研究内容	17
3.3 各章节之间的关系	18
第二篇 为微观模拟提供数据基础	20
第 4 章 居民微观个体的属性和空间反演	20
4.1 微观个体的数据反演方法	20
4.2 反演北京居住人口样本	25
4.3 小结：数据反演为微观模拟提供了良好的数据基础	33
第三篇 基于微观模拟模型探索城市空间发展	34
第 5 章 北京城市增长模拟（BUDEM 模型）	34
5.1 北京城市空间发展模型（BUDEM）	34
5.2 研究区域及模型数据	43
5.3 北京城市增长的历史参数识别（1986-2006）	46
5.4 远景城市增长模拟	47
5.5 利用模拟结果制定城市增长边界（UGBs）	53
5.6 小结：基于城市增长模拟为城市规划提供决策支持	57

第 6 章 城市形态-交通能耗-环境影响集成的微观模拟 (FEE-MAS 模型)	58
6.1 基于多智能体的集成模拟模型	60
6.2 FEE-MAS 模型开发与模拟流程	62
6.3 FEE-MAS 模型测试和模拟结果分析	67
6.4 典型城市形态对比分析	71
6.5 小结: 基于微观模拟能够识别城市系统的一般规律及测试典型规划理论	74
第四篇 基于微观模拟模型评价规划方案	76
第 7 章 北京城市总体规划方案的政策参数识别	76
7.1 识别城市形态对应的政策参数的基本方法	79
7.2 北京市域的基础数据	82
7.3 北京市的实证分析结果	84
7.4 小结: 利用微观模拟能够满足空间规划的核心需求	89
第 8 章 城市规划空间控制成效评估	90
8.1 基于 BUDEM 模型评价规划空间控制成效的可能性	92
8.2 北京的历次总规方案和对应的空间政策数据	94
8.3 一致性评价结果: 对比规划方案与实际发展	98
8.4 各历史阶段总规的实施成效对比	101
8.5 新版总规在各区县的实施成效对比	102
8.6 一致性评价与基于城市扩展视角评价的对比分析	103
8.7 小结: 微观分析方法在规划评估中的有益尝试	104
第五篇 结论篇	105
第 9 章 结论与建议	105
9.1 主要结论	105
9.2 主要创新点	106
9.3 建 议	107
参考文献	108
致 谢	119
声 明	120
附录: 图表目录	121
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	123

第一篇 绪论篇

第1章 研究背景与意义

1.1 研究背景

本文旨在对城乡规划中采用微观模拟技术进行空间决策支持的方法进行探讨。城乡规划作为快速增长地区的空间发展的有效管理手段，空间规划是其核心内容，主要作用是对城乡资源、空间布局等事宜的统筹与安排。通过空间规划制定合理的城市形态，可以在源头促进低碳城市的建设，也是“节能减排”的重要保障措施。

我国近年来这一方面的计算机辅助规划的技术水平和应用都不断深入，最为主要的形式是地理信息系统(Geographical Information Systems, GIS)、遥感(Remote Sensing, RS)和宏观模型(统计模型、空间相互作用模型等)的应用。但真实的城市系统是不断变化的、随机性、非平衡、非线性的复杂巨系统(吴良镛, 2001)，以往的自上而下的宏观模型在揭示城市中大量的复杂现象和动态机制方面有所欠缺。城市作为复杂的自适应系统，是由若干个物理空间的地块、居民、公司等个体构成的，自下而上的微观模拟适合研究城市空间问题，同时规划的公共参与、社会公平等要求也与微观模拟的需求不谋而合。微观模拟方法最先应用于管理学和地理学，管理学中的微观模拟一般空间概念不强，而地理学中的微观模拟一般侧重于对时空动态的地理过程的模拟，与城乡规划的应用还有差距。

在这种背景下，我们将针对不同尺度空间规划的编制内容和研究重点，借助GIS、RS基础技术和复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)理论等，开展面向空间规划的多尺度城市系统微观模拟(Urban micro-simulation of multi-scale for spatial planning, UMSP)，采用基于微观模拟制定或评价宏观政策(如空间规划)，以促进作为人居环境科学重要构成部分的规划支持系统(Planning Support Systems, PSS)的理论发展，并辅助解决空间规划编制中的实际问题。

概念界定:

空间规划 (Spatial Planning): 其概念来自国外, 是社会经济、社会文化和生态政策的地理表达, 是各种范围的土地及其上部空间的使用规划和秩序的总和, 一般也特指区域规划(张伟等, 2005), 在欧美国家、日本等都有空间规划的概念, 尤其以欧洲国家为主, 例如英国、法国和德国等。1997 年欧盟委员会发表了《欧洲空间规划制度概要》(The EU Compendium of Spatial Planning Systems and Policies) 中将空间规划定义为“是主要由公共部门使用的影影响未来活动空间分布的方法, 它的目的是创造一个更合理的土地利用和功能关系的领土组织, 平衡保护环境和发展两个需求, 以达成社会和经济发展的总目标。空间规划包括协调其它行业政策的空空间影响, 达成区域之间一个比单纯由市场力量创造的更均匀的经济发展的分布, 规范土地和财产使用的转换”。在我国, 也有学者提出以城镇体系为核心的空间规划的概念(王凯, 2006)。同时我国国土系统倡导开展土地利用规划, 发展与改革委员会系统也倡导开展主体功能区划, 二者中都有空间规划的成分。鉴于我国没有法定的空间规划, 本论文所指的空间规划特指我国规划系统的城乡规划如城市总体规划(简称总规, 下同)和城市详细规划(简称详规, 下同)中涉及城市物质空间的结构、形态和布局的内容。

微观模拟 (Micro-simulation): 是由美国经济数学家 Orcutt(1957)等人创建, 它以个人、家庭、企业、汽车、建筑单体、邻里单元、地块等微观个体作为描述、分析和模拟的对象。而宏观模拟一般以统计小区、交通小区、行政区、行业、不同共同特征的人群等为基本对象。随着 CAS 理念的提出, 促进了微观模拟的发展, 元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 和多主体系统^① (Multi-agent System, MAS) 是目前基于微观模拟的典型研究方法, 本文也将以 CA 和 MAS 作为主要研究手段。微观模拟能够通过个体层面的分析展现出由个体间相互作用而产生的群体效应 (如涌现, Emergence)。微观模拟与宏观模拟的区别主要在于基本研究对象, 可以用于研究同一类问题, 但微观模拟更能够反映人居环境科学的“五个基本前提”, 如“人居环境科学的核心是人”、“人居环境是人类与自然之间发生的联系与作用”等; 同时微观模拟也更容易反映人居环境科学的“五个层次”, 特别是社区和建筑层次。因此微观模拟可以作为研究人居环境科学的重要技术手段, 用于分析城市这个复杂巨系统, 并在此基础上辅助空间规划的制定和评价。

多尺度 (Multi-Scale): 用于界定空间规划的不同研究尺度, 根据城乡规划的法定层级, 分为如下两个尺度。

^① 也有文献将其称为“多个体系统”或基于个体建模 (Agent-based Modeling, ABM)。

(1) 总规尺度：即宏观空间尺度，某区域网格作为研究对象，主要研究内容是支持制定城市总体规划中关于城镇体系、空间结构和土地使用类型的内容；

(2) 详规尺度：即中观空间尺度，地块、个体、家庭或建筑作为研究对象，主要模拟对象是支持制定城市详细规划中关于土地使用和开发强度的内容（详规又可细分为控制性详细规划和修建性详细规划，本文的详规特指控制性详细规划，简称控规）。

1.2 研究意义

1.2.1 建立面向空间规划的微观模拟研究框架和典型应用，对促进规划支持系统的发展具有理论价值

城市系统模拟方面，规划、地理和经济等专业的侧重点是有区别的，如经济专业侧重于从需求角度采用宏观模拟的方法识别城市的总体发展需要；地理专业侧重分析一个地区的资源承载力，即经济需要的分配受地表和资源地理条件的限制情况；规划专业则应侧重从人的需求分析城市所容纳的各种城市活动。目前微观模拟在地理学中的应用较多，其主要侧重于从地理约束（constraint）评价发展适宜性（suitability），进而进行城市形态（form）的模拟，可以作为空间规划的前提条件，但总规层面的空间规划的研究内容往往是根据所确定的城市性质、发展目标和城市规模，确定城市的城镇体系、空间结构和土地使用类型规划，以及配套的政策，如产业发展、社会事业、公共服务设施、生态环境保护、交通基础设施、市政基础设施和灾害防治等，而控规层面的空间规划则是基于总规进行土地使用方式的细化和开发强度的规划。可以看出目前地理学所做的研究工作是不能够满足空间规划的决策支持需要的，本文将在已有相关学科研究的基础上，建立面向空间规划的微观模拟研究框架，并针对其中部分内容开展典型研究和应用，可以补充国际、国内该领域研究的不足，对促进规划支持系统的理论发展也具有重要意义。

1.2.2 支持空间规划中的关键研究内容，对提高规划的科学性具有重要的实践意义

目前在我国的空間规划编制中规划支持系统正成为研究的热点(杜宁睿等, 2005; 龙瀛, 2007; 龙瀛和毛其智, 2010), 但其中针对土地使用方案的确定、开发强度的确定、空间政策的定量评价等方面还较为薄弱, 另一方面, 规划方案是否与配套政策相协调, 研究都还比较少。通过在空间规划中引入微观模拟方法, 以

地块、家庭乃至个人作为分析和模拟的对象，可以为这些问题的解决提供决策支持。同时近年来我国城市规划中对社会问题的强调越来越多，公共参与也广为被关注，从微观个体的角度进行城市系统的分析，有助于这种视角的切入。我国正处于快速的发展阶段，随着城市增长空间的日趋紧张，城市再开发即城市改造在我国今后所占的比例也将越来越大，对不同尺度空间规划的需求也将越来越多，这些都可以通过微观模拟进行支持。因此面向空间规划的微观模拟研究也具有较为现实的实践意义。

1.2.3 定量分析作为空间规划核心成果的城市形态，在源头促进城市系统的可持续发展

城市形态是节能减排、低碳经济等理念的重要载体，其作为空间规划的重要成果，可以从源头保证城市系统的可持续发展。不适当的城市形态，如城市蔓延，会产生较多的负面影响，如土地资源过度消耗(Kahn, 2000; Johnson, 2001)，通勤时间和成本增加，交通拥堵乃至空间污染(Kahn, 2000; Ewing 等, 2002)，可支付住房能力的下降(Danielsen 等, 1999)，基础设施建设成本的增加(Speir 和 Stephenson, 2002)、邻里关系的弱化(Ewing, 1997)，公共健康下降(Ewing 等, 2003)，以及社会公平性的下降(Bullard 等, 1999)。相反，合理的城市形态在一定程度上可以解决上述的部分或全部的城市社会、经济和环境问题，紧凑城市(Breheny, 1992; Gordon 和 Richardson, 1997; Kii 和 Doi, 2005)、精明增长(Shen 和 Zhang, 2007)等理念的特点也正是可持续的城市形态。本文将定量评价不同类型城市形态的能源消耗，识别基本的规律，可以辅助支持空间规划方案的制定。同时本文也将探讨如何实现预先设定的城市形态，给出相应的政策保障，对促进城市系统在城市形态层次的节能减排具有重要理论探索和实践意义。

1.2.4 探索稀疏数据环境下开展城市系统微观模拟的方法

微观模拟研究的开展受到数据的制约，其所使用的数据是表征微观样本特性的属性，比如个人样本的属性包括年龄、性别、民族、婚姻、教育和工作等，其获取需要大量的人力、物力和财力(van Sonsbeek 和 Gradus, 2006)。我国的数据体制与西方发达国家不同，统计部门的基本样本数据不公开，可获取的仅为统计层次上的数据，如某个行政区或某个行业的总体信息，适用于宏观分析模拟，但并不适合微观模拟。国外的研究也大多不能采集到现时、可立刻使用的微观样本数据(Crooks 等, 2008)。因而在国内外的研究中，往往采取大量分散的、不同目的的调查形式，以针对独立的个体案例的应用，但这些数据在项目之外并没有得

到系统的应用。这种数据的稀缺情况，无论在国外还是在国内，都正制约着微观模拟的研究和应用。在这种背景下，我们拟在本论文中提出一种根据统计数据、典型规则、典型调查等容易获得的基础数据反演微观样本数据的方法，以适应我国稀缺数据条件下的微观模拟。这种方法能够适合我国现有统计制度下的模型构建，是一种稀缺数据环境下微观模拟数据获取方法的有益探索，对于推动空间规划中微观模拟研究的顺利开展具有较大意义。

综上所述，有必要开展面向空间规划的城市系统微观模拟工作，以复杂适应系统作为理论基础，探索稀疏数据条件下的数据获取方法，建立微观模拟模型，用于空间规划方制定的辅助支持和评价。作为人居环境科学的核心构成部分，开展本研究有助于提高规划支持系统领域的理论发展水平，改善空间规划实践中的量化分析水平。

第2章 相关研究进展^②

2.1 城市系统微观模拟

城市系统作为一个始终变化的、开放且复杂的非线性系统，从二十世纪初期到中叶，人们便试图通过一些技术手段，对其进行综合分析。随着城市分析、模拟技术的日益进步，宏观社会模型也在研究城市问题与现象的过程中渐渐体现出它的分析作用，但其或采用总体分析的方式，忽略微观个体的行为，或采用抽样的方式，分析典型个体，忽略个体与总体样本间的差异。这两种方式都使得研究缺少坚实的微观基础，无法或很难对不同微观个体的作用效果和个体变化对总体的影响做出评估。

虽然微观模拟的历史不长，但其发展却较为迅速。在美国，微观模拟曾应用于收入补助法、家庭资助计划、国家健康保险计划、多子女家庭补助法、食品券、养老金、盲人补助、残废人补助、卫生保健法、房屋补贴、汽油补贴、低于规定生活标准的所得税、个人所得税等法规的研究和分析（关亚骥和郭绍禧，1996；Orcutt 等，1986），并要求所有相关领域政策的制定，都需要前期开展定量的微观模拟工作作支持。而在步入了二十一世纪之后，微观模拟方法越来越因其在政策分析上的优势而在许多发达国家得到了普遍的应用(李善同等, 1999)。

复杂适应系统（CAS）的理念和研究方法对微观模拟模型的发展起到了很大的推动作用，该理论是由美国 SFI（Santa Fe Institute）的 Holland 教授于 1994 年首次提出的，他把城市系统、生态系统、神经系统、计算机网络等称为复杂适应系统，认为存在某些一般性的规律控制着这些复杂适应系统的行为(Holland, 1995)。CAS 中的成员称为具有适应性的主体，简称主体，所谓适应性，是指它能够在环境以及其他主体间进行交流，并在这种交流中学习或积累经验，且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式，整个系统的演变或进化都是在这个基础上产生的（陈禹和钟佳桂，2006）。因此 CAS 被看作研究城市系统时空复杂的基础理论，适合用于城市系统的微观模拟(Batty, 2005)。这方面的研究往往借助 GIS，有以地理空间（如标准网格、非规则多边形）为研究对象开展的研究，也有以活动个体（agent）为单位进行的微观模拟。城乡规划中人、地和房是三个关键的要素，都

② 篇幅有限，研究进展部分仅就面向空间规划的微观模拟进行阐述，而针对空间规划的宏观研究较为成熟，此文不再赘述。

对应不同的微观样本，因此通过微观模拟的方法更能体现规划的本质问题。

基于上述文献分析，可以得到以下结论：

(1) 在 GIS、计算技术的发展带动下的基于复杂适应系统的模拟方法将是城市系统微观模拟未来的重要发展方向之一，CA 和 MAS 已经成为基于复杂适应系统理论的主流微观模拟方法，可以作为宏观研究的必要补充；

(2) 随着城市规划学科的发展，目前我国的规划理念侧重于社会方面的分析，如我国的“以人为本”、“和谐社会”等，这些都需要从微观入手进行实现，为在空间规划中开展微观模拟研究工作提供了较好的机会。

下面分别对总规和详规两个尺度的空间规划中的微观模拟方法，以及微观模拟的数据支持等方面的研究进展进行介绍。

2.2 总规尺度空间规划的微观模拟

在总体规划尺度，空间规划作为政府进行城市空间管制、引导城市增长的重要手段，主要是根据所确定的城市性质和发展规模，进行土地使用类型的分配，制定土地使用方案，这个阶段的研究对象可以是地理网格。国际和国内在地理学领域基于 CA 开展了较多城市形态模拟（如城市空间增长、城市扩展）工作。CA 作为复杂性科学的重要研究工具，其特点是时间、空间、状态都离散，其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的，因此 CA 适合模拟时空动态过程，可以较好地模拟城市作为一个开放的耗散体系所表现出的突变、自组织、混沌等复杂特征(陈干和闫国年, 2000)，这方面典型的实证研究如美国辛辛那提(White 和 Engelen, 1997)、美国旧金山湾和华盛顿-巴尔的摩地区(Clark 和 Gaydos, 1998)、美国 Buffalo 市(Xie, 1994)、中国广州(Wu, 1998; Wu, 2002; Wu 和 Webster, 1998)、中国珠江三角洲(Yeh 和 Li, 2001)、北京(He 等, 2008; Long 等, 2008a; Long 和 Mao, 2010)等。

将 CA 应用于城市空间增长的模拟，鉴于城市增长的复杂性(既有自然的约束，又有人类的扰动)，需要在仅考虑邻域影响的简单 CA 模型的基础上，考虑其他影响城市增长的因素。部分学者开始关注在 CA 城市模型中引入约束条件(即约束性 CA)来控制模拟过程(Ward 等, 2000)，总体上约束性 CA 模型的约束条件分为邻域、宏观社会经济、空间性和制度性四类约束条件(Long 等, 2008b)。

地理学领域基于 CA 开展的城市形态的模拟，是城市规划编制的基础，也有研究基于其研究进行规划方案的情景分析(Engelen 等, 1997; Ligtenberg 等, 2001; Nijs 等, 2004; Stevens 等, 2007)，但这些研究是自然地理方面的考虑空间约束的发展适宜性评价，与总体规划的编制内容有较大不同。首先，对城市的发展政策考虑不

够，如城镇体系、农田保护、环境保护、交通基础设施、市政基础设施等，这些都是重要的制度性约束条件，但是已有研究考虑的很薄弱；其次，总规更侧重于土地使用和城市结构，这点在已有的仅考虑城市形态的研究中探讨的比较少；在规划实践中所确定的规划空间形态，往往和实际的城市发展有偏差，屡见被突破的现象，而规划部门对此又往往缺乏政策指导，不知道规划的空间形态需要哪些政策来支持以辅助其实现，这些政策又与现行的城市发展政策有何不同，都是城市规划部门所关心的重要问题，但这个问题在已有研究中都没有探讨。我们将在本文对这一系列问题进行探索。

基于上述文献分析，可以得到以下结论：

(1) 目前在总体规划层次，微观模拟的方法基本上是 CA，并侧重于利用 CA 进行未来城市形态的预测和模拟，进而作为规划方案制定的参考，无论在国际还是国内，研究都已较为成熟；

(2) 地理领域的相关已有研究和规划需求不同，总体规划总的很多关键问题还没有解决，如对综合约束条件（特别是制度性约束条件）的考虑，规划形态与空间政策的协调程度等。

2.3 详规尺度空间规划的微观模拟

城市详细规划是以城市总体规划或分区规划为依据，对一定时期内城市局部地区的土地利用、空间环境和各项建设用地所作的具体安排^③，其中空间规划最为主要的内容是确定建设地区的土地使用性质和使用强度的控制指标。该尺度的微观个体一般为地块，基于栅格 CA 并不能很好地表征真实的微观个体。因此在这个层次一些学者开始研究基于非规则多边形 (irregular polygons) 的矢量 CA 进行相关的微观模拟，有采用 Voronoi 多边形作为 CA 元胞 (Shi 和 Pang, 2000)，但是其并不与真实世界的实体相对应，仅代表距离空间点最近的点的集合构成的区域，并不是空间物体本身。但多数研究中非规则多边形都代表现实世界中存在的实体：Benenson 和 Torrens(2004a,b)、Torrens 和 Benenson(2005)提出的地理元胞自动机系统 (Geographic Automata Systems, GAS) 中，集成了 CA 和 Agent 用于模拟地理系统，其中关于 CA 元胞的形式提到了非规则多边形的可能，但该研究更多的都是侧重于地理方面的模拟，对城市系统内部的功能结构没有考虑；Stevens 和 Dragicevic(2007)所开发的 iCity 则是一个基于矢量地块的 CA 的城市规划决策的工具，能够进行城市空间增长的多情景模拟，并对各情景进行评价，该工具考虑了

^③ 定义来自中华人民共和国国家标准城市规划基本术语标准 (2004-5-19 颁布)。

土地使用方式的模拟，但对开发强度因素没有考虑；Shen 等(2009a)所开发的地理模拟模型也是基于矢量 CA，用于模拟日本的城市改造，重点从土地使用方式进行了时空动态模拟；Moreno 等(2008 和 2009)提出了可以改变几何形状的矢量 CA 模型，邻域为对象的缓冲区内相交或包含的多边形，但其主要侧重于从 GIS 的技术方法进行探讨，并不是面向控规应用的实证研究。

除了矢量 CA 这种微观模拟方法外，也有引入 MAS 进行详规层面规划方案的制定，规划师主体 (Planner Agent, PA) 是一种较新的规划支持方法。Ligtenberg 等(2001)将规划意图和规划师的决策归纳为 agent 的规则，并结合 CA 用于真实城市用地方案的生成；Saarloos 等(2005)则将专家作为 agent，多个专家即多个 agent 从各自偏好产生规划方案，通过协商给出最终方案。这一方面，国内研究还处于空白。

除了规划师主体方面的研究，MAS 在国外空间规划中的运用，主要有土地利用覆盖变化模拟(Parker 等, 2003)、空间隔离(segregation)(Benenson 等, 2002; Laurie 和 Jaggi, 2003)、虚拟空间内的政策评价(如绿隔对城市蔓延的影响(Brown 等, 2004)、紧凑城市政策评价(Kii 和 Doi, 2005))、商业政策评价(Shen 等, 2011)、居住区位选择(Brown 和 Robinson, 2006)和真实城市的商业设施选址(Yi 等, 2008)等。其中，MAS 在土地利用方面的应用最多，侧重于土地利用覆盖变化 (Land-use and cover change, LUCC)、城市扩张 (Urban Expansion) 等地理问题，有在虚拟城市中开展的实验研究(Evans 等, 2006)，更多的为真实城市。这类研究一般考虑政府、开发商和居民三类 agent，其中居民 agent 一般不是真实城市中的居民，而是某待开发实体空间对应的决策者(Li 和 Liu, 2008; Evans 和 Kelly, 2004)。目前多数研究都考虑了 CA 和 MAS 进行集成研究真实城市的城市增长，其中 CA 代表模型的物理空间部分 (即环境)，而 agent 对应可移动的决策主体(Li 和 Liu, 2008)。

在国内，MAS 的应用领域与国际类似，如土地利用覆盖变化模拟 (吴文斌等; 2007; 田光进和邬建国, 2008)、人口分布、发展与预测模拟(马熙源和高西宽, 2007; 景楠, 2007; 吴静, 2008)和居住区位和房屋选择分析(陶海燕等, 2007; 晁怡等, 2007)，这些都是对空间政策模拟的一些尝试。与国际情况类似，MAS 在土地利用方面的应用最多，并也侧重于模拟不同的空间政策对土地利用覆盖变化、城市扩张等地理问题的影响，有诸多实证研究(李新延和李德仁, 2005; 黎夏等, 2006; 古琳和程承旗, 2007; 张鸿辉等, 2008)，也有将栅格 CA 和 MAS 集成，用于城市用地的扩张模拟(杨青生和黎夏, 2007)。这些研究是将 MAS 用于城市空间政策分析的有益探索，但也存在一定的不足，如鉴于微观个体数据的不足，存在与国际相同的问题，如将大量的人 (如 1000 个) 作为 1 个 agent 进行研究，这样失去了微观模拟

的精髓。

基于上述文献分析，可以得到以下结论：

(1) 在详规中栅格 CA 已经不适用于该尺度的微观模拟，国际上开始探讨基于矢量 CA（一般以地块作为元胞）模拟这个层次的城市形态，并侧重于土地使用方式的模拟，但主要还是侧重于地理的角度。总体上距离详规的决策支持还有一定距离；

(2) GIS 与 MAS 进行紧密集成将是未来的趋势，已有的 MAS 的仿真平台一般侧重于理论的探索，而不是真实城市的实证分析；

(3) 微观样本数据制约着 MAS 在真实城市中的应用，大多数研究都不能够做到 1 个家庭或 1 个居民作为 1 个 agent。

2.4 微观模拟中的数据支持

与传统的自上而下的宏观分析模拟不同，城市系统微观模拟是典型的自下而上的过程，它以企业、家庭乃至个人等微观个体作为描述、分析和模拟的基本对象，每个微观个体都具有独有的自身特性与丰富的内部认知结构(Ballas 和 Clarke, 2000; Hanaoka 和 Clarke, 2007; Wu 等, 2008)。微观模拟（如大多数 MAS 研究）的应用目前受到个体样本稀缺的限制。个体样本的属性特征是微观模拟的核心数据(Pudney 等, 1994)。在数据稀缺的环境下，MAS 的主要问题之一是如何考虑 agent 属性(attribute)、行为(behavior)乃至偏好(preference)的异质性(heterogeneity)。很多反映土地使用动态的 MAS，都不能很好地反映居民层次样本信息属性(actor-level)的异质性，这类模型倾向于使用集计(aggregate)数据作为 agent 的属性，如 ILUTE(Miller 等, 2004)，或根据文献调研获得可接受的取值范围然后随机赋值给各个居民 agent，如 LUCITA 模型(Deadman 等, 2004)。

已有的 MAS 研究往往不能够做到 1 个 agent 对应 1 个居民个体。如张鸿辉等(2008)将 30m*30m 的网格内的平均居民数量作为 1 个 agent，陶海燕等(2009)在居住区位选择的 MAS 中，1 个网格对应 1 个居民 agent，并不是网格空间所对应的实际居民数目；Shen 等(2009b)分别尝试将 1、2、3、5 和 10 个居民作为 1 个 agent，发现不同的比例对模拟结果具有较大的不确定性，如果过于集聚也失去了微观模拟的精髓。Brown 和 Robinson(2006)的研究也表明 MAS 中居民偏好的异质程度对模拟的土地使用形态具有较大的影响。

个体样本信息主要分为空间信息和属性信息，因此个体信息的反演分为空间反演和属性反演两类，其主要是基于宏观的统计数据实现。关于个体样本的空间反演，更多的研究侧重于人口数据空间化(Mennis, 2003; 王雪梅等, 2004; Liao 等,

2010), 这方面的研究已较为成熟, 其基于宏观的人口普查公报结合相关因素, 利用 GIS 反演人口密度曲面, 进而反演人口样本的空间分布, 这一过程并不涉及个体样本属性数据的反演。基于人口数据空间化的反演结果, 可以实现个体样本的空间定位, 结合环境空间图层, 可以识别个体样本所处的环境变量(如 Robinson 和 Brown(2009)所提及的与学校或工作地的距离、邻里相似性、景观质量等), 进而作为 agent 的空间属性用于 MAS 模拟(Crooks, 2006; Crooks, 2008; Li 和 Liu, 2008; 张鸿辉等, 2008; Shen 等, 2009b), 这种以环境变量作为居民 agent 主要属性的研究思路是当前数据稀缺环境下城市系统 MAS 的主流方法, 这种情况下对个体样本的自身属性考虑的还比较少。

实际上很多情况下 agent 进行决策还是需要自身属性, 如居民 agent 的收入、受教育程度等属性, 对居住区位选择、就业区位选择等行为都有较大的影响, 因此 agent 的自身属性在 MAS 中也需要重视。关于个体样本的自身属性数据的获取, Brown 和 Robinson(2006)基于 592 份居住地选择影响因素的调查问卷, 分别采用随机设定、基于调查得到的概率分布等方法, 分别设计了五种不同异质程度的居民 agent 居住区位选择偏好的实验, 但实验中并没有考虑居民 agent 的自身属性, 而是居民 agent 针对不同环境因子的偏好。Li 和 Liu(2007)初步地指出了利用统计数据定义 agent 属性的可能性, 其根据统计数据将所有城市居民根据有无子女、收入两个属性分为六类, 每类具有不同的环境变量偏好, 但其仅考虑两个自身属性并基于这两个自身属性将个体样本分为四类, 并没有给出每个样本的反演的具体属性数值, 也没有考虑样本属性间的关系。陶海燕等(2009)根据统计年鉴采用概率分布的形式构建了居民 agent 的收入属性, 并基于不同的收入区间设定了不同的环境因子偏好, 但其并没有考虑多个属性及属性之间的关系。可以看出并没有文献重点针对微观模拟中个体样本的自身属性进行反演。

基于上述文献分析, 可以得到以下结论:

(1) 大多数已有 MAS 中的 agent 的属性多是根据个体样本所处的空间位置所确定的环境变量, agent 的自身属性鉴于数据稀缺的原因考虑的较少, 也少有研究做到 MAS 中 1 个 agent 对应一位居民或家庭;

(2) 国内外利用统计资料、典型调查、典型规则反演个体样本的空间和属性信息, 根据文献调研, 尚没有已有文献探讨。

2.5 小 结

根据对国际国内该领域的研究现状的分析,可以看出基于复杂自适应系统的模拟方法将是面向空间规划的微观模拟未来的重要发展方向之一,其中CA和MAS已经成为典型的研究方法,在各个规划尺度都有了一定的探索,但是这些研究更多的是侧重于地理学、社会学角度开展的,距离空间规划的研究需求还有较大的空白,很多关键问题还有待解决。因此该领域的研究以后应该根据空间规划的具体研究内容和需求开展,并考虑我国数据稀缺的客观环境。本文正是将以上几点作为研究切入点,通过多种定量方法的集成应用,提出面向空间规划的城市系统微观模拟的理论方法并进行实证研究,辅助规划方案的编制和评估。

第3章 研究内容

3.1 面向空间规划的微观模拟研究框架

本文主要将围绕面向空间规划（总规和控规）的微观模拟开展研究工作。首先需要对规划支持的工作内容进行分析。2008年1月1日施行的《中华人民共和国城乡规划法》中关于城乡规划的定義包括城镇体系规划、城市规划、镇规划、乡规划和村庄规划，其中城市规划分为总体规划和详细规划，详细规划分为控制性详细规划和修建性详细规划。本研究的空间规划主要针对其中的总体规划和控制性详细规划（图3-1）。关于规划的编制，在2006年4月1日施行的《城市规划编制办法》中，第二十九条提出总体规划纲要主要应包括九方面内容，其中涉及空间规划的有“提出禁建区、限建区、适建区范围”和“研究中心城区空间增长边界，提出建设用地规模 and 建设用地范围”两点。第四十一条提出控制性详细规划应包括六方面问题，其中涉及空间规划的有“确定规划范围内不同性质用地的界线，确定各类用地内适建，不适建或者有条件地允许建设的建筑类型”和“确定各地块建筑高度、建筑密度、容积率、绿地率等控制指标”两点^④。《中华人民共和国城乡规划法》除了强调规划的编制外，也在第四十六条中明确提出，应该定期对城乡规划的实施情况进行评估。

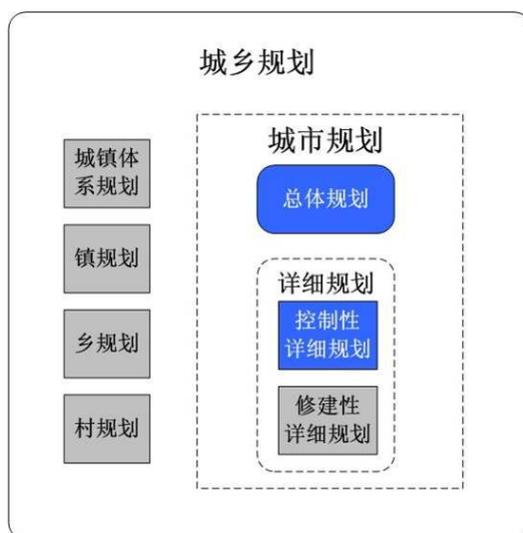


图 3-1 中国城乡规划体系及本文研究对象（总体规划和控制性详细规划）

^④ 与自2011年1月1日起施行《城市、镇控制性详细规划编制审批办法》的要求也基本一致。

根据上述对规划支持内容的分析,制定面向空间规划的微观模拟框架(图 3-2)。CA、MAS、地理信息科学和人工智能技术是该框架的理论和方法的基础,针对城市系统微观模拟开展两个层面的工作,第一个层次是采用技术手段为微观模拟模型提供数据支持,第二个层次是建立面向空间规划的模拟模型,主要围绕辅助支持总规和控规的方案制定和评估开展。该研究框架力争能够辅助支持空间规划核心问题的分析、预测、模拟和评价,可以作为该领域的未来研究方向或研究计划。具体研究内容如下:

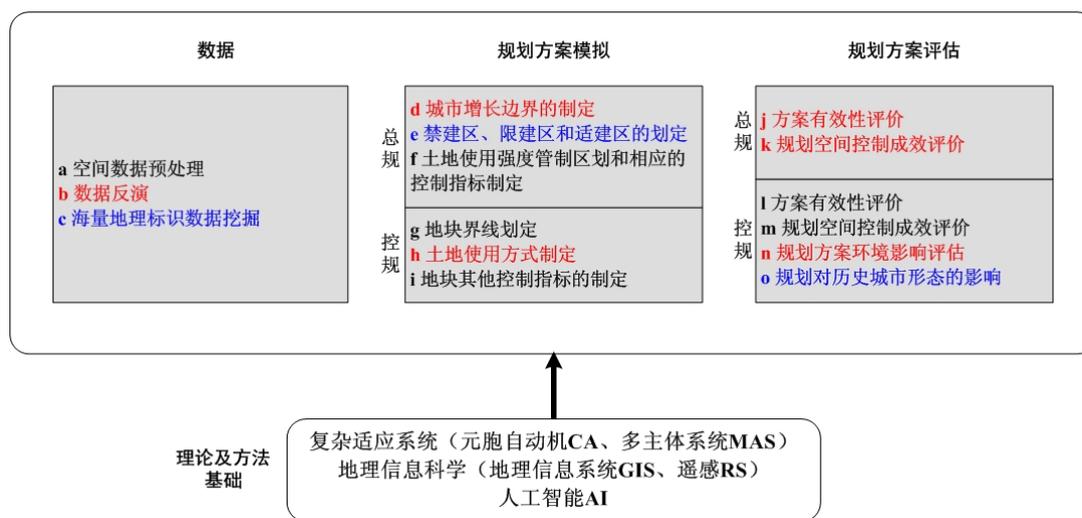


图 3-2 面向空间规划的微观模拟研究框架

(1) 数据方面

a: 空间数据预处理: 在已有充足的微观数据条件下, 需要将其处理为微观模拟模型所需要的数据, 常规的数据预处理、标准化方法可以支持, 这方面的研究和实践较多, 本文不再赘述。

b: 数据反演: 即在没有充足微观数据开展工作的情况下, 如何利用现有的宏观数据、典型调查、科研成果和常识性知识, 反演得到用于初始化微观模拟模型的数据, 本文将对其进行详细探讨(第4章)。

c: 海量地理标识数据的挖掘: 随着位置获取技术的进步, 高质量个体时空数据的获取正不断成为可能, 使得获取大量微观样本数据成为可能, 如何对这些数据进行处理、分析和挖掘, 使其能够作为一种新的数据源用于微观模拟模型, 将是本框架的研究内容之一。Long (2011)对基于公交 IC 卡刷卡记录识别居民的居住地和就业地, 进而将识别的结果作为微观模拟模型的输入数据进行了探讨, 考虑到本论文的篇幅和与其他章节的连贯性, 本文不对这点进行探讨。

(2) 规划方案模拟方面

在总规层次，主要可以开展以下几方面工作：

d：城市增长边界（即规划建设用地范围）的制定：作为总规的核心内容，本文将在第5章探讨基于CA模拟城市增长的结果支持制定城市增长边界的方法。

e：禁建区、限建区和适建区的划定：即通过划定这三个分区，支持城镇建设用地的布局，其划定方法参见龙瀛等(2006)、龙瀛等(2011c)和Long等(2011a)，具体给出如何利用限建要素（control factor）生成作为微观样本的限建单元（control cell），进而实现分区方案的制定和成果输出。在第5章基于CA制定城市增长边界的过程中，分区方案被作为一项约束条件引入了微观模拟模型。考虑到本论文的篇幅和与其他章节的连贯性，本文不对基于微观模拟模型划定分区进行探讨。

f：土地使用强度管制区划和相应的控制指标制定：可以采用“第2章 研究进展”提及的规划师主体（PA）的方法，通过对历史规划文档的数据挖掘，或规划师的调查等方式，获得规划师制定相应控制指标的规则，作为规划师主体的偏好，制定土地使用强度管制区划和其他控制指标。目前这一方面还有待后续深入研究，图3-3仅给出基本研究思路。规划师主体的方法还将用于其他技术环节。

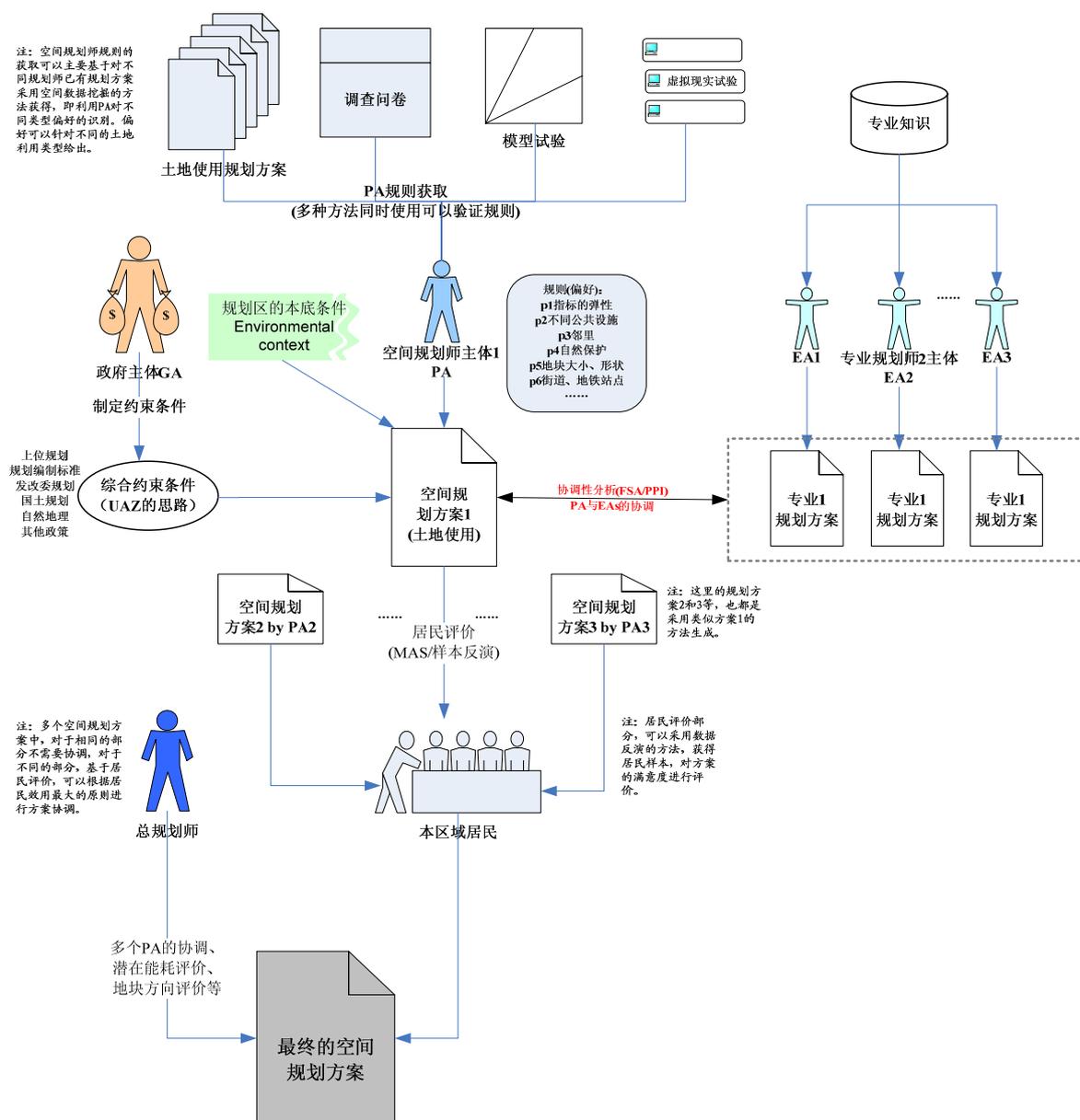


图 3-3 规划师主体 (PA) 方法基本思路

在控规层次，主要可以开展以下几方面工作：

g：地块界线划定：同样可以采用规划师主体的方法（类似 f）实现，目前这一方面还有待后续研究。

h：土地使用方式制定：本文在第 6 章在虚拟空间基于 MAS 方法对其进行了初步探讨，在真实空间还有待研究。

i：地块其他控制指标如容积率、建筑高度的制定：可以采用规划师主体的方法实现，目前这一方面还有待后续研究。

(3) 规划方案评估方面

在总规层次，主要可以开展以下几方面工作：

j: 方案有效性评价: 本文将在第7章采用约束性CA方法, 分析规划方案在政策支持下是否可以实现, 并对多个规划方案从支持政策层面进行对比分析。Long等(2011b)提出的利用综合约束性CA和全局敏感性分析评估方案有效性的方法, 也可以纳入本框架。

k: 规划空间控制成效评价: 本文在第8章从两个方面开展了这项工作, 一方面采用一致性分析的方法对比规划方案和实际城市形态, 一方面采用Logistic回归的方法, 评估规划方案在城市增长过程中所起到的成效, 并分别从时间和空间两个维度进行识别。这两方面研究都是基于将整个研究范围划定的若干网格作为微观样本。

在控规层面, 主要可以开展以下几方面工作:

l: 方案有效性评价: 与总规的对照内容类似, 可以对第7章的方法进行扩展, 使其能够除了考虑是否被开发为城镇建设用地这一评价指标, 还考虑容积率、建筑高度和绿地率等控制指标, 实现控规方案的有效性评价。

m: 规划空间控制成效评估: 总规部分的规划空间控制成效评估中采用的一致性方法同样适用于控规的空间控制成效评估, 目前这一方面还有待后续研究。

n: 规划方案环境影响评估: 本文将在第6章采用MAS方法在虚拟空间对控规方案的潜在通勤交通能耗和环境影响进行评估, 并分析城市形态与通勤交通能耗的定量关系。

o: 规划对历史城市形态的影响: 主要探讨规划方案制定的空间布局与历史或现状城市肌理的定量关系, 分析规划对城市形态的影响程度。龙瀛等(2010a)初步探讨了利用地块方向这一指标评价北京市控规方案与民国时期城市形态的差别。考虑到本论文的篇幅和与其他章节的连贯性, 本文不对基于微观模拟模型评估规划对历史城市形态的影响进行探讨。

3.2 本文研究内容

本文的研究内容是“3.1 面向空间规划的微观模拟研究框架”的子集, 针对总规和控规的部分研究内容进行了探讨, 也涵盖了数据、模拟和评估三个方面的工作。具体如下:

3.2.1 探索为微观模拟模型提供数据支持的技术方法

数据方面, 将在目前的数据稀缺环境下, 综合考虑已有的统计数据、小规模典型调查数据, 以及常识性知识, 反演微观样本, 作为微观模拟模型的数据支撑。

3.2.2 建立微观模拟模型，支持空间规划方案的制定

建立两个尺度的模拟模型，辅助支持空间规划方案的制定。宏观尺度的模型将主要关注城市的空间增长模拟趋势，即城市建成区范围的扩展过程，综合考虑多个方面对城市增长的约束条件，给出远景城市空间布局的各个情景，并基于模拟结果制定城市增长边界（Urban Growth Boundaries, UGBs），可以用于战略规划和总体规划层次。微观尺度的模型主要关注居民的居住区位、就业区位以及交通方式的选择行为，结合所生成的土地使用方式和容积率分布各异的城市形态对应的能源消耗和环境影响，识别一般规律，可以用于详规尺度的方案制定。

3.2.3 建立微观模拟模型，支持空间规划方案的评估

城市系统微观模拟模型的功能，除了辅助支持规划方案的制定，评估空间规划方案也是其应用的另一个主要方面。通过评估规划方案，可以实现方案的调整和优化。这个方面将开展两个方面的探索，其一为针对规划方案进行评估，分析是否有城市发展政策能够保证其实现，如果可以，则给出相应的政策参数；其二为针对北京市历次总规的空间布局方案进行评估，识别其在城市增长中所起到的作用，并将历次总规进行了横向对比。

3.3 各章节之间的关系

本文主要分为四篇阐述面向空间规划的微观模拟研究，第一篇介绍本论文的研究背景、研究意义和总体研究内容；第二篇为数据篇，将给出基于统计数据反演居民微观个体样本，用于微观模拟的 Agenter 方法（第4章）；第三篇为模拟篇，分别建立了总规尺度用于城市增长 BUDEM 模型（第5章）和控规尺度用于识别城市形态、交通能耗和环境影响定量关系的 FEE-MAS 模型（第6章）；第四篇为评价篇，阐述了总规尺度的两个实例，一为识别规划城市形态的政策参数，评估规划方案与空间政策的一致性（第7章），二为对北京历次总规在城市增长过程中的作用进行评价（第8章）。

各章之间的逻辑见表 3-1，本文主要开发了两个微观模拟模型，总规尺度的 BUDEM（第5章）和控规尺度的 FEE-MAS（第6章）。鉴于在总规尺度的 BUDEM 模型采用的是 CA 方法，城市物理空间的微观数据比较充分，没有用数据反演的办法。侧重规划方案评估的第7章和第8章的研究内容是基于 BUDEM 模型开展的。控规尺度的 FEE-MAS 模型是基于 MAS 方法实现的，鉴于缺少足够的微观样本数据，采用第4章的 Agenter 数据反演方法为其提供基础数据。FEE-MAS 模型同时实现

规划方案的辅助制定和评估功能，考虑到内容的完整性，仍将其纳入“第三篇 基于微观模拟模型探索城市空间发展”。

表 3-1 论文研究结构表

	数据	模拟	评价
总规		BUDEM (第 5 章) 	第 7 章 第 8 章
控规	Agenter (第 4 章)	 FEE-MAS (第 6 章)	

第二篇 为微观模拟提供数据基础

第4章 居民微观个体的属性和空间反演^⑤

本部分针对目前城市系统微观模拟方法在应用中面临稀疏数据环境制约的困境，试图提出一种基于现有的宏观统计资料、多个分散的典型调查数据、数据挖掘获得的样本属性间的依赖关系，反演个体样本的方法(Long 等, 2010b; 龙瀛等, 2011b)。通过本方法获取的样本，能够符合已有的统计资料，并遵照了样本属性之间的一般规律，可以以 GIS 图层的方式直接作为微观模拟模型的基本输入数据。该方法的应用简单，准确度高，适合我国现有统计制度下的微观模拟模型的构建，是对稀缺数据环境下微观模拟数据获取方法的有益探索。

4.1 微观个体的数据反演方法

4.1.1 已知信息：统计数据、典型调查和通用规则

城市系统微观模拟的样本，根据模拟的对象和研究层次/层次，可以为个人、家庭、建筑、车辆、地块等，也可以是子行政区域，样本是微观模拟中最为基本的研究对象。个体样本一般具有相应的社会、经济等方面的基本属性，例如人口样本的年龄、收入、教育程度、职业等属性，家庭样本的家庭成员数量、收入、地址等属性，地块样本的面积、产权单位、使用类型、高度等属性。这些属性又可以分为空间类属性和非空间类属性，如地块样本的面积、形状和位置，以及人口样本的所在街区等属于空间类属性。

已有的宏观信息（aggregate data）主要分为三个方面：

（1）官方统计数据，其往往是对样本数据的统计描述，如样本的总个数，样本某属性的分布规律（即频率分布），如各个职业的人口分布，各收入区间的分布，样本属性与属性的相互关系（如婚姻状况和年龄、收入水平和受教育程度的依赖关系）；

（2）多个独立的典型调查数据，为基本样本数据，可以从中获得属性的分布

^⑤ 本章主要成果已经发表在：龙瀛, 沈振江, 毛其智. 2011. 城市系统微观模拟中的个体数据获取新方法. 地理学报, 66(3):416-426.

信息和属性之间的依赖关系；

(3) 已有的通用规则，分为常识性（如年龄低于 18 岁婚姻状态为未婚）和科研成果，后者的结果可以通过数据挖掘获得，这些规则描述了样本的各属性之间的相互关系。

因此，样本的已知信息可以概括为样本各属性的概率分布、样本各属性之间的关系，具体将在 2.2 节和 2.3 节进行介绍。

4.1.2 数据反演中的典型变量

样本的属性分为连续类型（continuous）和离散类型（categorical），在我们提出的方法中样本的所有属性都采用离散类型的方式进行建模，如婚姻状态属性分为已婚、未婚两个离散值，而年龄属性分为 0-4、4-10、10-20 等不同区间。因此每个可选数值均为字符串类型，无论原始是字符串型属性还是数值型属性。其目的一方面可以简化建模，另一方面可以简化样本反演的运算量。针对连续类型的属性，可在反演得到取值区间后从中随机选取数值来实现具体数值的确定。

本部分将每个属性的可选择数值称为域，每个数值称为域元素（字符串类型），样本中每个域元素出现的次数称为频数，占总样本的比例称为频率。例如，对于婚姻状态属性，其域为{已婚; 未婚; 离异}，其中“已婚”为域元素，相应的频数{45; 20; 35}表示 45 个样本为已婚，20 个样本为未婚，35 个样本为离异。这样就将反演样本的输入转变为域及其频数构成的域频表，及不同属性的域频表之间的关系表。

如下是反演过程中需要的变量名称。

- 样本总数目： N
- 属性总数目： M
- 样本 ID： $i, i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$
- 属性 ID： $j, j \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$
- 属性类型： T_j （为字符类型则为 STR，为数值类型则为 NUM）
- 样本 i 的 j 属性反演数值： $a_{i,j}$ （字符串类型）
- 反演样本值集合： $A_{N \times M} = \{a_{i,j}\}$ （矩阵形式，二维数组）
- 样本 i 的 j 属性真实数值： $a'_{i,j}$ （整数、小数或字符型）

- 真实样本值集合: $A'_{N \times M} = \{a'_{i,j}\}$ (矩阵形式, 二维数组)
- i 样本的所有属性值: a_i (行)
- j 属性的所有样本值: a_j (列)
- b_j : 属性 j 的域 (集合)
- k : 域元素的 ID
- $b_{j,k}$: 属性 j 的第 k 个域元素
- K_j : 属性 j 的域元素的总个数
- P_j : 属性 j 的所有域元素的频数 (集合)
- $P_{j,k}$: 属性 j 的第 k 个域元素的频数
- $p_{j,k}$: 属性 j 的第 k 个数值的概率, $p_{j,k} = P_{j,k} / N$
- f_j : 属性 j 的概率密度分布函数
- h_j : 与属性 j 有概率关系的属性 ID
- H_j : 与属性 j 有函数关系的属性 ID 集合
- g_j : 属性 j 与属性 H_j 的函数关系

4.1.3 属性的统计分布

鉴于每个属性的已知信息类型不同, 使得每个属性的反演方式也不同。需要对样本的属性根据已知的分布特征进行分类, 以 N 个样本的 j 属性为例:

(1) 频数已知的分布 DB: 文字类型, 有 K_j 个数值可选, 分别是 $b_{j,k}$, 每种个数为 $P_{j,k}$, 则 j 属性反演后的数值为:

$$a_{j,i} = \text{randO}\left(\underbrace{\bigcup_{k=1}^{K_j} \{b_{j,k}, b_{j,k}, \dots, b_{j,k}\}}_{P_{j,k}}\right) \quad \text{公式 4-1}$$

其中 randO 函数表示对集合内容的随机排序 (这里假设集合为有序集合, 不是无序的)。

(2) 概率密度已知的分布 DA: 即已知属性 j 符合概率密度分布函数 $p(x=x_0) = f_j(x_0)$ (例如高斯分布、均一分布等), 从中共采集 K_j 个域元素 (用中

值表示其数值), $P_{j,k} = N * p(x = b_{j,k}) = N * f_j(b_{j,k})$, 即数值等于 $b_{j,k}$ 的样本数目为 $N * f_j(b_{j,k})$ 个, 共选取 K_j 个数值, 进而将问题转变为频数已知的 DB:

$$a_{j,k} = \text{randO}\left(\bigcup_{k=1}^{K_j} \underbrace{\{b_{j,k}, b_{j,k}, \dots, b_{j,k}\}}_{N * f_j(b_{j,k})}\right) \quad \text{公式 4-2}$$

(3) 无分布 DC: 不知道该属性的分布。

4.1.4 属性间的依赖关系

利用不同来源的已知信息, 如调查问卷、常识性知识、统计公报等, 可以将这些已知信息转变为属性和属性之间的依赖关系, 主要包括以下几种形式的建模规则:

(1) 函数关系 RA: 某样本 i 的某属性与本样本的其他属性 (一个或多个) 有函数关系, 如 $a_{i,j} = g_j(\bigcup_{h \in H_j} a_{i,h})$, g_j 可以是线性关系, 也可以是非线性关系 (如决策树形式的关系), 在其他属性反演的基础上, 可以给出该属性的样本值 $a_{i,j}$ 。

(2) 概率关系 RB: 属性 j 与属性 h_j (简化为 h) 有概率关系 (频数上的关系), 并已知二者的频度, 二者概率关系可以用关系矩阵 $Q_{K_h * K_j}$ 表示, 其元素 q_{k_h, k_j} 已知, 表示关系概率, $q_{k_h, k_j} = P\{(a_{i,h} = b_{h, k_h}) \cap (a_{i,j} = b_{j, k_j})\}$, 其中 P 为概率 (0-1, 区别于变量 P_j)。逐一对所有样本的属性 j 进行计算, 给出每个样本对应的 K_j 个取值的概率, 计算方法为

$$P\{a_{i,j} = b_{j, k_j}\} = q_{k_h, k_j} * p_{j, k_j}, \quad \text{其考虑了双重概率, 然后利用蒙特卡洛}$$

where $a_{i,h} = b_{h, k_h}$

的方法根据概率 P 可以得到属性 j 的所有样本值 $a_{i,j}$ 。

(3) 无关系 RC: 该属性不存在或不知道与其他属性的关系。

4.1.5 统计分布与依赖关系的耦合分析

样本的不同属性的分布和关系的类型各不相同, 这就需要对不同属性的数值反演有不同的方法。根据分布的类型和关系的类型, 在反演样本时的耦合关系可以分为表 4-1 所示的 9 种。其中 VBB 和 VAB 都是用 RB 的结果后, 再和 DB 去对比, 修正规则, 直到符合 DB; VCB 直接用 RB 的结果, VBC 直接用 DB 的结果, VAC 直接用 DA 的结果, VCA 直接用 RA 的结果, 而 VAA、VBA、VCC 不需要考虑。

表 4-1 分布与关系的耦合分析表

分布/规则	函数关系 RA	概率关系 RB	无关系 RC
概率密度已知的分布 DA	VAA (NA)	VAB	VAC
频数已知的分布 DB	VBA (NA)	VBB	VBC
无分布（或未知）DC	VCA	VCB	VCC (NA)

注：NA 表示本部分对这类属性不作分析，因为这种情况不存在或不必要进行分析。

根据上面的分析，可以看出，9 种情况都可以通过分布分析和关系分析中的算法实现。需要特别注意的是，对于 VBB，即概率分布、概率关系的属性，需要对 RB 计算的结果进行验证，如果其结果的概率分布符合 DB，则将其作为最终结果，否则调整 RB 的设置，使得最终 RB 计算后的结果的概率分布符合 DB。

如果属性 j 的类型为数值型 NUM，则所获得的属性数值 a_j 代表的是一个数值范围， $a_{,j}^L$ 表示其最低值， $a_{,j}^H$ 表示其最高值。则最终的样本值为：

$$a'_{,j} = \begin{cases} a_{,j}, & \text{if } T_j = \text{"STR"} \\ \text{randV}(a_{,j}^L, a_{,j}^H), & \text{if } T_j = \text{"NUM"} \end{cases} \quad \text{公式 4-3}$$

其中 randV 表示从数值范围中根据平均分布的规律选取随机值的函数。

4.1.6 反演结果的空间化

反演得到的个体样本数据一般是表格形式的个体属性数据，但城市系统微观模拟模型如 MAS 中，一般还需要个体样本的空间位置。为此，需要为每个样本增加一个属性字段 FID，表示每个样本所对应的几何体（点、线或多边形）的唯一编号。所有个体样本所对应的整个空间由若干个几何体构成，每个几何体所包含的样本数量可以基于统计数据推测。将各个几何体的 FID 及其包括的样本数量作为一种概率分布，则可以在属性反演的过程中给出每个样本对应的几何体的 FID 属性。在此基础上，每个几何体采用随机的方式生成其所包括个体样本数量的点要素，作为个体样本对应的空间对象，进而将反演得到的个体样本与空间对象进行一一对应。

在本部分，个体样本反演的结果采用 GIS 点的空间图层形式存储，其在具备空间位置信息的同时还具备个体样本的所有属性信息，根据点所在的位置，还可以识别相关的空间属性（如可达性、规划条件等），进而为城市系统微观模拟提

供更为完善的数据基础。但是本部分注重探讨个体样本反演的方法，并没有充分考虑个体样本的空间属性与个体样本属性之间的关系，将来使用反演数据进行 MAS 应用时，还需深入探讨加入结合空间属性的个体样本反演。

4.2 反演北京居住人口样本

根据上述方法，采用 Python 脚本语言，基于 Access 数据库，在 ESRI ArcGIS 平台的 Geoprocessing 支持下开发了 Agenter (Agent Producer) 模型，用于个体样本数据的反演。

要进行个体样本的反演，首先需要确定反演的样本总量，并根据相关的基础数据，构建相关属性的分布、关系及其耦合关系，将其以数据库的形式存储作为输入数据，并以数据库作为反演结果的存储方式。Agenter 的数据库的构成如图 4-1 所示，主要是属性表的形式，其中“AgentAttrInfo”表存储了个体样本的每个属性的基本情况，如所属的分布类型、关系类型、耦合类型和数据类型等，“DA”表存储了概率密度分布的基本信息，如属性所对应的概率分布及其参数，“DB_”类型的表存储了相关属性的概率分布的基本信息，“RA”表存储了函数关系，“RB”表存储了两个属性之间的概率关系的总构成情况，“RB_”类型的表则存储了具体的各相关字段之间的概率关系。而“Agents”表存储的，是以上述表作为输入的 Agenter 模型反演得到的个体样本及其属性信息。“Agents_spt”为 Geodatabase 格式的点状要素数据集，对应“Agents”表的空间化的结果。同时，在 VBB 耦合关系中，使用了 Access 的查询模块验证规则设置与概率分布的匹配情况，即通过反演频度与统计频度的对比，对 RB 关系进行修正。

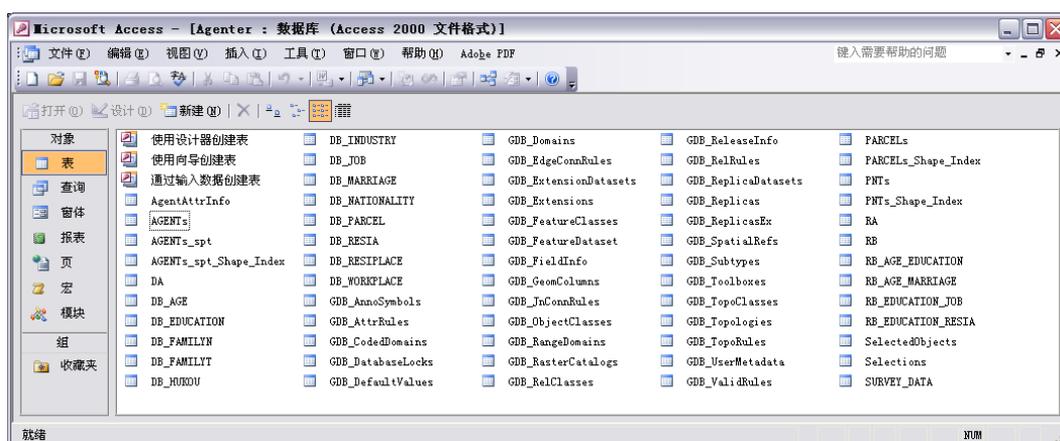


图 4-1 Agenter模型的基础数据库

注：GDB 和 Select 类型的表格为 ESRI 的 Personal Geodatabase 的内置数据表，不是 Agenter 的输入数据)

采用所开发的 **Agenter** 模型,可以对个体样本进行反演,这些样本可以是地块,也可以是个人或家庭。这里以基于北京市第五次人口普查的统计资料(北京市第五次人口普查办公室和北京市统计局,2002),对人口样本数据的反演进行介绍。该统计资料为2000年11月1日零时为标准时间开展的第五次人口普查数据,其中有对人口的镇级总数统计、年龄、婚姻状态、职业、收入、民族、受教育程度、家庭、住房、死亡、迁移人口等统计信息,主要是各类别或各级别的分布。这些信息结合样本属性间的常规规则,可用于构建 **Agenter** 模型的输入数据。反演的样本总数为10000个(实际上北京市的人口总数远超过这个数字,这里仅以10000个作为 **Agenter** 方法的测试)。

4.2.1 来自人口普查公报的输入数据

Agenter 模型的输入数据主要是样本总数、属性设置、分布及关系等。样本属性及其参数表(**AgentAttrInfo**)见表4-2,其中考虑了人口样本的年龄、婚姻状况、月收入、受教育程度等18个属性信息,该表是样本属性信息的索引表,记录了每个属性的分布类别和关系类别,进而用于 **Agenter** 模型反演样本。表中的“**PARCEL**”属性表示人口样本所对应的地块编号,用于反演结果的空间化;“**AID**”属性表示人口样本所对应的空间点的编号。

表 4-2 AgentAttrInfo 表

编号	英文名	中文名	分布	关系	耦合类型	数据类型
1	KEY_ID	样本编号				INTEGER
2	AID	空间点的编号				INTEGER
3	AGE	年龄	DB		VBC	INTEGER
4	MARRIAGE	婚姻状况	DB	RB	VBB	BOOLEAN
5	INCOME	月收入	DA		VAC	LONG
6	JOB	职业	DB	RB	VBB	STRING
7	EDUCATION	受教育程度	DB	RB	VBB	STRING
8	RESIPLACE	居住地	DB		VBC	STRING
9	WORKPLACE	就业地	DB		VBC	STRING
10	SEX	性别	DA		VAC	BOOLEAN
11	INDUSTRY	行业	DB		VBC	STRING
12	RESIA	居住面积	DB	RB	VBB	FLOAT
13	NATIONALITY	民族	DB		VBC	STRING
14	FAMILYT	家庭类型	DB		VBC	BOOLEAN
15	FAMILYN	家庭成员数目	DB		VBC	STRING
16	HUKOU	户口情况	DB		VBC	STRING
17	TRAVEL	出行方式	DC	RA	VCA	STRING

编号	英文名	中文名	分布	关系	耦合类型	数据类型
18	PARCEL	所在地块	DB		VBC	STRING

表 4-3 (DA 表) 为分布类型为概率密度分布的属性的分布基本信息, 记录了概率密度函数及相关参数, 如月收入 (INCOME) 符合高斯分布, 均值为 6000 元, 标准差为 1000 元。这类属性与其他属性没有依赖关系。

表 4-3 DA 表

ID	FLD	DIS_NAME	P0	P1	P2	P3	P4	NOTE
1	INCOME	Gauss	6000	1000				高斯分布 P0 为均指 P1 为标准差
2	SEX	Uniform	男	女				

DB 类型的表的基本形式参见表 4-4 (AGE 属性的概率分布)。其中 NAME 列对应 AGE 属性的域 (年龄段), PERCENT 列对应域元素的频数。

表 4-4 DB 表

ID	NAME (岁)	PERCENT (人)
1	0 4	442578
2	5 9	525033
3	10 14	876157
4	15 19	1234173
5	20 24	1259508
6	25 29	1271407
7	30 34	1317888
8	35 39	1413872
9	40 44	1237967
10	45 49	1093304
11	50 54	690082
12	55 59	505715
13	60 64	558646
14	65 69	495674
15	70 74	327136
16	75 79	187126
17	80 84	86602
18	85 89	34563
19	90 94	9753
20	95 99	1863
21	100 150	147

注: 该表的“PERCENT”一列的数据并没有进行归一化处理, 对应北京市域的实际人口。

RA 表用于存储函数关系，本案例中的出行方式“TRAVEL”属性属于这一类，其依赖于年龄 AGE、受教育程度 EDUCATION 和月收入 INCOME 三个属性，其函数关系为决策树，基于 Python 语言的具体形式如下（本决策树仅供示意 Agenter 方法的应用）：

```

if AGE <= 4:
    TRAVEL = "无独立出行"
elif AGE >= 75:
    TRAVEL = "非机动车"
elif INCOME > 6000 and (EDUCATION == "大学本科" or EDUCATION == "研究生"):
    TRAVEL = "私家车"
elif INCOME <= 1000:
    TRAVEL = "非机动车"
else:
    TRAVEL = "公交车"
    
```

表 4-5 (RB 表) 为关系类型为概率关系的属性的关系基本信息，记录了样本属性间的关系索引，字段 FLD 中对应的属性的数值依赖于字段 FLD_RB 中对应的属性值，如婚姻状态 (MARRIAGE) 依赖于年龄属性 (AGE)，职业属性 (JOB) 和居住面积属性 (RESIA) 都依赖于受教育程度属性 (EDUCATION)。人口各个属性之间的相互依赖关系，可以从人口普查资料中获得，其中有多表格描述两个属性间的关系，即将某一属性分为若干区间，针对每个区间给出另一属性的分布统计数据。

表 4-5 RB 表

ID	FLD	FLD_RB
1	MARRIAGE	AGE
2	JOB	EDUCATION
3	EDUCATION	AGE
4	RESIA	EDUCATION

具体的，对于 AGE 与 MARRIAGE 属性的关系表 RB_AGE_MARRIAGE（见表 4-6），AGE 字段中的数值为年龄属性的 ID（对应于表 4-4 中的 ID 列），表示年龄阶段，MARRIAGE 字段是相应年龄阶段的各种婚姻状况的概率。例如，对于 25~29 岁 (ID 为 6) 这一阶段的个人，根据 DB_MARRIAGE 表，初婚有配偶 (ID 为 1) 的概率为 71.9%，未婚 (ID 为 2) 的概率为 27%，离婚 (ID 为 3) 的概率为 0.6%，再婚有配偶 (ID 为 4) 的概率则为 0.5%，其他婚姻状况的可能均为 0。

表 4-6 RB_AGE_MARRIAGE 概率关系表

ID	AGE (<i>h</i>)	MARRIAGE (<i>j</i>)
1	1	2 100%
2	2	2 100%
3	3	2 100%
4	4	1 0.3%;2 99.7%
5	5	1 15.3%;2 84.7%
6	6	1 71.9%;2 27%;3 0.6%;4 0.5%
7	7	1 88.9%;2 7.7%;3 1.7%;4 1.5%;5 0.2%
8	8	1 91.4%;2 3.1%;3 2.5%;4 2.7%;5 0.3%
9	9	1 91.7%;2 1.7%;3 2.7%;4 3.3%;5 0.6%
10	10	1 92.2%;2 1.5%;3 2.1%;4 3%;5 1.2%
11	11	1 91%;2 1.3%;3 1.5%;4 3.4%;5 2.8%
12	12	1 88.2%;2 1.1%;3 1.3%;4 3.9%;5 5.5%
13	13	1 83.9%;2 0.9%;3 1%;4 3.9%;5 10.3%
14	14	1 80%;2 0.8%;3 0.9%;4 3.9%;5 14.4%
15	15	1 76%;2 0.8%;3 0.9%;4 3.9%;5 18.4%
16	16	1 72%;2 0.7%;3 0.8%;4 4%;5 22.5%
17	17	1 60%;2 0.3%;3 0.5%;4 2%;5 37.2%
18	18	1 50%;3 0.2%;4 2%;5 47.8%
19	19	1 40%;4 2%;5 58%
20	20	1 30%;4 2%;5 68%
21	21	1 20%;4 2%;5 78%

另外，为了将反演结果空间化，还需要将所有样本所对应的空间分布图层作为模型的输入，本部分选取北京市的现状地块图层 PARCELS 作为样本的分布空间。鉴于本部分反演的样本数量为 10000 个，而北京市域的人口数远超过该数目，因此仅选取中心城局部地区的若干地块作为 PARCELS 图层（见图 4-2 中的灰色多边形）。

4.2.2 人口样本的反演结果

10000 个反演样本的前 20 项见表 4-7，根据“PARCEL”属性空间化后的结果如图 4-2 所示。最终的结果形式为 ESRI Personal Geodatabase 中的点状的要素数据集（Feature Class），每个点都位于某个地块内，具有相应的属性信息。该结果可以直接作为居民 agent 用于 MAS 模拟。基于空间化后的个体样本反演结果可以利用不同的属性进行空间分析和空间统计。

表 4-7 北京市部分反演结果

KEY_ID	AID	AGE	SEX	MARRIAGE	EDUCATION	INCOME	HUKOU	RESIA	PARCEL	TRAVEL
1	1376	52	男	初婚有配偶	初中	5948	省外	18	259	公交车
2	744	47	女	初婚有配偶	中专	6876	省外	14	197	私家车
3	1785	23	男	未婚	初中	6301	省外	27	338	私家车
4	984	53	男	初婚有配偶	初中	4981	本市区 其他街道	20	211	公交车
5	1242	32	女	初婚有配偶	小学	6359	本省其 他县 (市)、 市区	20	248	私家车
6	352	47	女	初婚有配偶	初中	5272	省外	25	90	公交车
7	209	19	女	未婚	小学	4699	省外	28	51	公交车
8	529	51	男	初婚有配偶	初中	5697	省外	23	117	公交车
9	1665	30	女	初婚有配偶	初中	6758	省外	34	320	私家车
10	1117	29	女	未婚	初中	6833	省外	2	237	私家车
11	236	48	男	初婚有配偶	初中	5050	省外	24	62	公交车
12	1168	51	女	初婚有配偶	初中	6964	省外	20	241	私家车
13	384	72	女	初婚有配偶	初中	3812	省外	24	92	公交车
14	1179	52	男	初婚有配偶	初中	5185	省外	21	242	公交车
15	1967	27	男	未婚	小学	3762	省外	4	358	公交车
16	1382	60	女	初婚有配偶	初中	6901	省外	13	259	私家车
17	1666	45	男	未婚	初中	6424	省外	26	320	私家车
18	1284	30	女	初婚有配偶	小学	6237	省外	14	251	私家车
19	1648	35	男	未婚	高中	7060	省外	80	319	私家车
20	1565	34	女	初婚有配偶	高中	6450	省外	17	305	私家车

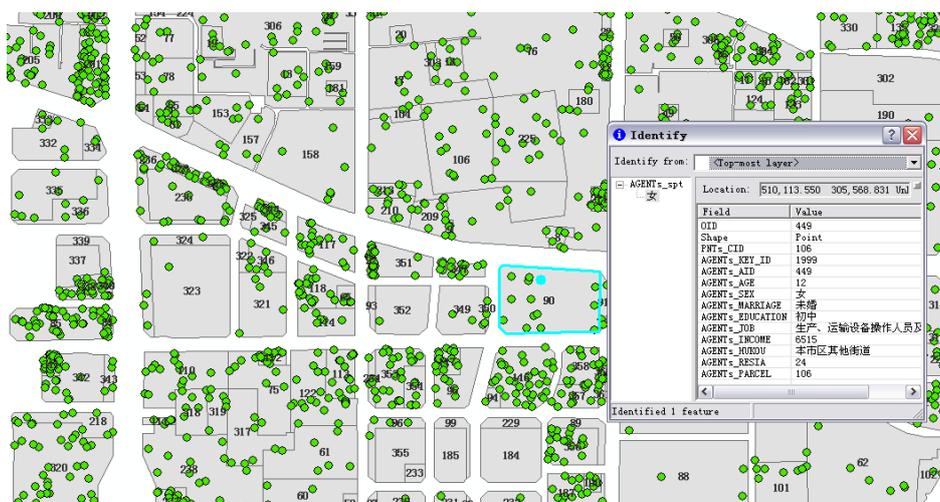


图 4-2 反演的微观样本空间分布 (部分)

4.2.3 反演结果的验证

不同分布与关系耦合类型的样本属性的反演方法不同，因此需要采用不同的方法进行反演结果的验证：

(1) VAC 类型，如“SEX”属性，反演结果中性别为“男”的样本数量为 5004，“女”为 4996，符合均一分布；对于“INCOME”属性，采用非参数检验（单样本 K-S）的方法，假设反演得到的样本的“INCOME”属性符合正态分布，估计得到的均值为 5993.93（预先设定为 6000），标准差为 989.99（预先设定为 1000），双尾显著性（Asymp. Sig. (2-tailed)）为 0.657，接受原假设，因此“INCOME”属性也符合预先设定的概率密度函数。

(2) VBB 类型，如“EDUCATION”属性，其验证结果见表 4-8，最大误差为受教育程度为“初中”的样本，误差在 21.21%，其余受教育程度的样本吻合情况较好，因此总体可以接受。为了进一步提高原始分布与反演结果的吻合程度，鉴于“EDUCATION”属性是基于“AGE”属性计算得到，可以通过调整二者的关系表实现。VAB 类型的验证方式与 VBB 类型相同。

表 4-8 “EDUCATION”属性的原始分布与反演样本分布的对比

ID	NAME	原始人数	原始比例 (%)	反演人数	反演比例 (%)	比例差异 (反演-原始, %)
1	未上过学	581639	4.47	416	4.16	-0.31
2	扫盲班	47253	0.36	0	0	-0.36
3	小学	2301749	17.67	1571	15.71	-1.96
4	初中	4665146	35.82	5703	57.03	21.21
5	高中	2197286	16.87	1342	13.42	-3.45
6	中专	946068	7.26	256	2.56	-4.70
7	大学专科	1029929	7.91	322	3.22	-4.69
8	大学本科	1082289	8.31	377	3.77	-4.54
9	研究生	172631	1.33	13	0.13	-1.20
总计		13023990	100.00	10000	100.00	

(3) VBC 类型，如“AGE”属性，鉴于这类属性与其他属性没有依赖关系，是根据原始统计资料所描述的样本分布确定，因此该属性的统计分布符合表 4-4 的分布规律；

(4) VCA 类型，如“TRAVEL”属性，反演得到的样本 100%符合预先设定的决策树；

(5) VCB 类型，本次试验没有涉及，但可以 100%符合预先设定的字段之间的依赖关系。

通过对反演的 10000 个样本的各个属性的验证，其与预先设定的分布类型和关系类型基本一致，符合宏观统计信息，也符合样本各个属性之间的依赖关系。VBB 类型的误差最大，但也仅局限于该类属性的个别取值（如“EDUCATION”属性的“初中”）。

4.2.4 模型运行时间

模型运行时间主要依赖于需要反演的样本数量、属性数量及其类型。样本数量和属性数量越多，需要的运行时间越长；样本属性的分布和关系耦合类型越复杂（如 VBB 类型），运行时间越长；样本属性的域元素个数越多，运行时间越长。根据在 CPU 为 3.0GHz*2、内存为 4GB 的图形工作站的实际测试，数据反演模型的运行时间总体上可以接受的，本部分所开展的实验（10000 个样本、10 个属性）需时 33 s，100 万个样本需时 3505 s（58.4 min），模型运行时间与样本数量、属性数量的关系如图 4-3 所示。

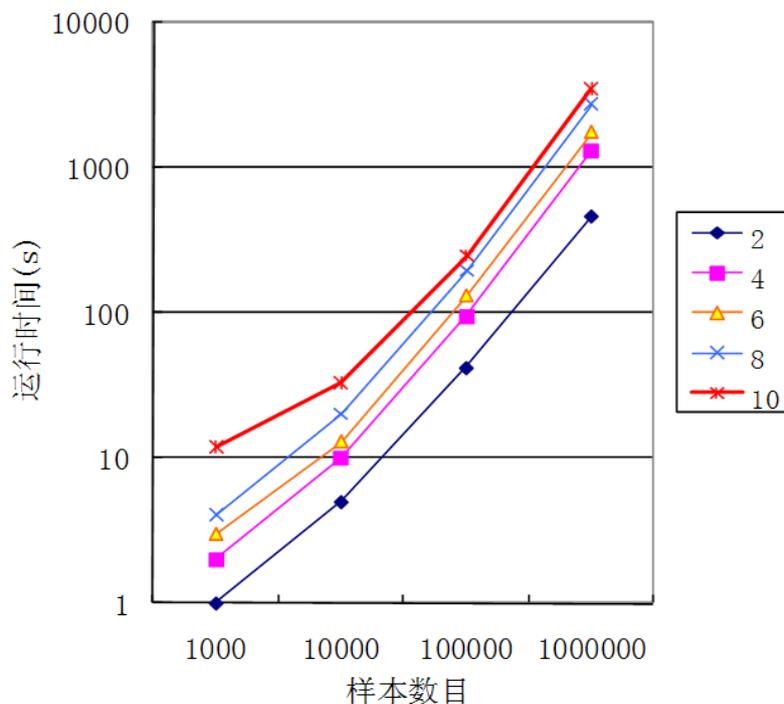


图 4-3 计算时间与样本和字段数量的关系图

4.3 小结：数据反演为微观模拟提供了良好的数据基础

本部分提出了一种利用统计数据和相关规则反演个体样本数据的方法（Agenter）。该方法适合中国国情，充分利用已有的统计信息、典型调查和常规规则等多源数据，反演个体样本的属性信息，结合关于个体样本空间分布的统计性描述，进一步将个体样本体现在空间上。反演结果在统计层次具有较高的准确性，可以作为 agent 输入多主体系统（MAS）进行城市系统微观模拟，是对解决当前城市系统微观模拟中个体数据稀缺问题的有益探索，有望缓解微观模拟在我国乃至国际上应用的数据瓶颈问题。同时本部分提出的方法计算的时间也可以接受，100 万个样本（每个样本 10 个属性字段）的生成仅需要不足 1 小时的时间即可完成。

采用本方法生成的个体样本数据，因为个体样本的不确定性，即使保持数据的统计特征，但并不是符合已知宏观数据的唯一的一组。利用反演结果作为微观模拟模型输入时，可以利用本方法生成多组的个体样本数据，分别输入模型进行模拟，取模型结果的平均值作为最终的模型输出，有望降低因为输入的数据问题带来的模拟结果的不确定性。

第三篇 基于微观模拟模型探索城市空间发展

第5章 北京城市增长模拟（BUDEM 模型）^⑥

受整体的宏观经济以及奥运经济的影响，北京近年来的城镇空间扩展速度较快，为了对后奥运（2009年）、总体规划期末（2020年）和建国100周年（2049年）等未来不同阶段的城市空间布局进行判断和预警，进而为下一阶段开展新一轮的城市总体规划提供支持，同时考虑到目前国际上主要的大城市都已经有了自身的城市模拟模型，而北京在这一领域仍为空白，因此开发了北京城市空间发展分析模型（Beijing Urban Spatial Development Model, BUDEM），该模型是基于元胞自动机（CA）模拟北京城市空间增长、具体规划方案制定以及区位选择的时空动态的城市模型。

在自主开发的 BUDEM 模型中，状态转换规则充分考虑了约束条件的时空复杂性，集成了邻域约束条件、宏观社会经济约束条件、空间性约束条件和制度性约束条件，采用 MonoLoop 方法对邻域作用的复杂影响进行识别，并考虑了城市规划、限建区规划等制度性约束条件，利用 Logistic 回归的方法对制度性约束在历史城市增长中所起到的客观作用进行了识别。利用 BUDEM 模型，可以基于对历史阶段的分析识别模型参数，给出实现规划空间布局的政策参数，并可以模拟不同约束条件作用下的城市增长情景，进而给出反应不同规划政策控制力度的城市空间形态。

5.1 北京城市空间发展模型（BUDEM）

5.1.1 城市增长模拟的基本逻辑

中国的城市增长过程中既有自上而下的政府行为，又有自下而上的基层自发开发。对于前者，根据宏观社会经济条件，政府制定宏观发展目标（存量及增量土地供应计划、近期建设规划、年度实施计划等），政府也参与部分一级开发；

^⑥ 本章主要成果已经发表在：（1）龙瀛，韩昊英，毛其智. 2009. 利用约束性 CA 制定城市增长边界. 地理学报, 64(8):999-1008. （2）龙瀛，毛其智，沈振江，杜立群. 2010. 北京城市空间发展分析模型. 城市与区域规划研究, 3(2):180-212.

开发商持有指定的开发项目，由政府根据客观的土地综合评价（自然地形、规划控制等），寻找适宜的开发地区（有竞争的过程，即基层行政单位或区域的竞标）。对于后者，即自下而上发展，基层土地使用权持有者具有自发的开发行为（如农地开发、城镇中心附近、公路附近等的开发），这种行为也受到制度性约束（城市规划、生态保护政策等）和自然约束（坡度、灾害等）的影响；基层开发行为反馈至政府，调整规划或发展目标（影响社会经济条件，形成完整的反馈）。

参考中国城市增长的现实特点，即既受到宏观层面上政府的控制，也有为微观层面的自发增长。本模型的模拟思路总体上分为两个步骤（图 5-1）：首先在宏观上由政府（或开发商）根据宏观社会经济条件确定每一阶段的待开发土地的总量（社会经济因素作为外生变量引入模型）；之后在微观上采用 CA 的方法考虑各种约束条件，模拟城市增长，基于模拟结果进行拟开发总量的空间分配（allocation），给出与开发总量相对应的土地的空间分布。

5.1.2 CA 概念模型

经典的城市土地利用模型显示，土地开发受区位和地理条件影响，阿隆索（Alonso, 1964）在其单中心城市区位理论中指出，距离城市中心的距离是影响城市土地利用的主要因素，随着距离的增大，可达性和交通成本升高，最优的用地类型也随之改变；道萨迪亚斯（Doxiadis）创建的人类聚居学指出，人类聚居的区位主要受到三种力的吸引，即现有城市中心、交通干道、自然景观（吴良镛, 2001）。这两个文献都对城市空间增长的驱动因素进行了阐述，而 Hedonic 模型（Hedonic Price Model, 享乐价格模型/方法）则对其给出了更为清晰的框架。Hedonic 模型认为商品由很多不同的属性构成，其价格由所有属性带来的效用决定，由于各个属性的数量和组合方式的不同，商品价格产生差异（Lancaster, 1966），例如巴特勒（Butler, 1982）认为影响住宅价格的因素有三类：区位、建筑结构和邻里环境。住宅价格反映的是消费者对住宅属性的偏好之和，而城市的开发同样如此，也是开发商对地块的相关属性的偏好之和，因此参考 Hedonic 模型的理论框架，同时考虑数据的可获得性，选择下列影响城市增长的要素作为 CA 模型的空间变量(Long 等, 2009a):

(1) 区位变量（空间约束）：与各级城镇中心的最短距离（天安门 d_{tam} 、边缘集团 d_{edge} 、重点新城 d_{vcity} 、新城 d_{city} 、重点镇 d_{vtown} 、一般镇 d_{town} ）、与河流的最短距离 d_{river} 、与道路的最短距离 d_{road} 、与镇行政边界的最短距离 d_{bdtown} 、京津冀区域吸引力 f_{rgn} ;

(2) 邻里变量（邻域约束）：邻域内的开发强度 $neighbor$ （即邻域内不包括自

身的城市建设用地面积与邻域内的不包括自身的土地面积之商)；

(3) 政府变量 (制度性约束)：城市规划 *planning*、土地等级 *landresource*、禁止建设区 *con_f*、限制建设区 *con_r*。

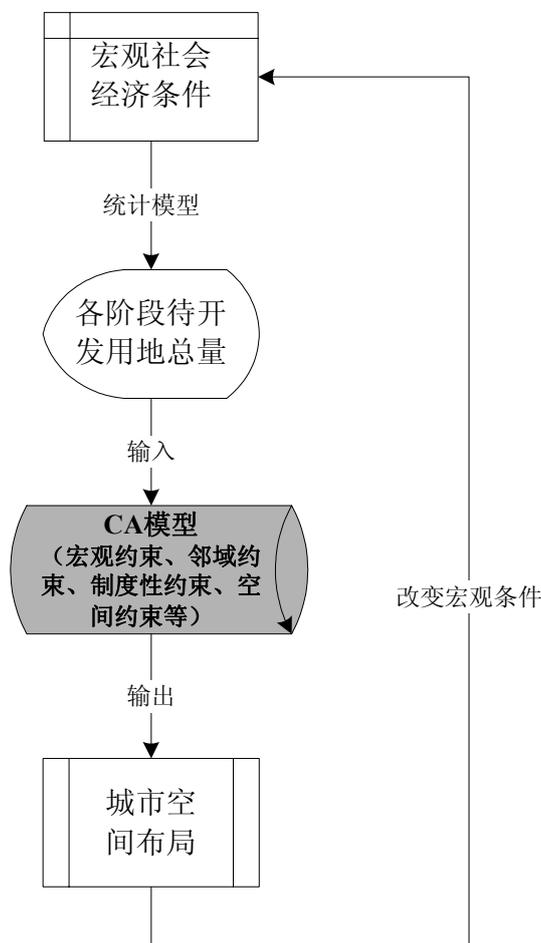


图 5-1 BUDEM模型模拟逻辑

BUDEM 模型建立的基本假设是：①城市是一复杂适应系统，可采用自下而上的方法进行城市空间增长的模拟；②城市增长的驱动力分为刺激增长因素（城市规划学科的适宜性评价）和限制增长因素（城市生态学理论）两类，同时也可分为市场驱动和政府引导两类，并且这些因素的影响随距离衰减；③历史的规律适用于预测同样趋势的未来；④可在基准空间增长情景（即延续历史发展趋势）的基础上，根据发展模式的不同生成不同的其他情景。

根据以上逻辑框架，基于 CA 建立 BUDEM 模型，其基本要素如下：

(1) 元胞空间 (lattices)：北京市域，16410 km²（可根据需要调整模拟范围)；

- (2) 元胞 (cells): 500m*500m, 65628 个;^⑦
- (3) 状态变量 (cell states): V=1 (城市建设用地), V=0 (非城市建设用地);
- (4) 转换规则 (transition rules): 多属性分析 (multi-criteria evaluation, MCE);
- (5) 邻域 (neighborhoods): 摩尔邻域 (Moore 邻域, 3*3 矩形、8 个邻近元胞);
- (6) 离散时间 (discrete time): 1 Iteration = 1 Month。

BUDEM 的概念模型如公式 5-1 所示, 总体上元胞的状态受宏观社会经济约束、空间约束、制度性约束和邻域约束影响。现阶段 BUDEM 只模拟非城市建设用地向城市建设用地的转变, 逆向过程不模拟, 也不考虑城市再开发过程。

$$\begin{aligned}
 V_{i,j}^{t+1} &= f\{V_{i,j}^t, Global, Local\} \\
 &= \{V_{i,j}^t, LOCATION, GOVERNMENT, NEIGHBOR\} \quad \text{公式 5-1} \\
 &= f\left\{ \begin{array}{l} V_{i,j}^t, \\ d_tam_{i,j}, d_vcity_{i,j}, d_city_{i,j}, d_vtown_{i,j}, d_town_{i,j}, \\ d_river_{i,j}, r_road_{i,j}, d_bdtown_{i,j}, f_rgn_{i,j}, \\ planning_{i,j}, con_f_{i,j}, landresource_{i,j}, \\ neighbor^t_{i,j} \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

式中:

$V_{i,j}^t$ 为 t 时刻的 ij 位置的元胞状态

$V_{i,j}^{t+1}$ 为 t+1 时刻的 ij 位置的元胞状态

f 为元胞的状态转换函数 (转换规则)

BUDEM 作为一种基于规则模型, 是通过对宏观参数、各个空间变量的权重系数和空间变量本身进行调整实现城市增长模拟的, 其中宏观参数用于控制城市空间增长速度 (即为宏观社会经济约束), 权重系数的大小表示相应政策 (policy) 的作用 (或实施) 的强度/显著性, 如限制、鼓励等, 而参数自身的空间分布表示空间发展政策的作用范围, 即规划方案/实例 (Scenario)。BUDEM 包括的空间变量的及其对应的政策如表 5-1 所示。

^⑦ 新版北京城市总体规划的 90% 建设用地地块平均大小为 25.6 万 m², 即 500*500 m 左右; 1950~2006 年, 北京市规划委员会的用地许可证地块平均大小为 200*200 m 左右; 2005 年北京城市域现状用地图中城市建设用地的图斑平均大小为 190*190 m 左右; 北京市中心城控制性详细规划中的地块平均大小为 20 345 m², 即 140*140 m 左右。

表 5-1 BUDEM 模型变量一览

类型	名称	数值	描述	空间政策	数据来源 ^⑧
LOCATION (空间约束)	<i>d_tam</i>	≥ 0	与天安门 的距离	中心地区发展政策	LOCATION
	<i>d_vcity</i>	≥ 0	与重点新城的距 离	重点新城发展政策	LOCATION
	<i>d_city</i>	≥ 0	与新城的 距离	新城发展政策	LOCATION
	<i>d_vtown</i>	≥ 0	与重点镇的 距离	重点镇发展政策	LOCATION
	<i>d_town</i>	≥ 0	与一般镇的 距离	一般镇发展政策	LOCATION
	<i>d_river</i>	≥ 0	与河流的 距离	滨水开发政策	LOCATION
	<i>d_road</i>	≥ 0	与道路的 距离	沿路发展政策	LOCATION
	<i>d_bdtown</i>	≥ 0	与乡镇边界 的距离	行政界线影响政策	BOUNDARY
GOVERNMENT (制度性约束)	<i>f_rgn</i>	0~1	京津冀区域 的吸引力	区域影响政策	LOCATION
	<i>planning</i>	0 1	城市总体规划 用地类型	城市规划政策	PLANNING
	<i>con_f</i>	0 1	是否为禁止 建设区	生态保护及 风险避让政策	CONSTRAIN
	<i>landresource</i>	1 2 3 4 5 6 7 8	针对农业用 地适宜性 的土地等级	土地资源保护 政策	LANDRESOURCE
NEIGHBOR (邻域约束)	<i>neighbor</i>	0~1	邻域内的城 市建设元 胞数目/8	紧凑发展政策	LANDi *

* LANDi 为 CA 循环过程中生成的城市建设用地分布数据，其中城市建设用地为 1，其余为 0。

5.1.3 CA 状态转换规则

状态转换规则是 CA 研究的热点和核心之一，其获取方法有多种：多准则判断 (MCE)、灰度、主成分分析 (PCA)、人工神经网络 (ANN)、遗传算法 (GA)、Fisher 判别、非线性核学习机、支持向量机、海量参数枚举等 (黎夏等, 2007)，本研究采用 MCE 作为元胞状态转移规则的具体形式，建立 CA 转换规则的过程，也就是 BUDEM 模型参数率定 (Identification) 的过程。

Landis(1994、1995、1998a、1998b)所开发的用于模拟城市发展形态的 CUF 和

⑧ 该列表示变量所对应的在“研究区域及模型数据”部分的数据名称。

CUF-2 (California Urban Future Model), 是 MCE 方法在城市增长方面的典型应用, 但其基本研究单元为矢量的 DLU (developing landuse unit, 开发土地单元, 类似于规划支持系统 “What if?” 中的 Uniform Analysis Zone, UAZ 的概念), 并没有基于 CA 的方法。基于 CA 模拟城市增长方面, Wu(2002)和黎夏等 (2007) 提出了 $P_c^t = P_g * con(s_{ij}^t = suitable) * \Omega_{i,j}^t$ 形式的状态转换规则, 其中, P_g 为基于 MCE 方法的城市增长适宜性 (或全局概率, global probability), 乘以局部的邻域作用 Ω 、环境约束 con 后得到最终的耦合概率 (joint probability)。Wu(1998)、Wu 和 Webster(1998)基于 MCE 方法, 采用 AHP 方法对各空间变量进行专家打分, 进而获得状态转换规则, Wu(2002)基于 Logistic 回归 (简称 LR) 通过对历史数据进行分析获得 MCE 中的空间变量的权重系数。Wu 的方法的不足之处在于, 基于 AHP 方法获取的权重系数, 具有不可重复性, 同时很难通过这一方法反应历史的发展趋势; 而在其 Logistic 回归的过程中, 因为邻域作用在不同的循环中处于不断变化之中, 很难在回归中考虑, 同时回归中没有考虑环境约束, 只是在回归之后将通过回归获得的概率乘以这两项作用, 环境约束和邻域在其状态转移规则中的参数设定会失之于主观, 不能完全反映某一历史阶段的城市空间增长的真实机制。

而 Clark 和 Gaydos(1998)提出了通过利用计算机自动计算不同参数组合 (nested loops) 产生的模拟结果, 将其与观察值进行对比, 计算其匹配度, 选择产生最优匹配度的参数集作为模型的参数进行模拟。Clark 和 Gaydos (1998)考虑了五个参数 (每个参数分别有 6、6、6、5 和 7 个取值), 进而生成共 7560 个参数组, 共运算 252 个小时识别最优参数组, Xie 等(2005)也采用了类似的方法应用于基于 CA 对苏州的城市增长进行模拟。采用这种方法, 如果参数增加, 则运算时间将大幅增长, BUDEM 共 13 个参数 (权重变量), 如果每个参数有 6 个选择, 每次循环按照同样的运行时间, 则总运行时间可达 50000 年, 这尚没有考虑每个参数仅有 6 个供选择数值的不足, 因此即便运用目前最为先进的工作站, 如此高强度的计算仍不可以接受。

本研究对 Wu(2002)、Clark 和 Gaydos(1998)二者的方法进行综合并作一定改进, 结合二者的优点, 将除邻域作用 *neighbor* 变量外的其余 12 个空间变量代入 Logistic 回归方程中, 利用历史数据获取因变量, 回归得到回归系数即权重系数 w_{1-12} , 在此基础上利用单一参数循环方式 (MonoLoop), 选取点对点匹配度 (goodness-of-fit, GOF) 最大的系数作为识别的 *neighbor* 的权重系数 wN^* , 一方面利用历史数据可以获得更为真实全面的城市增长规律, 一方面大大降低了模型运算的时间。另外。最终确定的状态转换规则如公式 5-2 所示, 首先根据宏观条件, 确定不同阶段的元胞转换数目, 之后基于约束条件计算城市增长的适宜性 s_{ij}^t , 进而计算全局概率 p_g^t

和最终概率 p^t ，最后在 Allocation 过程中，根据 $stepNum$ 数值，识别需要转变的元胞。

$$\begin{aligned}
 &1. LandAmount = \sum_t stepNum^t \\
 &2. s_{ij}^t = w_0 \\
 &\quad + w_1 * d_tam_{ij} + w_2 * d_vcity_{ij} + w_3 * d_city_{ij} + w_4 * d_vtown_{ij} + w_5 * d_town_{ij} \\
 &\quad + w_6 * d_river_{ij} + w_7 * r_road_{ij} + w_8 * d_bdtown_{ij} + w_9 * f_rgn_{ij} \\
 &\quad + w_{10} * planning_{ij} + w_{11} * con_f_{ij} + w_{12} * landresource_{ij} \\
 &\quad + wN^* * neighbor^t_{ij} \\
 &3. p_g^t = \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}} \\
 &4. p^t = \exp \left[\alpha \left(\frac{p_g^t}{p_{g\ max}^t} - 1 \right) \right] \\
 &5. for k = 1 to stepNum^t \\
 &\quad if p_{ij}^t = p_{max}^t then V_{ij}^{t+1} = 1 \\
 &\quad p_{ij}^t = p_{ij}^t - p_{max}^t \\
 &\quad p_{max}^t \text{ update} \\
 &next k
 \end{aligned}$$

公式 5-2

式中：

$LandAmount$ ：元胞总增长数目

$stepNum^t$ ：每次循环元胞增长数目

s_{ij}^t ：土地利用适宜性

w ：空间变量权重系数

p_g^t ：变换后的全局概率

$p_{g\ max}^t$ ：每次循环中全局概率最大值

α ：扩散系数 (1~10)

p^t ：最终概率

p_{max}^t ：每次循环不同子循环内最终概率最大值，其数值在子循环内不断更新

在公式 5-2 中， $stepNum$ 表示每个 iteration (1 个 CA 离散时间) 发生状态转变的元胞数目，可根据宏观的社会经济发展指标来确定，用以表征政府的土地供应政策的松紧 (尤其是增量土地部分)，以控制增长的速度。通过统计年鉴，历史各阶段的 $stepNum$ 可以获得，中长期来看，研究区域内未来每年城市建设用地增长 $30\ km^2$ (10cells/iteration)。

基于所建立的 CA 状态转换规则，BUDEM 的模拟流程如图 5-2 所示。首先设置模型的环境变量、空间变量及相应系数，并基于宏观社会经济条件计算不同时间阶段的 $stepNum$ 参数，在 CA 环境中计算土地利用适宜性、全局概率和最终概率等变量，最后在 Allocation 过程中采用循环的方式进行元胞的空间识别，完成一个 CA 离散时间的模拟。根据模拟的目标时间，确定循环次数，CA 模型不断循环 (多

次的 allocation 过程)，最终完成整个模拟过程。

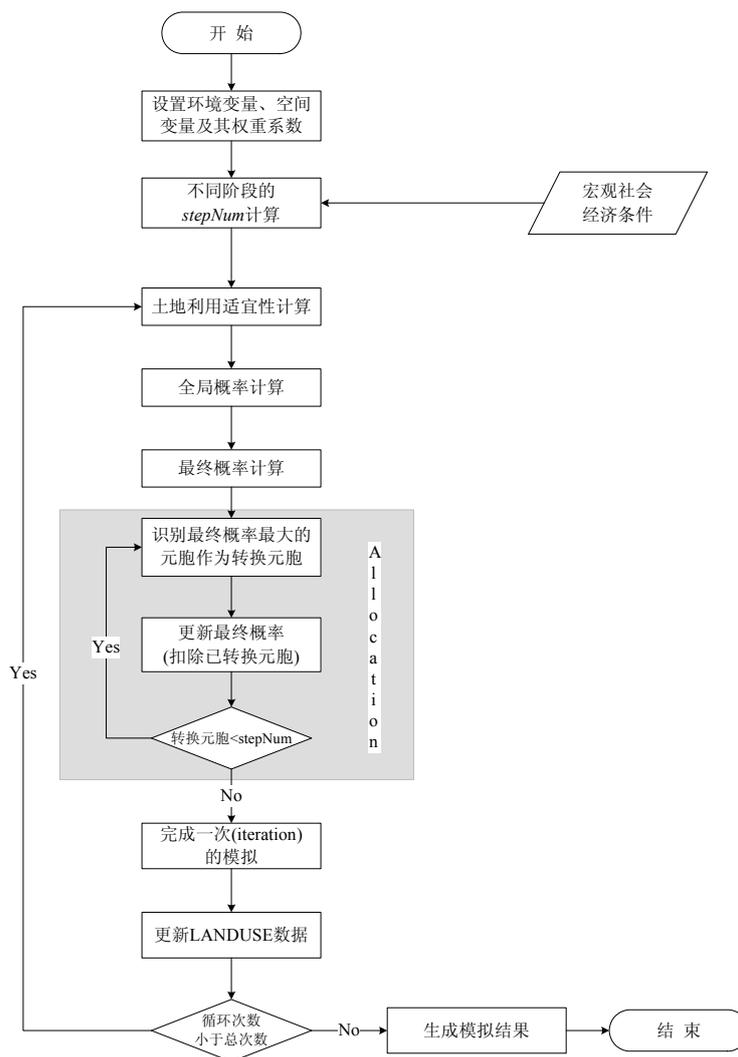


图 5-2 BUDEM模拟流程

5.1.4 模型的参数识别方法

在状态转换规则中，初始概率是 13 个空间变量所构成的函数，因变量是二项分类常量，即将土地利用分为开发的 (Developed) 和未开发的 (Undeveloped)，不满足正态分布的条件，这时采用 Logistic 回归分析方法获取 CA 的状态转换规则 (Wu, 2002)，其具体形式如公式 5-3 所示，为半对数方程，回归系数 b 反映了变量的敏感性，即变量变化 1 个单位对整体概率的影响，其绝对值越大，则其对应变量越敏感。

$$P_{Logistic} = \frac{1}{1 + e^{-z_{ij}}}$$

$$z_{ij} = a + \sum_k b_k x_k$$

公式 5-3

式中:

- a : LOGISTIC回归模型的常数项
- b_k : LOGISTIC回归模型的系数
- x_k : 空间变量
- $P_{Logistic}$: 基于LOGISTIC的转变概率

Logistic 回归的因变量是否发生由非城市建设用地向城市建设用地的转变 (发生转变为 1, 不发生转变为 0), 自变量为公式 5-3 中的除 *neighbor* 之外的 12 个空间变量。利用 ESRI ArcGIS 的 SAMPLE 工具, 对自变量对应的空间数据进行部分采样, 获得自变量数据, 对不同阶段之末和之初的 LANDUSE 数据作栅格代数减法运算获得因变量数据 (黎夏等, 2007)。将自变量和因变量在 SPSS 环境中进行分析^⑨, 可以获得 w_{1-12} , 它的大小反映了开发概率受这 12 个空间变量影响的基本规律。

通过 Logistic 回归方法确定除 *neighbor* 之外 12 个空间变量的权重参数之后, 保持这些权重参数不变, 在模型中增加一个循环过程, 不断调整 *neighbor* 的权重系数 ($w_{neighbor}$, 简称为 wN), 对比不同 wN 的模拟值与观察值, 将具有最佳匹配度的 wN^* 与 Logistic 回归获得的 w_{1-12} 一同代入状态转换规则, 即可实现城市空间形态模拟的功能。模拟值与观察值的匹配度的表征指标较多, 本部分选择 GOF, 即点对点匹配度来评价模拟值与观察值的匹配度, 其理论上的最大值为 1。^⑩

5.1.5 BUDEM 模型的开发

鉴于 ESRI ArcGIS 具有完善的 GIS 数据处理、分析和表达功能, 同时其空间分析模块的部分功能与 CA 模型的连接性较好, 因此 BUDEM 基于 ArcObjects 组件, 采用 VBA 语言进行开发。在模型开发过程中, 首先在研究范围内选取一个典型的小区域作为虚拟空间, 设定了一系列的观测变量用于调试模型参数, 测试 BUDEM 的运行结果, 最后在整个研究范围内开展模型的应用工作。通过在模拟的过程中生成日志文件 (log file), 记录每次循环的指标变化以辅助模型测试, 并可用于了解模型的运行情况。

本研究还开发了友好的 BUDEM 模型的中英文图形界面 (graphical user

⑨ 为了对比不同的回归的系数, 所进行的每次 Logistic 回归的样本范围保持不变, 考虑常数项, 采用 Regression/Binary logistic 的 FORWARD:LR 方法。

⑩ 对于 wN 数值范围的选择, 为了降低 MonoLoop 过程的模型运行时间, 先在较大的范围内不断尝试各个数值进行计算, 之后根据其计算结果不断细化数值选择的范围。不同的 wN 值的模拟过程中, 其余参数保持不变, 包括目标建设用地总规模。

interface, GUI), 可以方便地对模拟的输入参数进行设置, 并对输出结果进行显示。BUDEM 模型的系统结构如图 5-3 所示, 主要包括模型输入模块、模型计算模块和结果输出模块。

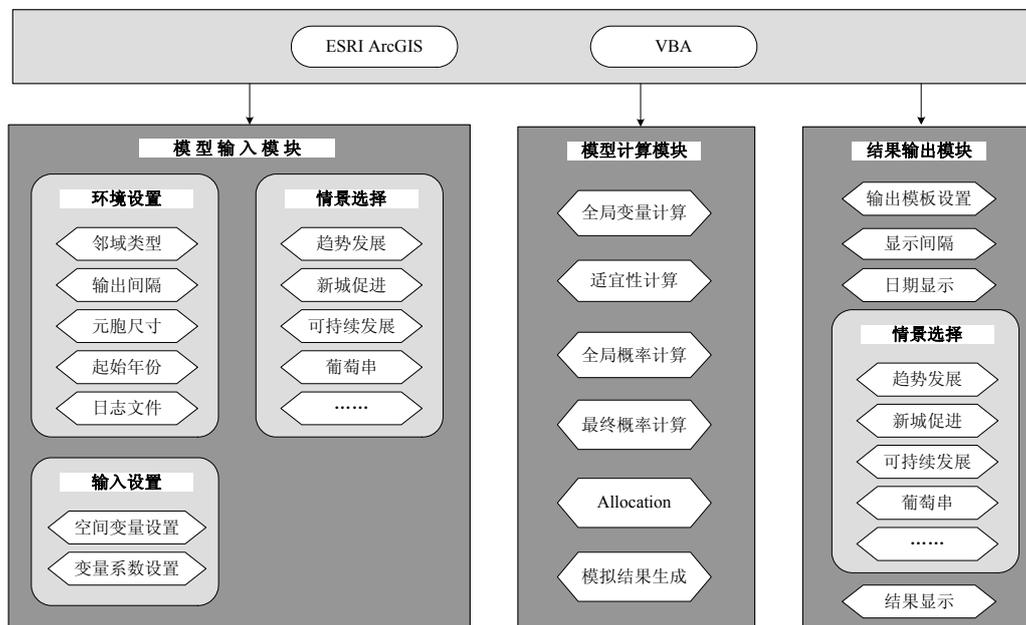


图 5-3 BUDEM模型系统结构

BUDEM 模型的界面如图 5-4 所示, 实现了 GIS 与 CA 的紧密集成, 相比松散的集成, 这种模式提高了模型的易用性。

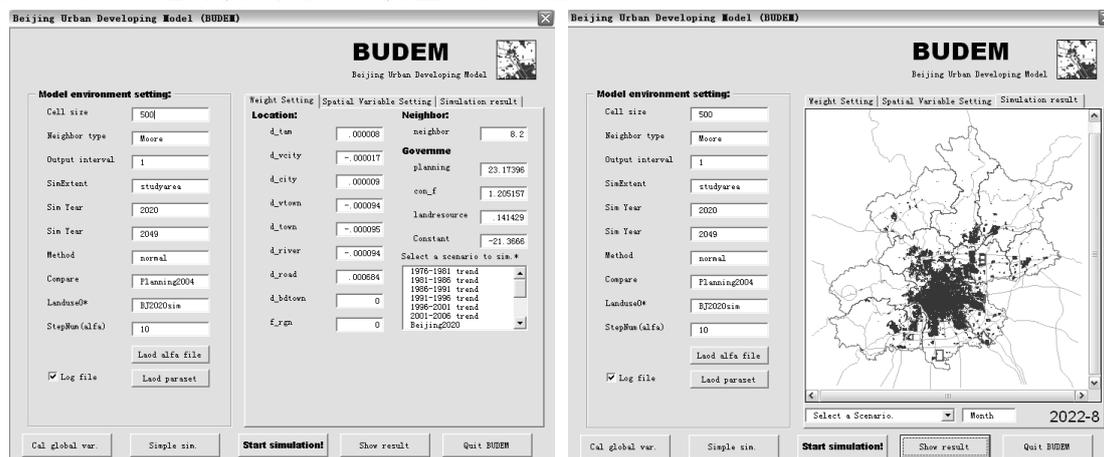


图 5-4 BUDEM模型主界面 (左: 参数设置界面; 右: 模拟结果界面)

5.2 研究区域及模型数据

北京位于华北大平原的北端, 西以西山与山西高原相接, 北以燕山与内蒙古高原相接, 东南面向平原, 距渤海西岸约 150 km。作为 BUDEM 模型的研究范围,

北京市域总面积为 16 410km² (图 5-5)。北京的平原区为高程在 100 m 以下的平原及台地, 总面积 6 338 km² (不含延庆盆地), 占全市面积的 39%; 山区面积 10 072 km², 占全市面积的 61%。

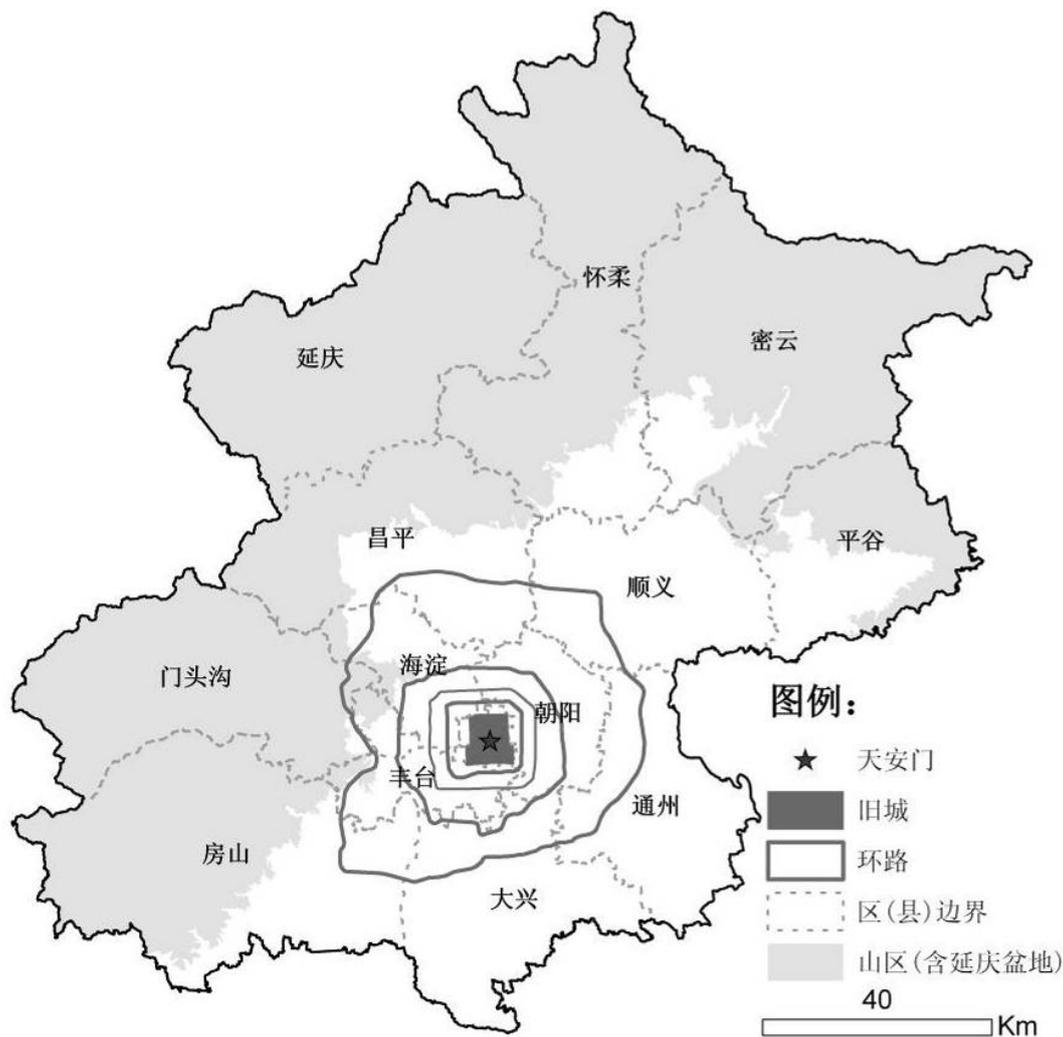


图 5-5 BUDEM模型研究区域

BUDEM 模型主要涉及 8 类基础数据, 土地利用 (LANDUSE)、限建分区 (CONSTRAIN)、土地等级 (LANDRESOURCE)、区位 (LOCATION)、城市规划 (PLANNING)、边界 (BOUNDARY)、政策区 (POLICYZONE) 和宏观社会经济 (SOCIO-ECONOMIC) 等。空间数据都位于北京市域内^①, 市域边界之外的数据统一为 NODATA, 格式统一为 ESRI 的单一 band 的 GRID, 空间参考相同 (空间数据的数据精度最低为 500 m, 同时考虑到 BUDEM 模型主要用于区域发展的宏观模拟, 因此元胞大小选为 500 m)。

^① 宏观社会经济数据是对北京市域的整体描述数据。

(1) LANDUSE 数据解译自 1986 年、1991 年、1996 年、2001 年和 2006TM 影像, 土地利用类型分为六类, 城市建设用地、农村建设用地、农地、林地、水域和未利用地, *landuse* 变量对应于该数据, 为城市建设用地为 1, 否则为 0。

(2) CONSTRAIN 数据用于表征不同空间对城镇建设的限制程度, 考虑 110 多项自然资源保护和风险规避要素对城市建设的复杂约束条件, 并结合现有的法律、法规和规范等, 将市域划分为禁止建设区、限制建设区和适宜建设区 (龙瀛等, 2006), *con_f* 变量对应禁止建设区。

(3) LANDRESOURCE 数据用于表征市域土地的农业适宜性, 根据北京市计划委员会国土环保处 (1988) 将土地分为一类地到八类地, 依次不适合农业耕作, *landresource* 变量对应于该数据。鉴于北京在城市增长过程中与基本农田的矛盾较大, 因此引入该数据。

(4) LOCATION 数据, 用于表征市域不同地区的区位条件 (或开发适宜性, 这一数据已分配至各个元胞), 主要包括与各类城镇中心 (天安门、重点新城、新城、重点镇、一般镇)、道路 (到城市主干路层次)、河流 (到二级河流层次)、乡镇边界的最近距离^②以及京津冀吸引力 (京津冀区域对研究区域的吸引力)。基于各类区位要素 (点、线) 空间分布的 GIS 图层, 采用 ESRI ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块的 Distance/Straight Line 命令, 可以获取相应的区位数据 (距离)。对于京津冀吸引力 *f_rgn* 变量, 根据城市空间相互作用理论, 采用引力模型 (Potential Model) 计算京津冀区域内各区县对北京市域不同元胞的吸引力 (党安荣等, 2002; Weber, 2003), 以此表征研究范围之外的区域对北京城市空间增长的影响。

(5) PLANNING 数据包括自北京 1958 年行政区划调整形成目前的市域范围以来, 北京市域范围内开展的五次总体规划, 1958 年、1973 年、1982 年、1992 年和 2004 年 (北京市规划委员会等, 2006), 土地利用类型分为城市建设用地和非城市建设用地; *planning* 变量对应于该数据, 其中规划城市建设用地为 1, 其余为 0。

(6) BOUNDARY 数据用于表征北京市域范围内的不同级别的行政边界、环路边界、生态功能区边界、流域边界等, 用于状态转换规则的空间分异, 进而实现在不同区域采用不同的状态转换规则, *d_bdtown* 变量为基于其中的乡镇行政边界并采用 ESRI ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块的 Distance/Straight Line 命令获得。

(7) POLICYZONE 数据用于表示在 PLANNING 数据中没有表达的拟重点开发的地区, 目前在模型中设定北京大兴区南部的首都第二国际机场备选区域为

^② 直线距离在宏观阶段可以选用, 如果研究范围缩小、研究精度增大, 则可以考虑细化道路等级, 并引入轨道交通站点、快速路出入口、高速公路出入口等要素, 以及时间因素。

POLICYZONE。该数据可在相应的模拟阶段将其空间范围代入 *landuse* 变量, 作为新增的城市建设用地, 以实现模拟该政策的作用。

(8) SOCIO-ECONOMIC 数据主要摘自北京市统计局 (1999) 的自 1952 以来各年北京的人口、资源、环境、经济和社会等方面的统计数据, 主要用于建立宏观层次的城市建设用地总量 (或历年增量) 与各宏观指标的关系。

5.3 北京城市增长的历史参数识别 (1986-2006)

参数识别即参数率定, 是识别模型参数的过程。对于 BUDEM 模型中的相应参数, 通过 Logistic 回归对历史数据进行分析, 可以获得不同历史阶段的相应参数, 进而对不同历史阶段的城市增长模式进行对比, 并可作为模型模拟参数设定的依据, 避免了主观赋值的武断性, 是模型应用的重要基础工作。

根据数据的可获得情况, 可以分析的历史阶段主要有: 1986~1991、1991~1996、1996~2001 以及 2001~2006。在各个历史阶段的回归中, 假设 *d_tam*、*d_vcity*、*d_city*、*d_vtown*、*d_town*、*d_bdtown*、*landresource*、*con_f* 等变量均相同, 假定上述变量不随时间变化, 而 *planning*、*d_road* 和因变量^③各个阶段不同, 不考虑 *neighbor* 变量。

各个历史阶段的回归系数如表 5-2 所示, 纵向分析各个历史阶段, 可以看出城市增长的驱动力差异较大, 市场和政府在其中所起到的作用也存在差异 (对改革开放的背景也是个印证)。各个历史阶段城市增长的共同点是沿道路开发显著, 对禁建区的保护显著。横向对比不同要素随时间的变化, 可以看出空间要素在不同历史阶段所起的作用不尽相同, 甚至相反。

表 5-2 不同历史阶段的 Logistic 回归系数

变量	B (2001~2006)	B (1996~2001)	B (1991~1996)	B (1986~1991)
<i>d_tam</i>	-0.000 016*	-0.000 035*	-0.000 041*	
<i>d_vcity</i>	-0.000 025*	-0.000 031*		-0.000 031*
<i>d_city</i>	-0.000 019*	-0.000 066*	-0.000 033*	
<i>d_vtown</i>			0.000 025*	0.000 058*
<i>d_town</i>		0.000 089*	0.000 066*	
<i>d_river</i>	-0.000 138*			
<i>d_road</i>	-0.000 256*	-0.000 804*	-0.000 524*	-0.001 092*
<i>d_bdtown</i>		-0.000 377*		
<i>f_rgn</i>	4.302 458*	-13.737 258*		
<i>planning</i>	-0.410 472*	0.254 173	0.575 671*	1.310 654*

③ 因变量利用各个阶段之末的 *landuse* 栅格数据和之初的 *landuse* 栅格数据作代数减法获得。

变量	B (2001~2006)	B (1996~2001)	B (1991~1996)	B (1986~1991)
<i>con_f</i>	-0.521 103*	-0.453 115*	-0.497 453*	-1.506 241*
<i>landresource</i>			-0.075 543	-0.233 262
<i>Constant</i>	-0.174 524	0.588 961	-0.998 267*	-3.610 055*

* 在 0.001 水平显著。

根据 2001~2006 的历史回归, 并采用 MonoLoop 方法, 得到 $wN^*=12.5$, $GOF=97.920\%$, 可以接受, 模拟结果如图 5-6 所示, 通过模拟结果与 LAND2006TM 数据的对比, 可以看出本模型具有较高的精确度, 这也证明了所建立的 BUDEM 模型和所采用的 MonoLoop 方法在北京城市增长模拟方面的可应用性。

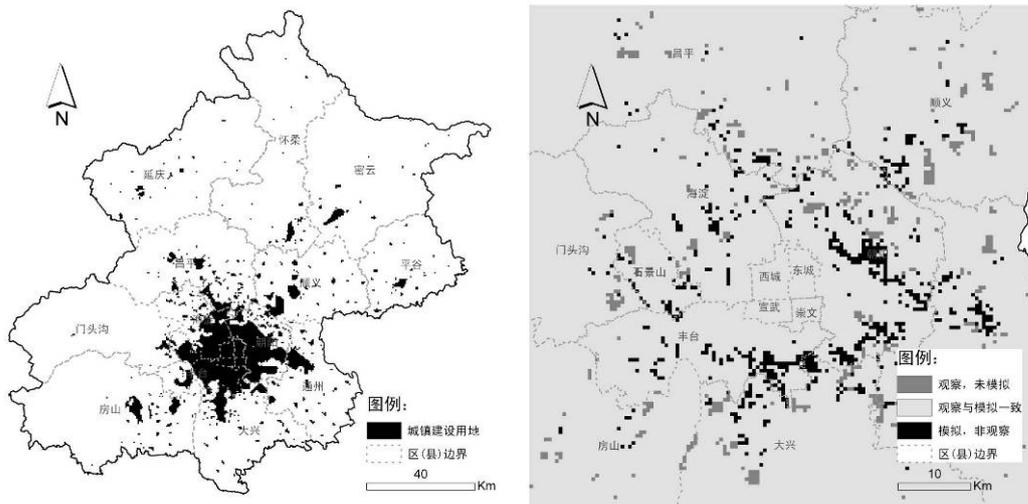


图 5-6 2006年模拟结果及中心地区与观察数据对比

5.4 远景城市增长模拟

5.4.1 延续历史增长的基准情景

目前北京市的规划部门制定的城市总体规划的规划期末为 2020 年, 而对 2049 年即北京作为新中国首都 100 周年这一时期的远景城市空间形态并没有进行规划或预测。为了对下一轮城市总体规划修编做好技术储备并做好规划的预警工作, 有必要对 2020~2049 年的城市空间形态进行模拟。

假定 2020 年的规划方案可以实现 (BEIJING2020), 在 2020 年的规划方案的基础上进行 BEIJING2049 的预测。这种预测模式相比在 2006 年现状土地利用的基础上进行预测, 可以降低预测的不确定性, 因为在中国土地的城市开发受规划的引导作用较强, 规划可以解释的土地开发比例较大, 因此可以认为 BEIJING2020 规划方案实现的不确定性小于以现状为基准进行预测的不确定性。而在西方部分

发达国家，土地的权属私有居多，政府对城市增长的控制作用不如中国显著，尤其是对远景的预测。

设定每年增长 30 万人/年^④，新增人口的人均建设用地标准为 100 m²/人，2049 年人口规模为 2 670 万人，城市建设用地总量为 3 412 km² (13 650 cells) 作为输入条件模拟 2049 年的空间增长 (*stepNum*=10)，即为 BEIJING2049 的基准情景，模拟结果如图 5-7 所示（鉴于 BUDEM 是基于规则模型，因此这里不需要进行模拟结果的验证）：基准情景的城市空间增长主要位于顺义、昌平、通州以及密云水库周边，南城相比北城的发展较弱；新版总规所划定的部分发展备用地并没有得到较大发展（永乐、潮白河东岸）。基准情景是在延续 BEIJING2020 发展政策的基础上生成的，如果不采取该政策，则相应的空间增长将会发生变化，在“情景分析”部分中将分别给出其他发展条件下的城市空间增长。

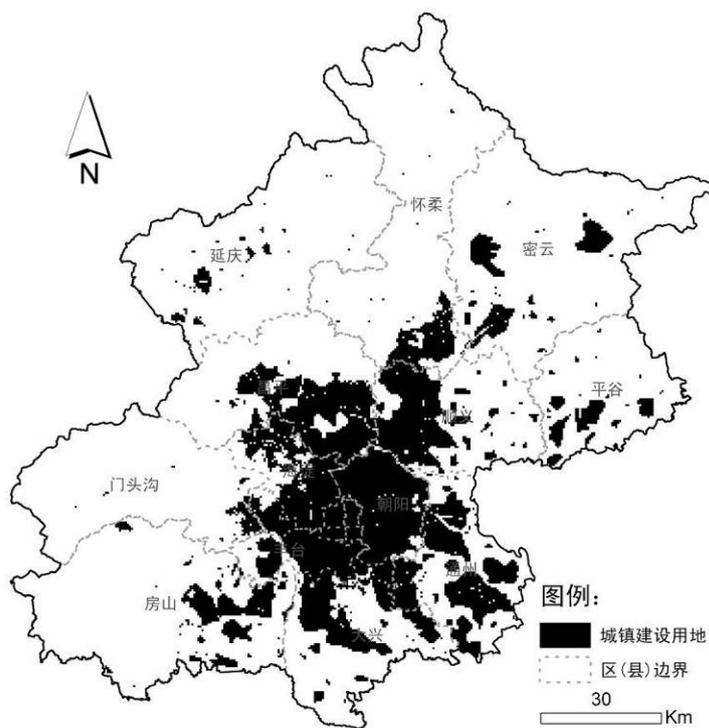


图 5-7 BEIJING2049 基准情景模拟结果

5.4.2 北京远景城市增长的情景分析

(1) 宏观政策模拟 (A)

宏观政策，如人口发展、经济发展等，对城市增长速度 (*stepNum*) 有较大影响，通过计量分析，可以识别他们之间的关系，如 *stemNum* 可以写为 GDP、总人

^④ 假设均为城市人口，在模拟的过程中，可以根据对宏观社会经济发展的判断对此参数进行调整。

口、平均城市工资、交通费用、农地产出、工业用地面积、交通设施等数值的函数，因此可以通过调整未来的宏观政策改变 $stepNum$ 的数值。这里参考规划城镇建设用地的计算思路，考虑人均城镇建设用地指标和人口规模，采用公式 5-4 计算 $stepNum$ ，进而改变城市空间增长的方案。

$$stepNum = \frac{y_t - y_{t_0}}{t - t_0} = dPOP * x * k \quad \text{公式 5-4}$$

式中：

y_t : 第 t 年的城镇建设用地面积, km^2

y_{t_0} : 第 t_0 年的城镇建设用地面积, km^2

$dPOP$: 每年增长的人口数量, 万人/年

x : 人均城镇建设用地面积, $m^2/人$

k : 调节参数

A 类情景只通过调整人口增长速度、人均建设用地指标等参数调整 $stepNum$ 的数值进行模拟。设置了 A1 人口高速增长情景和 A2 人口低速增长情景。其中，A1 情景假设 2020~2049 人口增长速度为 86 万人/年, 2049 年全市总人口 4 294 万人), 如新增人口的人均建设用地标准为 $100 m^2/人$, 则 2049 年的城市建设用地总规模为 $5 023.5 km^2$ (20 094 cells), 模拟结果如图 5-8 所示。

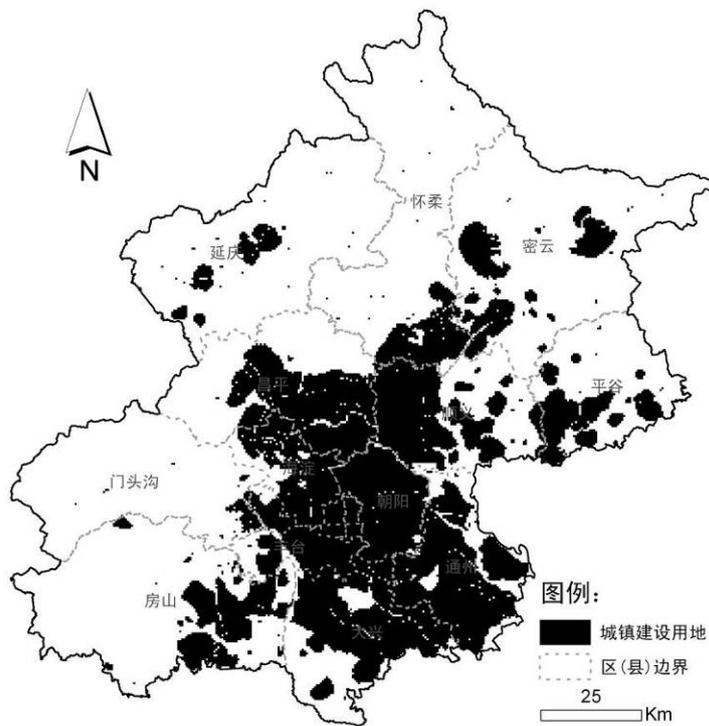


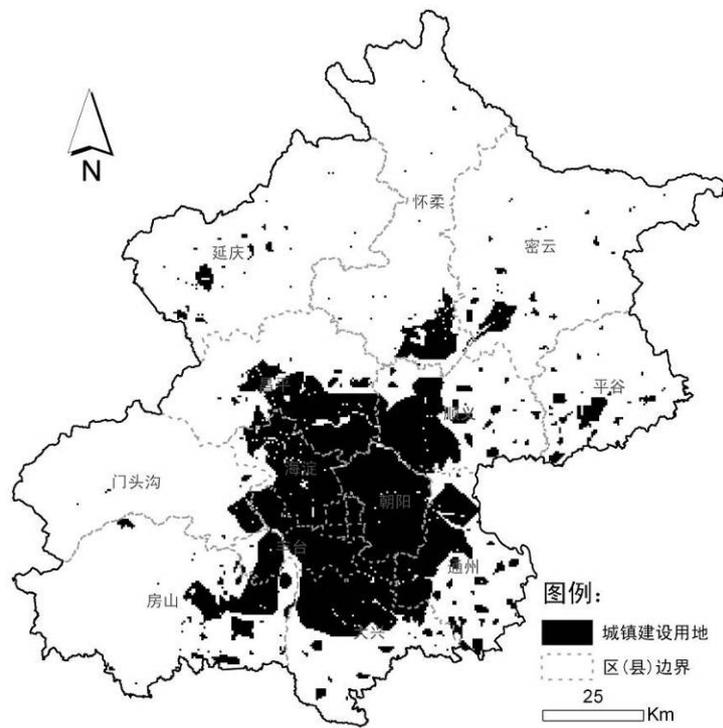
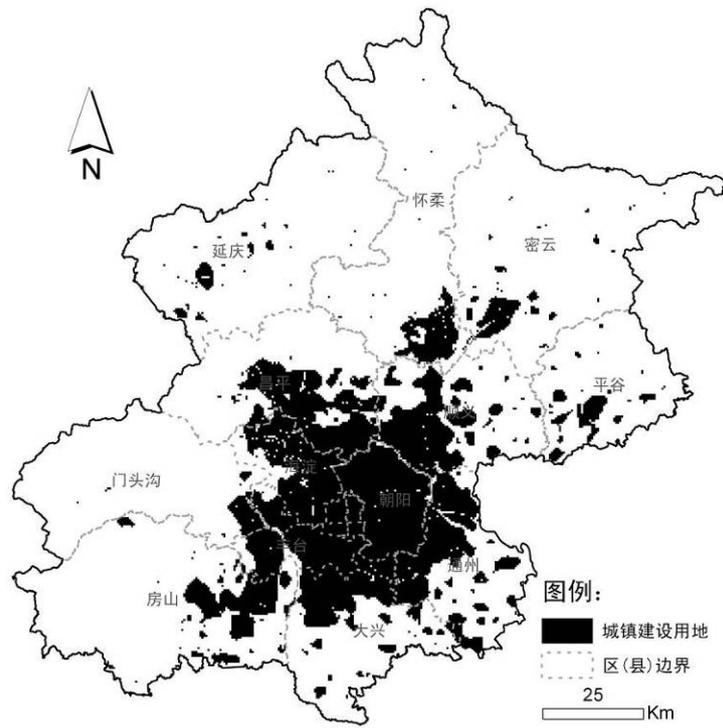
图 5-8 人口高速增长情景模拟结果 (A1)

(2) 规划方案模拟 (B)

除了通过宏观政策控制城市空间增长的速度,还可以通过制定新的规划方案改变城市空间增长的格局。B 类情景仅调整相关变量的空间分布,如调整城镇中心的位置、路网布局、控制发展区范围等,以改变空间政策有效作用的空间范围,而其他参数保持与 BEIJING2049 基准情景相同(空间变量系数及 *stepNum*)。可以模拟的情景包括 B1 新建七环情景、B2 新城中心移动情景和 B3 新建自然保护区情景,篇幅有限,不在这里列出,通过 BUDEM 模型平台可以实现这些情景的模拟功能。

(3) 规划政策情景 (C)

C 类情景假设人口增长速度、用地标准和规模与 BEIJING2049 基准情景相同,即每年增长 30 万人/年,新增人口的人均建设用地标准为 $100 \text{ m}^2/\text{人}$,2049 年人口规模为 2 670 万人,城市建设用地总量为 $3 412 \text{ km}^2$,因此参数设置中,*stepNum*=10。变量的空间分布也保持与基准情景相同,仅调整各空间变量的权重系数,即通过改变相应空间政策的实施力度(当系数为 0 时表示不引入该政策),生成不同发展侧重的城市空间增长情景:C1 趋势发展情景、C2 蔓延情景、C3 “葡萄串”情景、C4 可持续发展情景、C5 新城促进发展情景、C6 滨河促进发展情景、C7 道路促进发展情景和 C8 区域协调发展情景。



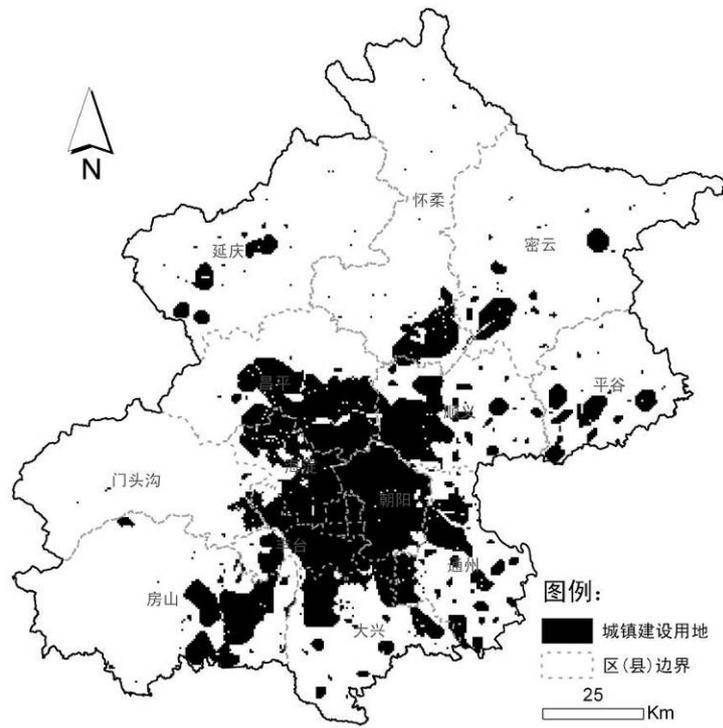


图 5-11 “葡萄串”情景模拟结果 (C3)

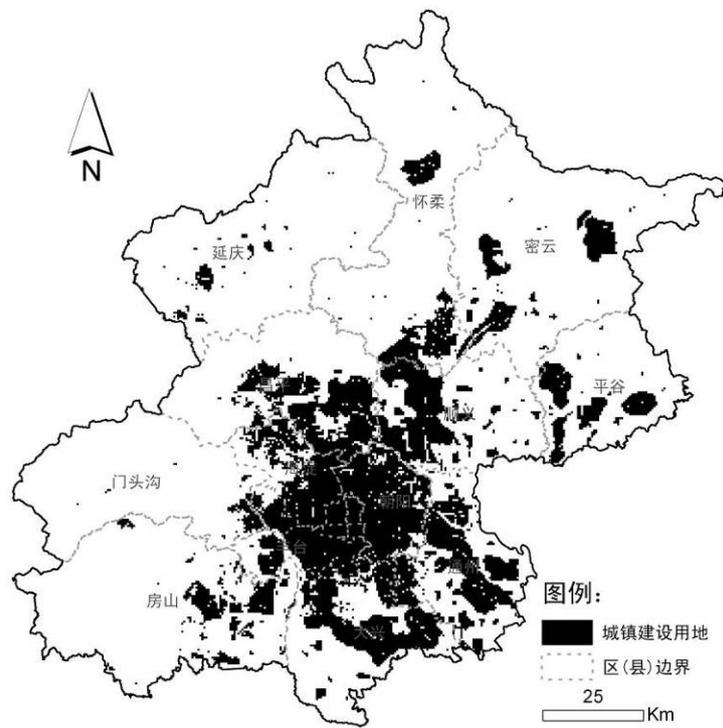


图 5-12 可持续发展情景模拟结果 (C4)

5.4.3 各个城市增长情景的对比分析

为了对各情景进行对比,选择以下几个参数进行分析:占用禁建区面积 *conf*、限建区面积 *conr*、占用绿化隔离带(第一道和第二道之和)面积 *green*、基本农田面积 *agri*、农村建设用地面积 *rural* 和蔓延程度 (*Moron I*),分析结果如表 5-3 所示。

表 5-3 各情景模拟结果对比 (km²)

方案名称	<i>conf</i>	<i>conr</i>	<i>green</i>	<i>agri</i>	<i>rural</i>	<i>Moron I</i>
基准情景	1 050	2 119	1 312	542	244	0.19
A1	1 890	2 775	1 539	1 227	403	0.14
A2	768	1 976	1 287	347	201	0.18
C1	843	2 376	1 595	397	284	0.25
C2	918	2 257	1 630	469	272	0.25
C3	912	2 253	1 369	455	258	0.20
C4	765	2 214	1 181	492	248	0.13
C5	1 007	2 230	1 457	563	280	0.17
C6	906	2 352	1 555	438	268	0.24
C7	905	2 345	1 526	438	266	0.22
C8	919	2 385	1 544	445	269	0.23

从分析结果可以看出, A 类情景中,同规模增长情景 A1 对各类敏感性用地的占用都明显高于低增长情景 A2,聚集程度低于 A2; C 类情景中,可持续发展情景 C4 相比其他情景,在敏感性用地的占用方面都处于最低,这也体现了“可持续”的特点;趋势发展情景 C1 对农村建设用地的占用最大,这点在 2001~2006 已有所体现;蔓延情景 C2 的集聚程度最高,而可持续发展情景 C4 最低。

5.5 利用模拟结果制定城市增长边界 (UGBs)

城市快速发展过程中产生的城市蔓延等问题,已经对城市的可持续发展形成了巨大挑战。因而,如何对城市增长进行科学有效的控制,成为城市规划编制中必须考虑的重要内容。在城市增长的相关控制政策中,以提高城市土地使用密度和保护开放空间为基本目标的容纳式城市发展政策 (Urban Containment Policies) 是被广泛采用的一项政策 (Nelson 和 Duncan, 1995)。该政策通常包含三种形式:绿带 (Greenbelts)、城市增长边界 (Urban Growth Boundaries, UGBs) 和城市服务边界 (Urban Service Boundaries, USBs) (韩昊英等, 2009)。其中,UGBs 是目前在学术界讨论最为广泛的一种工具。它通过划定城市区域和农村区域之间的界限,

利用区划、开发许可证的控制和其他土地使用调控手段, 将合法的城市开发控制在边界之内, 从而达到控制城市地区增长规模、时序和形态的作用(Pendall 等, 2002)。

在我国, 城市增长边界的类似概念也开始逐渐被重视。2006年4月1日开始实施的《城市规划编制办法》要求总体规划和中心城区规划应“提出禁建区、限建区、适建区范围, 研究空间增长边界, 提出建设用地规模 and 建设用地范围”。禁建区和限建区因而成为城镇建设用地边界制定的重要参考依据, 主要起到控制城市增长的作用。根据这一要求, 龙瀛等(2006)、龙瀛(2010)提出了北京市禁建区和限建区划分的标准和原则。此外, 规划城镇建设用地对于城市增长控制的重要作用也不容忽视。2008年1月1日开始实施的《中华人民共和国城乡规划法》明确赋予规划城镇建设用地以控制城市增长的法律地位, 城镇建设用地边界内外的开发活动便被划分为“合法”和“非法”两类, 规划建设用地的边界是城市规划行政主管部门核发建设用地规划许可证的基本依据。

从控制机制来看, 中国目前的禁建区、限建区和城镇建设用地边界与美国的UGBs都是通过划定城市发展控制线, 依靠区划、开发许可证等土地使用调控手段加以实施的, 二者具有很大的相似性。因此从广义上, 可以将它们统称为中国的UGBs。而由于规划城镇建设用地边界控制拥有更为明确的法律保障, 因此, 从狭义上, 则可以将规划城镇建设用地边界定义为中国的UGBs(如无特殊说明, 本部分的UGBs皆为狭义概念)。UGBs的制定需综合考虑影响城市空间发展的多种因素。在我国城市中, 传统的规划城镇建设用地边界的制定所采用的方法往往缺乏充分的定量分析和科学依据, 很难有效地控制城市发展建设。Han 和 Dang(2008)在其近期的研究中, 应用多时相遥感对规划城镇建设用地边界在控制城市用地增长方面的有效性进行检验, 发现1983-1993和1993-2005两个阶段的北京六环内UGBs外的实际城镇建设用地增长规模都要高于UGBs内的增长规模。此外, 田莉等(2008)和徐毅松等(2009)分别就广州和上海的城市规划方案进行了实施评估, 结果显示大量的城市发展位于规划城镇建设用地边界之外。这也说明在UGBs的制定中需要在传统方法的基础上采用新的方法来支持。

利用约束性CA模拟的城市增长结果, 是对未来不同发展情景模式下的城市空间布局的判断, 可以作为我国UGBs制定的基础。模拟结果, 直接或经过少量修改, 可以作为中国的UGBs。约束性CA不同时间阶段(iteration或step)对应的模拟结果, 即为不同阶段的城市增长方案, 可以作为不同时间阶段的UGBs。具体地, 将基于栅格格式格式的模拟结果矢量化, 删除紧凑度低和面积较小(1公顷以下)的不适合开展规模城镇建设的地块, 根据最终得到的矢量图层, 可以给出不同

同城镇等级（如中心城、各新城、各乡镇）的 UGBs。从 UGBs 扣除现状的城镇建设用地，即为各个城镇等级的增长空间，具体方法参见龙瀛等(2009)和 Long 等(2010a)。另外需要强调的是，我国城市增长受到很多因素（约束条件）的制约，这也会导致某个城镇等级的行政范围内（如某新城）最终制定的 UGBs 并不是一个或少数几个完整的多边形范围，而是多个多边形 (Polygon) 地块，这点与美国的 UGBs 有所不同。

基于上述方法，本部分制定了北京市中心城、各新城和各乡镇的 UGBs，其中中心城和 11 个新城的 UGBs 的制定结果如图 5-13 所示（篇幅有限，142 个乡镇的 UGBs 不一一介绍）。

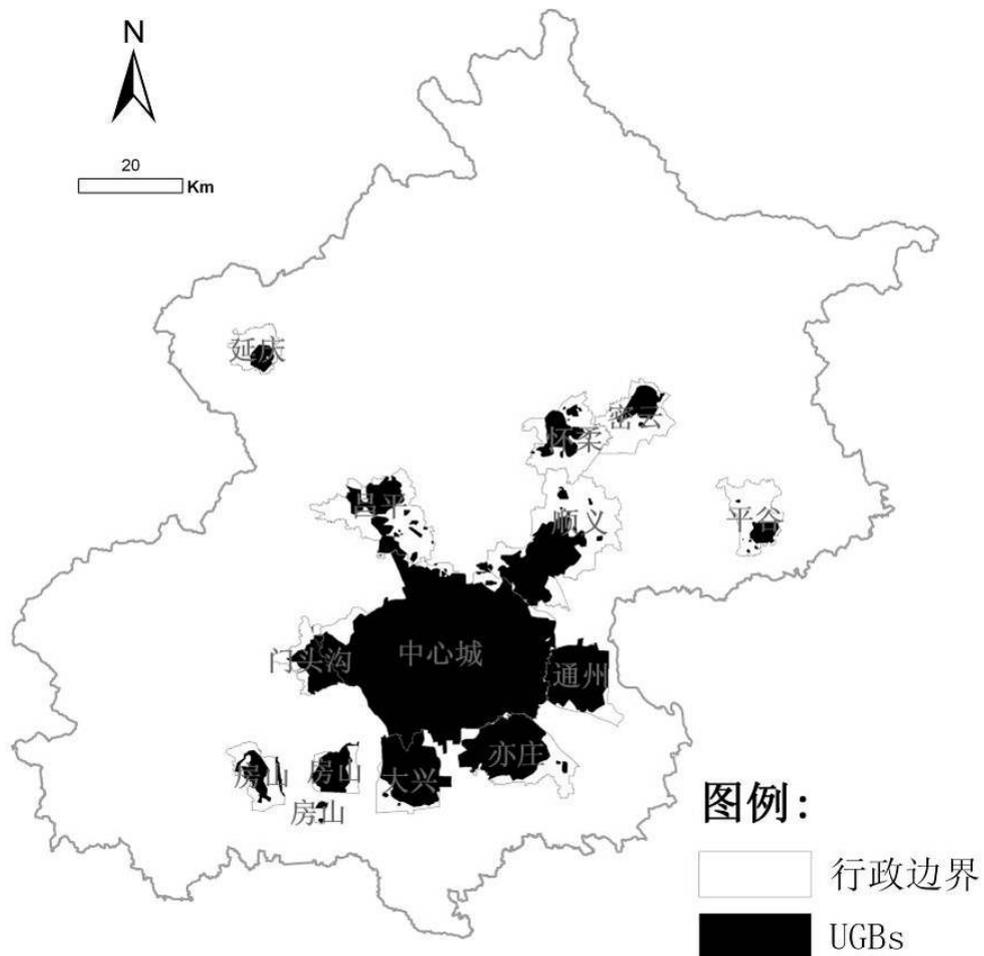


图 5-13 根据模拟结果制定的中心城及新城UGBs空间分布图

将所制定的 UGBs 与规划方案和 2004 年现状的城镇建设用地进行对比 (表 5-4), 所制定的 UGBs 与规划方案在中心城和新城的总面积规模差别不大, 都较 2004 年有较大幅度的提高。然而, 此次模拟指定的 UGBs 的用地空间布局却与总体规划有着较大的不同。如果延续 1991-2004 年的历史发展模式, 在 2004-2020 年的总体规划期间内, 北京市南部地区的城市用地扩展需求将大大超过总体规划所划定的 UGBs 范围, 而北部地区的城市用地扩展需求将小于总体规划所划定的 UGBs 范围。具体到各个新城来看, 南部新城 (如大兴新城、亦庄新城等) 的 UGBs 面积明显高于规划方案, 而北部 (如怀柔新城、昌平新城、顺义新城等) 的情况则相反。

这表明, 原有总体规划中 UGBs 配置在空间布局上不尽合理。因此, 在拟定新的 UGBs 或改进现有的 UGBs 过程中, 应当充分考虑这一特征, 以模拟的结果为基础, 对各个地区的 UGBs 的布局及面积进行调整, 建立更为科学合理的城市增长边界。

表 5-4 北京市中心城及各新城 UGBs 统计表

名称	2004 年 面积	模拟 UGBs 面积 (km ²)	规划 UGBs 面积 (km ²)	模拟与规划 之差 (%)
中心城	708.9	1033.0	984.2	48.8
1 顺义新城	50.2	157.2	180.2	-23
2 亦庄新城	25.1	156.8	116.6	40.2
3 通州新城	42.7	133.6	109.5	24.1
4 大兴新城	55.8	132.3	84.7	47.6
5 房山新城	52.6	86.4	88.8	-2.4
6 昌平新城	35.7	82.0	109.8	-27.8
7 门头沟新城	21.2	52.9	35.5	17.4
8 怀柔新城	20.0	48.8	80.0	-31.2
9 密云新城	18.9	34.8	46.9	-12.1
10 平谷新城	13.1	19.8	31.0	-11.2
11 延庆新城	7.3	17.3	20.2	-2.9
总计	1051.7	1954.7	1887.4	

相比传统的 UGBs 制定方法, 基于约束性 CA 所制定的 UGBs 考虑了城市发展的综合因素, 能够较好地反映城市空间增长的时空动态变化, 并能体现众多城市发展政策的影响效果。本研究的结果可以为北京城市规划中 UGBs 的确定提供直接的决策支持, 研究方法可以为今后我国城市的 UGBs 制定和改进提供理论指导和技术支持, 并可以在其他类似的城市中加以应用。

5.6 小结：基于城市增长模拟为城市规划提供决策支持

直接面向北京城市规划的实践工作，是 BUDEM 模型相比其他基于 CA 的城市模型的特点之一，本阶段的 BUDEM 模型在研究时序、转换规则获取方法、制度性约束、政策模拟、面向规划应用等方面做了一定的突破：作为城市空间形态模拟的平台，BUDEM 直接面向北京城市规划的实践工作，可以用于模拟宏观政策、规划方案、城市空间发展策略等，是对 CA 在超大城市城市规划部门应用的可能性和实际效果的有力尝试；结合中国城市增长的特点，提出了 Allocation 的模拟逻辑，并基于城市增长理论以及 Hedonic 模型选择 CA 模拟的空间变量，使得 BUDEM 模型的建立具有更为坚实的理论基础；引入京津冀吸引力变量，用于表征京津冀区域（大北京）对北京城市空间增长的影响，从而在常规 CA 模型没有考虑区域因素这一方面有所突破；在建模方法上，BUDEM 采用 Logistic 回归和 MonoLoop 集成的方法获取 CA 状态转换规则（Calibration），并以此作为实现指定空间形态的核心方法；在考虑的城市发展因素方面，引入了复杂环境约束、城市规划等其他 CA 城市增长模型少有考虑并体现中国城市发展特色的制度性约束的研究视角；提出了结合中国国情的基于中期规划方案预测远景城市空间增长的模式（基于 2020 规划预测 2049），降低长期城市形态预测的不确定性。

第6章 城市形态-交通能耗-环境影响集成的微观模拟 (FEE-MAS 模型)

随着全球范围内化石能源的快速消耗,环境问题也日益严峻,2007年政府间气候变化专门委员会(IPCC,2007)报告说:当前气候变暖的原因90%以上的可能性是由伴随能源消耗的人类活动造成的(叶笃正,2009)。据统计,全球大城市消耗的能源占全球的75%,温室气体排放量占世界的80%(沈清基,2005),中国城市的能源问题和相应的温室气体减排在未来也将面临较大的挑战(Zhuang,2008)。低碳社会(Low Carbon Society, LCS)在这一背景下已经成为当前国际学术界讨论的热点,中国也是其中关注的重点(Hourcade 和 Crassous, 2008; Shukla 等, 2008; Strachan 等, 2008)。城市规划管理理念方面,土地混合使用、紧凑城市、精明增长等都被认为是应对城市能源问题的有效手段。而城市规划管理实践方面,低碳城市建设已经成为目前的国际国内的研究热点,我国也相应提出了节能减排的发展战略。

城市的能源消耗主要包括生产、居民生活和交通等方面,据美国资料,由建筑物排放的CO₂约占39%,交通工具排放的CO₂约占33%,工业排放的CO₂约占28%;英国80%的化石燃料是由建筑和交通消耗的;在目前我国能源消耗中,建筑与交通消耗的能源已占社会终端总能耗的42%左右,按照发达国家经验,这一方面的比例也将随着经济水平的发展在未来继续增加。这些都进而说明交通能耗对促进低碳城市建设具有重要意义。

影响交通能耗的因素主要有三个方面,城市形态(土地使用特征)、交通系统特征(交通网络可达性、便捷性和服务质量)和社会经济因素(个人与家庭的诸多特征)。交通能耗与交通出行频率、交通出行距离、交通出行模式直接关联,其中出行频率首先表现的是具有出行者社会经济特征的一种功能,再而是建筑环境的一种功能,出行距离则是首先表现为建筑环境的一种功能,再而才是社会经济特性,而出行模式的选择则依赖于这两者。因而在考虑交通能耗与城市结构形态等方面,关注出行距离与出行模式具有非常积极的意义(王静文等,2008)。

较早的实证研究就已经显示,城市形态与能源消耗具有较强的相关关系(Anderson等,1996; Banister等,1997),尤其是交通能源消耗(包括货运和客运交通),如Newman和Kenworthy(1989)研究发现随着人口密度的提高,人均的交通

能耗减少; Shim 等(2006)以每个城市作为样本,分析了城市大小、密度和中心分布模式对交通能耗的影响; Alford 和 Whiteman(2009)通过评估澳大利亚墨尔本地区的不同区域的城市形态,分析了交通能源消耗与潜在的城市形态和交通基础设施选择之间的关系。

城市形态对交通出行行为选择、出行总量具有显著影响,进而影响交通能耗,但只是其中的一项因素,所采用的方法主要是基于行为模拟(active based modeling approach),利用的数据多为交通出行日志(travel diary),并将出行者根据出行和就业地的城市形态作为变量进行考虑以进行定量评价,在这方面开展的实证研究包括所有出行行为、机动车出行行为、儿童上学行为、步行出行行为、非工作出行等不同方面(Dieleman 等, 2002; Giuliano 和 Narayan, 2003; Horner, 2007; Kerr 等, 2007; Loo 和 Chow, 2007; Maat 和 Timmermans, 2009; McMillan, 2007; Pan 等, 2009; Schlossberg 等, 2006; Schwanen 等, 2004; Zhang, 2005)。Krizek(2003)的研究也显示,同样的家庭居住在不同的社区,其出行行为也会受到影响。人的包括交通出行在内的城市活动会构成空间足迹(spatial footprints),即一日活动所覆盖的多边形范围,活动范围的大小,一定程度上也可反映能源的消耗量。Fan 和 Khattak(2008)在其对北卡罗莱纳的实证研究发现,街道的连通性(connectivity)和零售业的混合程度(retail mix)是个人对空间使用的主要影响因素,而建筑密度的影响并不显著。

因此可以看出,已有较多研究证明交通能耗与城市形态具有显著影响,多以整个城市作为研究对象,进行城市间的对比分析。而少有城市内的研究对城市形态与交通能耗、环境影响的关系进行定量识别。同时传统的土地利用与交通模型的构建较为严密(Johnson 和 McCoy, 2006),要求的基础数据众多,运行时间较长,并不适合发现城市形态对交通能耗和环境影响的一般规律。本部分拟针对这一情况,建立城市形态、交通能耗和环境集成的多智能体(multi-agent)模型,对单一城市内的不同空间组织(即城市形态),如土地使用方式、开发密度、就业中心的数量和分布等,对潜在的通勤交通能耗和环境影响的关系进行定量识别。

已有部分学者尝试基于 MAS 研究城市形态、交通能耗和环境的的关系,如 Kii 和 Doi(2005)构建了基于 MAS 的土地利用与交通模型,结合空间经济学模型,对紧凑城市政策从生活质量(quality of life, QOL)角度进行评估; Zellner 等(2008)在假想空间基于 MAS 开发了用于评估不同城市政策的模型,提出了六个情景,用于分析其对城市形态,开发密度以及空气质量的影响。本部分与二者都将采用多智能体方法,但本部分侧重评价不同类型城市形态的潜在通勤交通出行总量和能源消耗,进而识别城市形态与通勤交通能耗、环境影响的动态响应关系。本部分

旨在回答以下几个问题：不同空间组织对城市通勤交通能耗的影响弹性范围；定量评价城市形态的不同指标对通勤交通能耗的影响程度；不同形状的城市形态对通勤交通能耗的影响；典型规划理念的潜在交通能耗差异。

6.1 基于多智能体的集成模拟模型

6.1.1 城市形态、交通能耗和环境影响的概念模型

城市形态、交通能耗和环境影响的关系，可以认为是通过城市内的人类活动实现的。例如，城市居民因为各种活动需要，产生城市交通，进而产生交通能源消耗，以及相应的环境影响。本部分所构建的集成模型，将侧重于城市居民的通勤交通能耗和相应的环境影响作为研究重点，而其他类别的能源消耗和环境影响将在未来研究中开展。为此，需要识别影响城市交通能耗的因素，总体上，其可以分为两个方面，居民的自身属性特征、偏好，以及城市的物理空间形态。根据王静文等(2008)，识别的与通勤交通能耗相关的影响因素，主要分为三个方面：人口社会经济特征、城市形态与交通系统特征（图 6-1）。通勤交通能耗与交通出行频率、出行距离、出行方式直接关联，其中出行频率主要受出行者的社会经济特征影响，出行距离则主要依赖于土地使用特征，而出行方式的选择则依赖于人口社会经济特征和土地使用特征。因而在考虑城市形态与通勤交通能耗关系时，关注出行距离与出行方式具有非常积极的意义。图 6-1 中的灰色高亮部分是本部分予以考虑的内容。

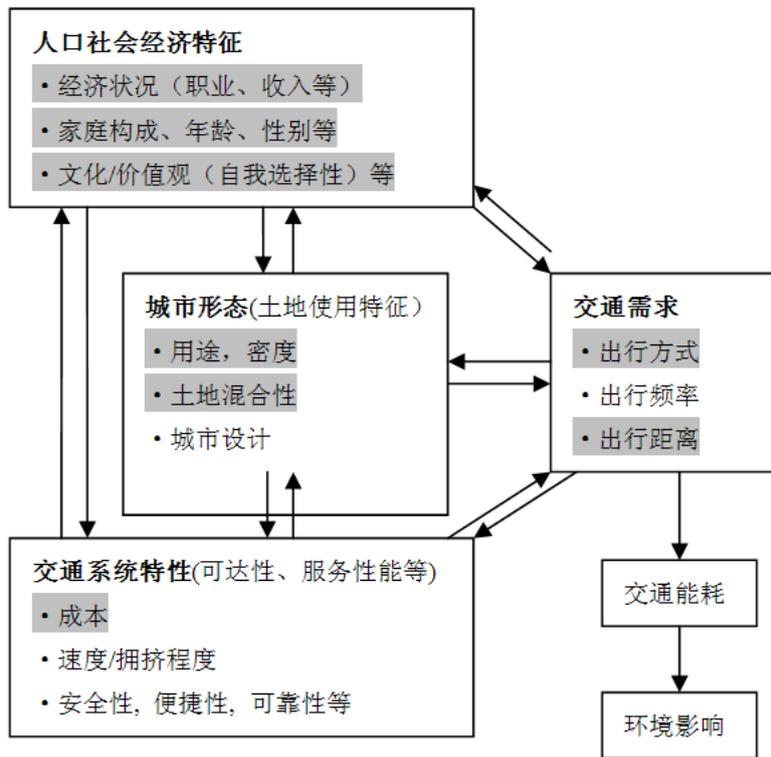


图 6-1 通勤交通能耗的影响因素分析

6.1.2 FEE-MAS 模型的基本假设

城市系统特别是交通系统较为复杂，一般利用专业交通模型进行交通出行方式选择、交通量预测等，本部分提出的概念模型将对整个城市系统进行若干简化(龙瀛等, 2010a)，以实现识别一般规律、测试理念的目的：

- (1) 城市为封闭的系统，与外界无交通联系，所有居民都在城市内就业；
- (2) 城市地块为统一大小的正方形，交通网络为均质的方格网形状的城市道路，不考虑轨道交通；
- (3) 土地使用方式分为居住地（R）和就业地（C）两种；
- (4) 1 个单位容积率（floor-area ratio, FAR）对应 1 个居民 agent 居住在一个地块中；
- (5) 居民的就业和出行比率均为 100%；
- (6) 仅考虑居民通勤交通的能耗，不考虑居民生活、娱乐等行为产生的能耗，以及工作期间产生的能耗；
- (7) 每个就业地块的就业容量不受限制；
- (8) 居民随机选择居住地，即居民进行居住区位选择的过程与居民的社会经济属性无关

(9) 仅考虑三种出行方式，小汽车、公共汽车、自行车或步行，每种出行方式的单位距离能耗和环境影响固定不变；

(10) 暂时不考虑居民的社会经济属性的分异，用一套居民数据应用于所有形态，即所有形态对应同一组居民。

6.2 FEE-MAS 模型开发与模拟流程

本部分所建立的城市形态-交通能耗-环境影响集成的 MAS 模型 (Urban Form-Transportation Energy Consumption-Environment MAS model, FEE-MAS)。该模型是基于 ESRI ArcGIS 的 Geoprocessing, 利用 Python 语言开发的, 主要包括两个部分, 其一是居民 agent, 其二是对应城市形态的地块 (GIS 矢量图层) (龙瀛等, 2011a)。具体模拟流程见图 6-2。一方面通过设置土地使用方式和开发密度, 生成城市形态, 并采用定量指标评价所生成的城市形态; 另一方面, 根据居民的社会经济统计特征和居民总数, 生成居民 agent, 其在所生成的城市形态中进行居住区位和就业区位的选择, 并根据对应的出行距离, 选择出行方式, 进而产生交通能耗和环境影响, 在整个城市形态层次计算总的交通能耗和环境影响。综合考虑以上两个方面, 通过多次模拟, 得到多组城市形态与交通能耗和环境影响的对应数据, 用于关系分析。

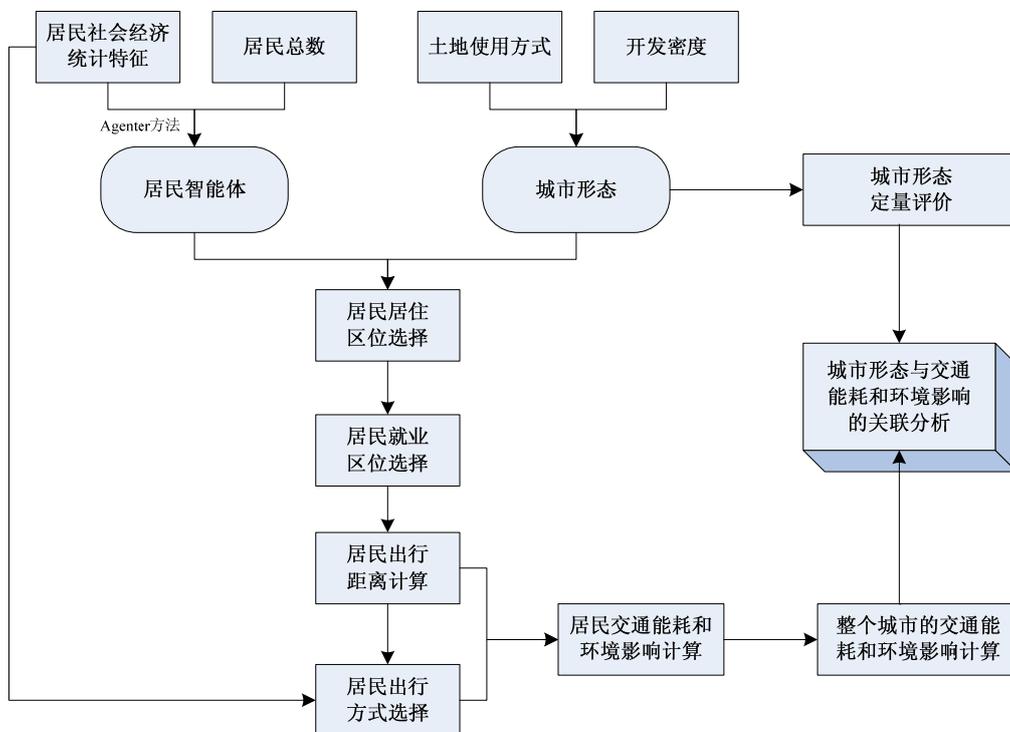


图 6-2 FEE-MAS模型的模拟流程图

下面对模拟流程进行具体介绍。

6.2.1 生成居民智能体

FEE-MAS 模型首先用于虚拟城市的分析, 假设共有 2000 个居民在虚拟城市中居住, 采用龙瀛等(2011)提出的微观样本反演的方法, 基于北京市第五次人口普查的统计资料(北京市第五次人口普查办公室和北京市统计局, 2002), 生成符合统计特征的居民智能体(agent)样本, 为在居民层次评估通勤交通量并计算交通能耗提供数据支持。生成的居民智能体的样本为 A_j , j 表示居民的 ID, 居民总数 J 为 2000, 居民的社会经济属性(如年龄 / 受教育程度 / 收入)为 A_j^s , s 表示社会经济属性的 ID。

6.2.2 生成城市形态、居民选择居住区位

假设虚拟城市为 $20*20$, 共计 400 个地块(图 6-3)。多个城市形态可以采用蒙特卡洛的方法生成。所生成的每个城市形态的居民总数相同, 但土地使用方式的分布、开发强度以及就业中心数目不同。每个城市形态设为 F^i , i 表示城市形态的 ID, M 表示地块总数(400), $F_{m,FAR}^i$ 表示形态 i 的 m 地块的 FAR 值(对应居民 agent 数量), $F_{m,TYPE}^i$ 表示形态 i 的 m 地块的用地类型。用地类型分为居住(R)和就业(C)两类, 其中 C 类用地网格的个数服从 10 到 40 个的均匀分布。2000 个居民参照 FAR 约束随机地选择 R 类地块居住, 如某地块地 FAR 为 3, 则会有随机选择的 3 个居民到该地块居住。 AC_m 表示居住在 m 地块的居民 agent 的数目, $\sum_{m=1}^M AC_m = 2000$ 。

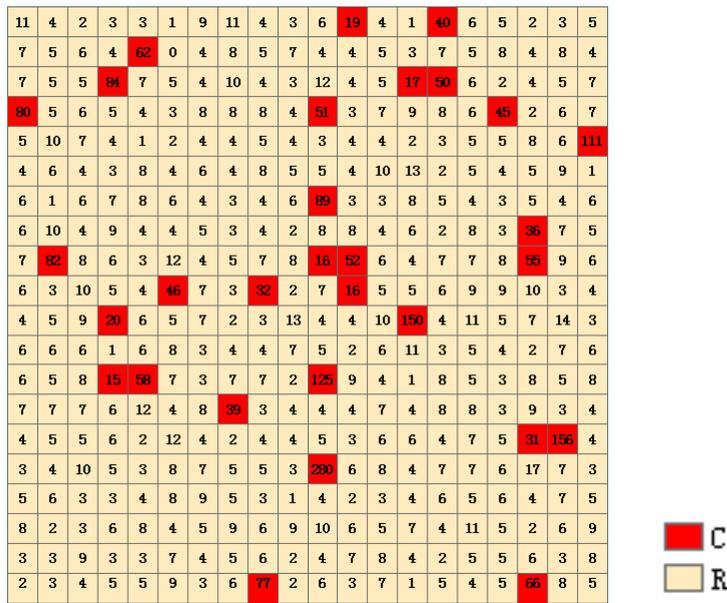


图 6-3 虚拟城市形态示意图

注：图中的数字表示容积率 FAR：对于居住地的 FAR，对应居住人口；对于就业地的 FAR，对应就业人口）

6.2.3 居民选择就业区位

居民就业区位选择过程，不考虑居民的社会经济特征对其的影响，所考虑两种极端情况是，对于完全理性的居民，选择最近的就业地就业；对于完全非理性的居民，随机选择就业地就业，不考虑就业距离大小。对于两种情形之间的居民，则属于有限理性的情况，以一定的概率进行最近就业或随机就业。因此针对居民群体引入理性程度 r 这一指标， $r=1$ 则完全理性，就近选择就业地； $r=0$ 则完全非理性，随机选择就业地；如果 $r=0.3$ ，则有 30% 的概率进行就近选择就业地，70% 的概率随机选择就业地。本部分假定 r 对于所有居民都相同，为了重点分析城市形态对通勤交通能耗的影响，这里统一取 $r=1$ 。

6.2.4 居民选择出行方式

居民选择何种方式出行，一方面受自身的社会经济特征影响，一方面受出行距离影响，即 $COMM_TYPE = f(A_j, dist_j)$ ，其中 $COMM_TYPE$ 表示出行方式， A_j 表示居民 j 的社会经济属性集合， $dist_j$ 表示居民 j 的出行距离， f 表示居民根据自身社会经济特征和出行距离选择出行方式的函数。出行方式一般是离散变量，可以通过建立离散选择模型 (discrete choice model, DCM) 模拟居民的出行方式选择行为，其参数可以从已有研究中获取，或在利用真实城市数据进行数据挖掘获

得。本部分将这一过程简化为，基于决策树的形式进行出行方式选择，假定出行方式 (COMM_TYPE) 仅与收入 (INCOME, 单位: 元) 和出行距离 (*dist*, 单位: 千米) 这两个变量有关系 (出行距离变量是基于居住区位选择和就业区位选择的结果确定的), 具体如下 (Python 脚本语言形式):

```
if INCOME >= 5000 and dist >= 4:
    COMM_TYPE = "Car" # 私家车出行
elif dist >= 3:
    COMM_TYPE = "Bus" # 公交车出行
else:
    COMM_TYPE = "Bike or Walk" # 自行车或步行出行
```

6.2.5 城市形态对应的通勤交通能耗和环境影响评价

基于居民的居住区位选择、就业区位选择以及出行方式选择, 可以根据居住地和就业地的空间分布计算通勤出行距离。每个居民根据出行距离和出行方式, 利用表 6-1 中所列的指标, 计算通勤交通能耗 (E_i) 和环境影响 (C_i), 如污染物和 CO₂ 排放量。所有居民的能耗和环境影响之和, 即为某城市形态对应的总能耗和环境影响。鉴于本部分主要侧重于探讨城市形态与通勤交通出行距离的关系, 因此表 6-1 中的指标非真实数值, 主要用于表征不同出行方式对应的能耗和环境影响的相对关系。

表 6-1 不同出行方式的能耗和环境影响指标

编号	出行方式	每人单位出行 距离的能耗	每人单位出行 距离的环境影响
1	小汽车 (Car)	10	10
2	公交 (Bus)	2	1
3	自行车或步行 (Bike or Walk)	0	0

6.2.6 城市形态的评价指标

针对每个城市形态, 利用 McGarigal 等(2002)开发的用于景观生态格局评价的工具 FRAGSTATS, 选取 14 个指标评价生成的诸多城市形态。这 14 个指标分为两类, 一类侧重评价土地使用方式的空间分布, 共 7 个指标, 另一类侧重评价开发强度的空间分布, 共 7 个指标。评价结果记为 I_i^k , 其中 k 表示指标的 ID, K 表示指标的总数目 ($K=14$), i 表示城市形态的 ID。

(1) C类地块分布 (土地使用方式):

- CLS_CA: Total Area, 表征就业用地总面积
- CLS_NP: Number of Patches, 表征就业地斑块数目
- CLS_LPI: Largest Patch Index, 表征主导就业中心所占的比例
- CLS_ENN_MN: Euclidean Nearest Neighbor Distance, 平均近邻距离, 表征就业中心分布规律
- 形状指数, 用于表征就业用地的形状
 - CLS_SHAPE_MN: Shape Index, 平均斑块分形指数
 - CLS_LSI: Landscape Shape Index, 景观形状指标
 - CLS_PARA_MN: Perimeter-Area Ratio, 平均周长面积形状指数

(2) FAR 分布 (开发强度):

- 多样性指标, 用于表征开发强度的空间分布是否均一
 - LD_SHDI: Shannon's Diversity index, 香农均匀度指标
 - LD_SHEI: Shannon's Evenness Index, 香农多样性指标
- LD_ENN_MN: Euclidean Nearest Neighbor Distance, 表征不同开发强度地块的分布规律
- LD_COHESION: Patch Cohesion Index, 凝聚
- Contagion-Interspersion 指标, 表征各级别开发强度地块的聚合程度
 - LD_CONTAG: Contagion index, 蔓延度指标
 - LD_DIVISION: Landscape Division Index, 分割
 - LD_AI: Aggregation Index, 聚合

6.2.7 城市形态与通勤交通能耗的响应关系识别

针对所有生成的城市形态的指标数值 (I_i^k) 及其对应的通勤交通总能耗 E_i 和环境影响 C_i , 进行定量分析, 识别城市形态对通勤交通能耗和环境影响的影响特征和一般规律, 进而识别低碳城市形态。具体如下:

(1) 对各个城市形态的评价指标进行相关性分析，剔除相关性较强的变量（小于-0.8 或大于 0.8）；

(2) 采用全局敏感性分析（global sensitivity analysis, GSA）的方法，考虑每个城市形态的剔除了高度相关的评价指标，以及每个形态对应的通勤交通能耗，识别影响城市通勤交通能耗的主导因素，即哪个评价指标对通勤交通能耗的影响最大；

(3) 评价城市形状的改变对通勤交通能耗的影响。

下面在“模型测试和模拟结果分析”部分给出响应关系识别的结果。

6.3 FEE-MAS 模型测试和模拟结果分析

将 FEE-MAS 模型运行 10000 次（每次模拟耗时 30s，总运行时间为 112h），最终达到收敛的效果（图 6-4），即城市形态对应的总通勤交通出行距离的平均累计值趋于稳定，表明这 10000 个城市形态能够对应这个空间内的所有城市形态的可能，即如果继续生成 10000 个城市形态，其总体特征与这 10000 次应一致，因此会一个收敛的过程。多次模拟的目的是为了保证得到的结果不是局部片面的，是为了使模型的运行达到稳定状态，即通过取得足够多的城市形态样本，使得基于该样本得到的统计特征可以代表城市系统的基本特征。

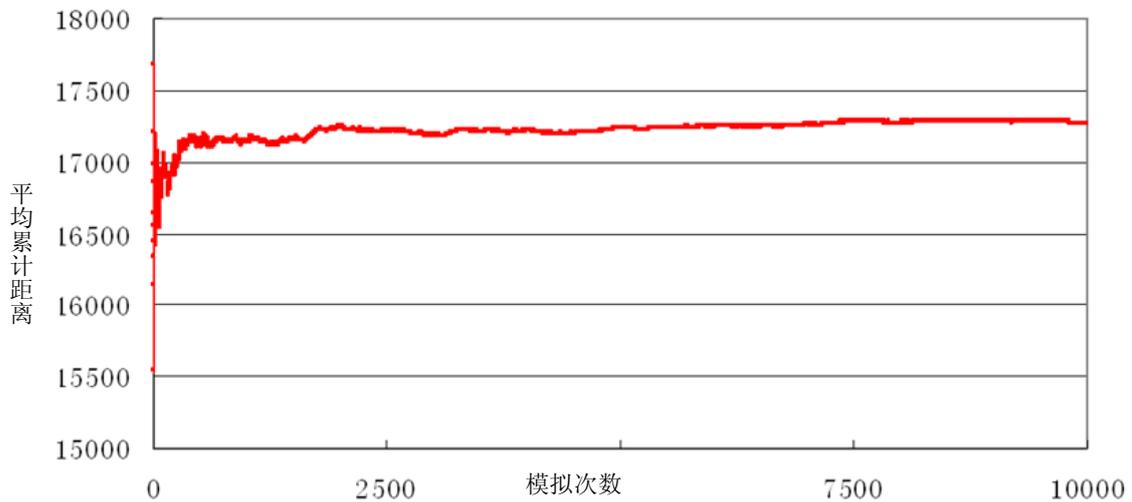


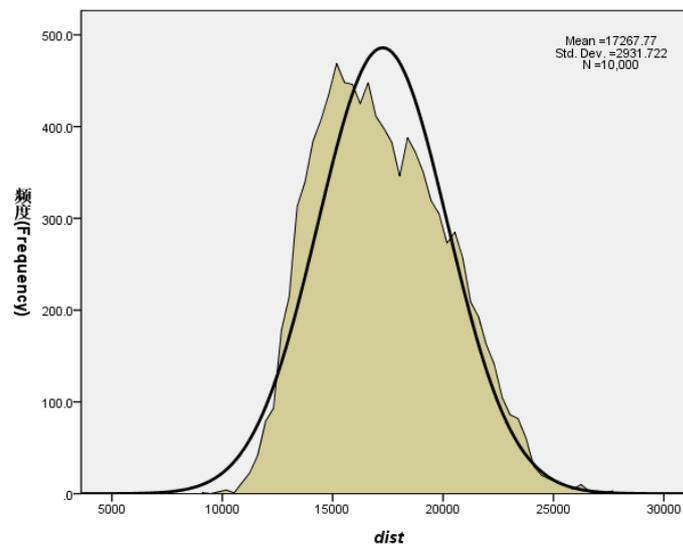
图 6-4 总通勤交通出行距离的平均累计值随模拟次数的变化曲线

10000 次模拟的统计性描述如表 6-2 所示（样本为城市形态，N=10000，变量为城市形态对应的通勤交通出行总量（*dist*）、总通勤交通能耗（*E*）和总污染物排放量（*C*），以及空间评价指标。

表 6-2 模拟结果的统计性描述表

名称	最小值	最大值	平均值	标准差
<i>dist</i>	9186	27848	17300	2932
<i>E</i>	64092	238378	140500	27969
<i>C</i>	62236	233844	137500	27517
CLS_CA	0.0010	0.0040	0.0025	0.0009
CLS_NP	6	33	19.2	5.6
CLS_LPI	0.2500	3.7500	0.7624	0.3248
CLS_LSI	2.2857	6.0769	4.4267	0.7948
CLS_SHAPE_MN	1.0000	1.2375	1.0423	0.0326
CLS_PARA_MN	34000	40000	38741	877
CLS_ENN_MN	2.1554	6.2072	3.0421	0.5705
LD_ENN_MN	2.3301	5.6048	3.3062	0.3579
LD_CONTAG	24.4728	50.4032	39.2857	4.0672
LD_COHESION	82.6889	96.7945	93.1993	1.4731
LD_DIVISION	0.5431	0.9249	0.6957	0.0553
LD_SHDI	0.7929	1.0989	0.9778	0.0671
LD_SHEI	0.4978	0.7560	0.6090	0.0406
LD_AI	35.8211	54.1918	44.6079	3.0234

每个城市形态对应的出行距离 (*dist*) 是模拟结果的核心变量。根据 *dist* 变量的分布, 可以看出同样的居民结构, 在空间组织不同的情况下, 通勤交通出行总量的变化情况, 从 9186 到 27848, 差异较大 (3.03 倍)。图 6-5 为 *dist* 变量的概率密度曲线, 其中黑色实线为正态分布曲线, *dist* 的直方图显示 *dist* 的概率密度分布基本与正态分布基本一致 (均值 17267.77, 标准差 2931.722)。

图 6-5 *dist*变量的概率密度分布及其与正态分布对比图

这里示意性地给出生成的 1 个城市形态 (图 6-6), 及对应的出行总距离 (图 6-7), 进而示意读者这 10000 次模拟的基本情况。

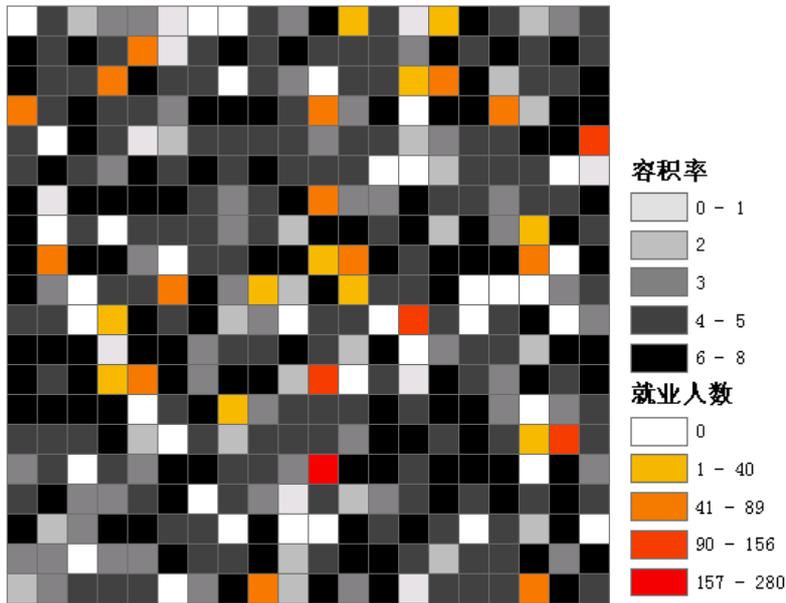


图 6-6 某城市形态就业区位选择后的容积率分布

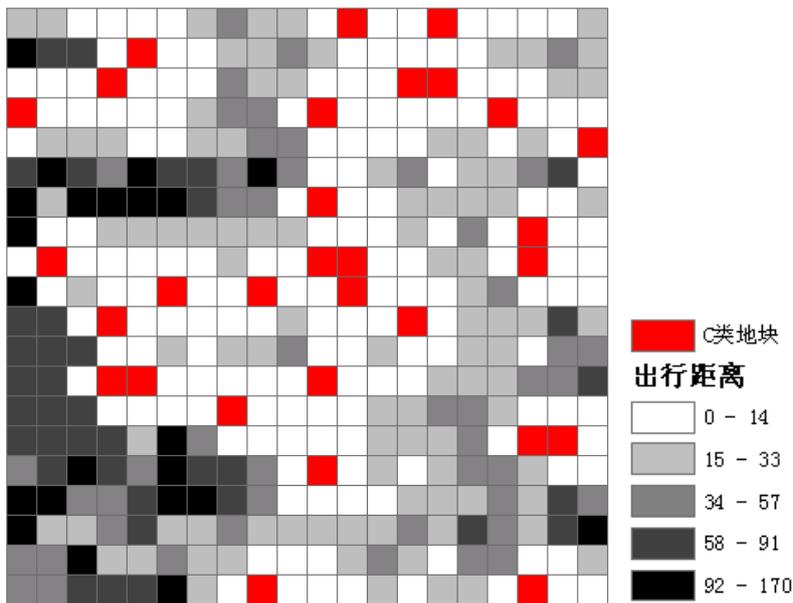


图 6-7 某城市形态各地块的总出行距离分布图

6.3.1 城市形态评价参数的相关性分析

通过相关性分析, 相关性大于 0.8 或小于 -0.8 的变量将被剔除, 剔除的变量为 CLS_CA、CLS_LSI、CLS_ENN_MN、LD_SHEI、LD_AI、LD_CONTAG 和 LD_COHESION。

6.3.2 模型参数的全局敏感性分析

通过全局敏感性分析，可以识别空间变量与出行距离的关系。全局敏感性分析相比传统的局部敏感性分析 (local sensitivity analysis, LSA)，可以识别整个参数空间范围内的参数对结果的综合影响，而不是局部敏感性分析中一次改变一个变量 (one-at-a-time, OAT) 的形式。本部分的全局敏感性分析工作中，将相关性较强的变量剔除后，其他的空间变量作为分析的范围。线性回归是进行全局敏感性分析的一种常用、简便的方法，即将出行距离 *dist* 作为因变量 (这里以 $\ln(\text{dist})$ 作为因变量)，空间变量作为自变量。采用 forward 线性回归的方法，LD_SHDI 因为不显著而被剔除，最终的回归结果见表 6-3，表示各个空间变量与 *dist* 的关系。从该表可以看出，各个变量的显著水平都处于 0.001 水平，CLS_NP 变量的系数为最小，且为负值，说明就业中心的数目这个变量对出行距离的影响最大，就业中心的数目越多，则出行距离越小。对于平均斑块分形指数 (CLS_SHAPE_MN) 的回归系数为负，表示城市形态中，就业用地的分布越复杂，形状越不规则，则通勤交通出行总量越低，主要在于居民就业区位选址的原则是最近就业的原因，即就业用地分布越不规则，则居民越容易找到最近的就业地块工作。

表 6-3 全局敏感性分析结果表

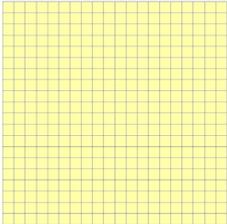
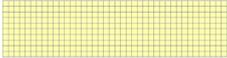
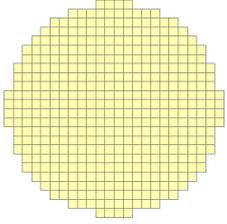
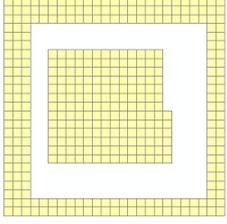
变量名称	标准化后的 回归系数	<i>t</i>	Sig.
常数项		198.017	.000
CLS_NP	-.771	-121.363	.000
CLS_SHAPE_MN	-.114	-19.246	.000
CLS_PARA_MN	.076	14.449	.000
LD_ENN_MN	.040	7.359	.000
CLS_LPI	-.030	-4.451	.000
LD_DIVISION	-.026	-3.975	.000

6.3.3 城市形状对通勤交通能耗的影响识别

以上实验结果均为基于 20*20 的方形城市开展。为了测算不同形状的城市形态对通勤交通能耗的影响，设定了如表 6-4 所示的 5 个形状。针对每种形状，基于 FEE-MAS 生成 5000 个城市形态 (对应不同的布局 and 开发密度，其设定的方法同“生成城市形态、居民选择居住区位”)，评估每种形状的多个城市形态的通勤交通总距离 (*dist*) (表 6-4)，其中均值可以作为衡量城市形状对通勤交通能耗的影响，可以看出圆形城市的能耗最低，有绿带的方形城市的能耗高于没有绿

带的方形城市，多个组团的城市形态的能耗低于单一组团的方形城市，这些都与常规的规划理念相符合。单长方形的城市的能耗略低于方形城市的能耗，这可能也是因为我们假设居民都是完全理性，选择最近就业地的原因，如果随机选择就业地，结果可能会有所差异，这将在下一阶段的研究中探讨。

表 6-4 不同形状的城市形态及其对应的通勤出行距离模拟结果

形状	地图	最小值	最大值	均值	标准差
方形 <i>dist</i>		9186	27848	17300	2932
长方形 <i>dist</i>		6943	33187	16801	4904
圆形 <i>dist</i>		7419	25750	13460	2906
绿带 <i>dist</i>		9608	31539	16558	3203
多中心 <i>dist</i>		6583	47535	14948	4910

注：地图的比例尺不同，每个地块的实际大小相同。

6.4 典型城市形态对比分析

为了对目前讨论较多的规划理念，如绿隔、交通导向型土地开发模式 (transit oriented development, TOD)、多中心、紧凑城市等，进行验证和评估，考虑就业中心数目、开发密度等因素，生成图 6-8 所示的 6 个典型的城市形态 (仅以 1 个地块示意就业中心的位置)，每个城市形态对应的空间同“6.2.2 生成城市形态、

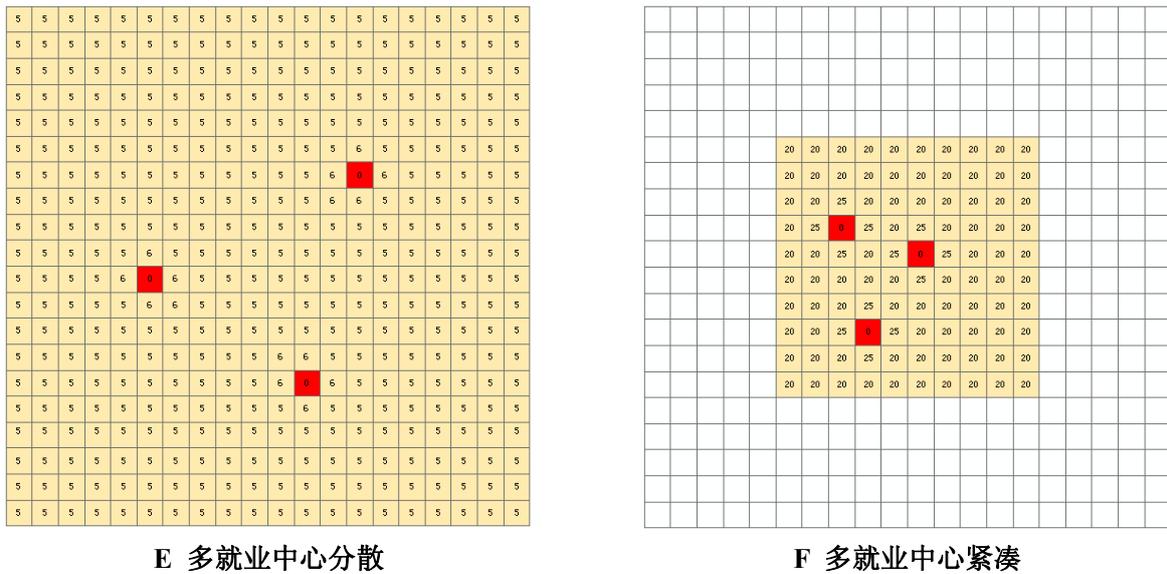


图 6-8 虚拟空间内六个典型的城市形态

注：红色为 C，黄色为 R，白色为未开发，地块内数字为 FAR。

利用 FEE-MAS 模型，对以上六种典型城市形态进行通勤交通总距离、能耗和环境影响的计算，结果如下（表 6-5）：

(1) 无论是单就业中心还是多就业中心的城市形态，分散布局（A 和 E）对应的出行总距离是紧凑布局（B 和 F）的 2 倍左右（多中心的差距更大），主要在于城市尺度缩小为原来的一半；

(3) 具有相同城市形状的单就业中心 TOD 模式（C）较单就业中心分散形态（A）也有大幅降低；

(4) 单就业中心条件下，绿隔政策引入（D）会提高非绿隔地区的开发密度，相比分散布局（A），会带来出行距离的小幅增加；

(4) 多就业中心紧凑模式的的城市形态（F）对应最小的出行总距离，主要在于城市范围的缩小，进而就业地与居住地的距离普遍降低；

(5) 多就业中心分散的城市形态（E）则对应最大的出行总距离，与单就业中心绿隔形态相近。

表 6-5 典型城市形态的模拟结果表

典型城市形态	总交通距离	能源消耗	环境影响	出行距离排序
A 单就业中心分散	20006	171792	168391	3
B 单就业中心紧凑	10020	78528	76344	5
C 单就业中心 TOD	14092	113456	110673	4
D 单就业中心绿隔	20026	170228	166674	2

典型城市形态	总交通距离	能源消耗	环境影响	出行距离排序
E 多就业中心分散	22264	191168	187429	1
F 多就业中心紧凑	8860	64648	62879	6

6.5 小结：基于微观模拟能够识别城市系统的一般规律及测试典型规划理论

本部分通过建立基于多智能体的城市形态-交通能耗-环境集成的多智能体模型 FEE-MAS，在虚拟城市中对三者的关系进行定量的探索。通过引入基于复杂自适应系统理论的 MAS 方法，以城市居民和地块分别作为城市社会空间和物理空间的微观样本，通过对居民居住区位选择、就业区位选择乃至交通方式选择的模拟，计算作为微观智能体的居民的通勤交通出行距离和能耗，进而得到所有居民，即城市层面的通勤交通出行和能耗总量。

本部分用于识别城市形态与交通能耗、环境影响关系是通过生成多个城市形态、多次运行 FEE-MAS 智能体模型实现的。本部分参照景观生态学的评价指标，选取 14 个指标用于表征城市形态，如就业地斑块的数目、形状等，借助 FRAGSTAS 对这些指标进行计算。以这 14 个评价城市形态的指标作为解释变量，以每个形态对应的通勤交通能耗和环境影响作为被解释变量，识别城市形态与二者的定量关系。

本部分得到了以下几点关于城市形态与交通能耗和环境影响的一般结论。(1) 对于同样的城市范围，不同的空间布局和密度分布，通勤交通能耗的弹性在 3 倍左右，说明城市形态对通勤交通能耗具有显著影响；(2) 众多的城市形态评价指标中，就业中心斑块的数量是影响最大的变量；(3) 固定范围内的多种城市形态所对应的通勤交通能耗，基本呈正态分布；(4) 14 个城市形态的指标，多数之间存在相关性，最后选取 7 个参数用于全局敏感性分析。本部分所得到的结论，可以辅助支持空间规划方案的制定，并作为对紧凑城市、低碳城市等理念的理论阐述。

目前较为成熟的土地利用与交通模型，一般都能够针对不同的城市形态评估相应的交通出行总量，如 UrbanSim (Waddel, 2002)、Tranus (Putman, 1975)等。本部分开发的 FEE-MAS 模型，是所谓的简化版的土地利用与交通模型，多次运行可以得到不同的城市形态的交通能耗响应。土地利用与交通模型比较综合，而本部分开发的 FEE-MAS 模型相对比较单纯，便于多次反复运行，识别城市系统的基本规律。虽然有很多针对大城市地区的平均出行距离的统计，直接利用这些真实城

市的数据进行统计可以找到规律，但本模型主要可用于城市内（inner-city）的形态与通勤交通动态响应的分析，发现城市间（inter-cities）的相关研究所不能够识别的城市系统的一般规律，比如通勤交通出行总距离的弹性范围、主导的城市形态指标等。

针对真实城市，也可以直接利用 FEE-MAS 这一空间动态模型，直接针对真实城市的多个空间规划方案（即土地使用方案和容积率），进行潜在通勤交通总距离、能源消耗和环境影响的评估，给出从潜在通勤交通角度低碳的规划方案，在规划层面保证低碳的城市布局。真实城市的能耗评估，作为规划方案评估的一个重要方面，是对目前以行业作为终端的能耗评估模型（空间静态）的必要补充。

第四篇 基于微观模拟模型评价规划方案

第7章 北京城市总体规划方案的政策参数识别^⑤

在城市增长分析、模拟和预测中，为了反映未来城市形态发展的不确定性，常采用情景分析（Scenario Analysis, SA）的方法，以拟采用的发展政策作为情景条件，给出多个未来城市形态的可能方案，作为决策参考的依据(Klosterman, 1999; Landis, 1998a, 1998b)。而本部分与以发展政策作为情景条件的城市增长情景分析的思路相反，提出了形态情景的概念和分析方法。形态情景采用城市形态作为情景条件，探讨在以空间规划为发展前提的国家与地区，分析配套的城市空间发展政策的科学性，及不同情景所对应的发展政策的区别。在规划实践中，某种城市形态的政策依托是广为关注的问题，因此探讨形态情景这一问题具有重要的实践意义。针对形态情景，本部分提出了约束性 CA 为理论基础的形态情景的分析方法，分析所需要的发展政策并识别其政策参数。

在中国，区域规划一般以经济为主导，而城市规划的形式多以空间规划为主，有时甚至是在没有社会经济发展规划条件下制定城市规划方案。这样，反过来大家甚至习惯于先有合理的空间规划设想，再来考虑社会和经济需要的可能性，研究可以容纳多少社会经济的开发需求，以及需要采取哪些配套政策来保障方案的实现。另外在规划实践中，城市规划部门所确定的城市规划方案，往往和实际的城市发展有偏差，屡见被突破的现象(Han 和 Dang, 2008; 田莉等, 2008)，而规划部门对此又往往缺乏政策指导，不知道规划的城市形态需要哪些政策来支持以辅助其实现，这些政策又与现行的城市发展政策有何不同，以及从现状到规划期末之间不同阶段的城市空间的可能形态，都是城市规划部门所关心的重要问题。从这些角度来说，城市形态作为模拟的情景条件这种方式也是有实际意义的。

情景（Scenario）被定义为“是对一些有合理性和不确定性的事件在未来一段时间内可能呈现的态势的一种假定” (Pearman, 1988)，而情景分析是“预测这些态势的产生并比较分析可能产生影响的整个过程，其结果包括对发展态势的确认、各态势的特性、发生的可能性描述，并对其发展路径进行分析” (Ratcliffe, 1999)。情景分析方法承认未来的发展是多样化的，有多种可能发展的趋势，其预测结果

^⑤ 本章主要成果已经发表在：龙瀛, 沈振江, 毛其智, 党安荣. 2010. 基于约束性 CA 方法的北京城市形态情景分析. 地理学报, 65(6):643-655.

也将是多维的(Schoemaker, 1995)。鉴于城市空间发展的不确定性, 往往很难对未来的城市形态进行准确的预测, 因此情景分析在城市增长模型中的应用较为普遍, 一般根据不同的政策参数设置给出相应的城市形态。城市增长情景分析或土地使用情景分析 (Janssen 等, 2008)是对远景城市形态的判断, 其在数学上可以表达为 (公式 7-1 中, y 、 X 和 A 都是空间变量, 都应该有 ij 脚标, 用于表示空间位置, 该公式中做了简化, 没有标明):

$$\begin{aligned}
 y &= f(X, A) \\
 X &= \{x_k^t \mid k = 1, 2, 3, \dots, n; t = 1, 2, 3, \dots, p\} \\
 A &= \{a_k^t \mid k = 1, 2, 3, \dots, n; t = 1, 2, 3, \dots, q\} \quad \text{公式 7-1} \\
 T^p &= \{T_t^p \mid t = 1, 2, 3, \dots, p; T_t^p \in [T_s, T_e]\} \\
 T^q &= \{T_t^q \mid t = 1, 2, 3, \dots, q; T_t^q \in [T_s, T_e]\}
 \end{aligned}$$

其中 A 变量的物理意义是城市发展政策及其空间作用范围 (以下简称政策), 在不同的发展阶段, A 变量一般会有变化。 X 变量的物理意义是 A 变量作用的强度 (以下简称政策参数), 即对应政策的执行力度, 其也随时间变化的, 而 y 变量对应相应发展政策作用下的城市形态 (一般 $y_{ij}=1$ 表示 ij 处被开发, 对应城镇建设用地, $y_{ij}=0$ 表示 ij 处未被开发, 对应非城镇建设用地)。 T_s 表示情景分析时的基准, 即现状时间点, T_e 表示预测的, 即未来时间点 (y 对应该时间点), q 表示政策 A 变化的次数, T_q 表示对应的时间点, p 表示政策参数 X 变化的次数, T_p 表示对应的时间点。未来某一时间点的城市形态是基于现状到未来时间点的政策 A 和政策参数 X 综合作用的累计结果。本部分对这一过程进行三条基本假设:

(1) 函数 f 以多指标评价 (Multi-Criteria Evaluation, MCE) 的形式 (即加权平均) 来表示 (无论是不是 CA), 并采用开发概率与阈值相比较确定是否被开发;

(2) X 和 A 保持 T_s (现状执行的政策) 或 T_e (计划未来实施的政策) 时刻的状态不变, 即 p 和 q 都等于 1;

(3) X 是空间静态变量, 即在空间上的分布是均匀的。

“三条基本假设”会造成分析与实际有一定的误差, 但鉴于数据和计算方面的限制, 本部分采取这些假设。公式 7-1 则转变为公式 7-2 的形式 (式中 1 表示城镇建设用地, 0 表示非城镇建设用地):

$$\begin{aligned}
 y &= f(X \cdot A) \\
 X &= \{x_k \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\} \\
 A &= \{a_k \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad \text{公式 7-2} \\
 P &= \sum_1^n x_k * a_k \\
 y &= \begin{cases} 1, P \geq p_{threshold} \\ 0, P < p_{threshold} \end{cases}
 \end{aligned}$$

在已有的城市增长情景分析研究中，一般也沿用这“三条基本假设”。例如，Klosterman(1999)开发的规划支持系统“*What if?*”中， A 对应其中的土壤条件、洪水淹没区、交通条件等发展政策，而 X 对应相应的权重系数；Landis(1994, 1995, 1998a, 1999b)所开发的CUF和CUF-2(California Urban Future Model)中， A 对应每个开发单元(Developing land unit, DLU)的区位、环境条件、土地使用、区划(Zoning)、现状开发密度和交通可达性等，而 X 对应这些政策的权重系数。在常规的城市增长情景分析中， X 和 A 是情景条件，基本的方法是根据不同城市发展偏好所设置的 A 变量和 X 变量，求取相应的城市形态 y ，对于任意 X 和 A ，在数学上都可以有相应的情景 y 对应，即不同的发展政策都可以得到相应的城市形态。需要指出的是，在已有的城市增长情景分析的研究中，多数都是调整政策作用力度 A ，而政策本身 X 保持不变。

而本部分提出的形态情景，遵循“三条基本假设”，可以看作常规的城市增长情景分析的逆过程：

$$\begin{aligned}
 (X, A) &= f^{-1}(y) \\
 X &= \{x_k \mid k = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad \text{公式 7-3} \\
 A &= \{a_k \mid k = 1, 2, 3, \dots, n\}
 \end{aligned}$$

其以城市形态(y)作为情景条件，分析不同的城市形态方案所对应的城市发展政策(X 和 A)的可能性和差别。在数学上，对于作为情景条件的城市形态 y ，则可能有以下三种情况：(1)无解，没有 X 、 A 满足条件，即该形态不满足当前的政策设置；(2)一个解，仅有一组 X 和 A 满足条件，即仅有一组政策能够实现该形态，政策上的偏差会造成城市形态的较大变化；(3)多个解，有多组 X 和 A 满足情景条件 y ，即要实现该城市形态，可以有多个政策和政策参数的组合(龙瀛等, 2010b)。

利用约束性CA的方法，通过不同的期望城市形态 y (即形态情景)和已知政策 A ，可以验证政策参数 X 的可行性，以及不同形态政策参数组间的对比，进而定量地识别政策参数的需求影响。这样对约束性CA的应用是一个创新，结合城市规划，特别是土地利用规划的多个方案进行模拟，可以提高约束性CA在规划实践、

城市增长分析方面的实用性。本部分利用第5章开发的 BUDEM 模型进行形态情景分析,进而给出发展政策建议,这一探索不同于约束性 CA 的传统应用,其从规划实践的需求出发,分析在有具体的政策和方针的条件下,规划师从综合的角度制定的多个规划方案,其形态实现的可能性。

7.1 识别城市形态对应的政策参数的基本方法

有关约束性 CA 的应用研究,并没有将城市形态作为情景条件来设置的先例研究。约束性 CA 可否用于形态情景分析,城市形态能不能作为情景条件?先回顾一下约束性 CA 的状态转换规则的获取方法。早期的约束性 CA 方面的研究,多侧重于研究如何识别并设置 CA 的状态转换规则,然后据此规则进行模拟(Li 和 Yeh, 2002; Liu 等, 2008)。状态转换规则确定的过程中,往往根据某个历史阶段的城市形态 (y),以及已知的约束条件 (A),识别约束条件的参数 (X)。本部分的形态情景分析也是根据 y 和 A 求取 X 的过程,与前者不同点在于,城市形态是未来形态,不是历史数据。

利用约束性 CA 进行形态情景分析,其特点为根据已知的空间形态 y ,求取 CA 状态转换规则。要解决这个问题,其关键是根据形态求参数解。该问题可以参考已有的根据历史数据进行参数率定 (Calibration) 的方法实现 X 的识别,主要思路是将现状空间形态看作某一历史阶段 ($T_s \rightarrow T_e$) 的开始时间点 T_s ,而将期望实现的空间形态看作这一历史阶段的结束时间点 T_e ,即利用现状的形态到期望形态的变化过程。识别方法可以采用 Logistic 回归、人工神经网络、遗传算法、Nested loops 等。其关键是如何根据 CA 的输出识别其状态转换规则。

以什么标准作为未来城市形态能否实现的标准,是需要确定的,这里认为通过形态情景分析所识别的政策参数 X 作为输入条件,模拟生成的形态以与所设置的形态情景的 $Kappa$ 系数小于 80%,则认为无解,即该形态情景没有可依托的政策;反之,如果 $Kappa$ 系数大于等于 80%,则认为这套参数可以反映所设置的形态情景,即有解的情况。一般情况,对于有解的情况,并不是仅有一组 X 满足该条件,而是多个,是一个集合(或者称之为解空间): $\{X | y' = f(X, A), Kappa(y, y') \geq 80\%\}$,其中 y 为所设置的形态情景, y' 为通过识别的政策参数利用约束性 CA 模拟生成的形态。

本部分沿用 Wu(1998)、Li 和 Yeh(2000)等已建立的概念模型,具体如公式 7-4 所示(Long 等, 2009b)。约束性 CA 的邻域采用摩尔邻域 (Moore、3*3 矩形、8 个邻近元胞),离散时间的一次循环对应一个月,元胞的状态受宏观社会经济约束 (A_{mac})、空间约束 (A_{spa})、制度性约束 (A_{ins}) 和邻域约束 (A_{nei}^t) 影响(其中宏

观社会经济约束条件没有对应的实施力度 x) (龙瀛等, 2008; Long 和 Mao, 2010)。发展政策 A 对应四类约束条件的空间范围或数值, 空间性和制度性约束在城市增长的过程中可以假设其与现状或规划的一致, 宏观社会经济约束可以体现为城市形态的总规模 (如城市开发面积、建筑量), 而邻域约束则随着城市增长的过程不断变化, 因此, 发展政策 A 中除了邻域约束外其他都可以假定为已知, 即与现状或未来规划一致。邻域约束对应的政策 a 则在模拟根据城市形态的变化不断作相应的改变。

$$V_{i,j}^{t+1} = f(V_{i,j}^t, A_{mac}, A_{spa}, A_{ms}, A_{nei}^t)$$

$V_{i,j}^t$ 为 t 时刻的 ij 位置的元胞状态

$V_{i,j}^{t+1}$ 为 $t+1$ 时刻的 ij 位置的元胞状态

f 为元胞的状态转换规则

公式 7-4

本部分的约束性 CA 的状态转换规则如公式 7-5 所示, 采用 MCE 作为 CA 状态转换规则的形式。式中 $LandAmount$ 为元胞总增长数目, $stepNum$ 为每次循环 (Iteration) 中被新开发的元胞数目, s_{ij}^t 为土地利用适宜性, p_g^t 为变换后的全局概率, p_{max}^t 为每次循环中全局概率最大值, α 为扩散系数 (1-10), p^t 为最终概率, p_{max}^t 为每次循环不同子循环内所有元胞中最终概率的最大值, 其数值在子循环内不断更新。 x_0 为常数项, a_n 表示邻域政策, x_n 表示邻域政策参数, a_k 表示除邻域之外的政策, x_k 表示除邻域之外的政策参数, s_0 表示各个步骤中适宜性 s_{ij}^t 保持不变的部分, 邻域开发强度保持不断变化。

$$\begin{aligned}
 &1. LandAmount = \sum_t stepNum^t \\
 &2. s_{ij}^t = x_0 + \sum_{k=1}^{n-1} x_k * a_k + x_n * a_n^t = s_0 + x_n * a_n^t \\
 &3. p_g^t = \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}} \\
 &4. p^t = \exp \left[\alpha \left(\frac{p_g^t}{p_{g \max}^t} - 1 \right) \right] \\
 &5. \text{for } inStepID = 1 \text{ to } stepNum \\
 &\quad \text{if } p_{ij}^t = p_{\max}^t \text{ then } V_{ij}^{t+1} = 1 \\
 &\quad p_{ij}^t = p_{ij}^t - p_{\max}^t \\
 &\quad p_{\max}^t \text{ update} \\
 &\text{next } inStepID
 \end{aligned}$$

公式 7-5

下面探讨基于上面建立的理论模型，如何求取模型参数，进而实现形态情景分析。需要识别的模型参数主要是政策参数 $stepNum$ 和 X 。从参数识别的方法和流程上，依次是 $stepNum$ 、 x_k 和 x_n 的识别，其中 $stepNum$ 采用简单的增速计算方法， x_k 采用 *Logistic* 回归方法，而 x_n 采用 *MonoLoop* 方法，下面对其具体进行说明。

对于 $stepNum$ 参数（对应经济发展所需要的土地总量），假定从现状到形态实现这一阶段的城市增长保持匀速，即各个阶段的该数值相同，其计算方法如公式 7-6 所示。

$$stepNum = \frac{C_{T_e} - C_{T_s}}{(T_e - T_s) / t_0}$$

C_{T_e} : 期望空间形态的城市建设元胞数量
 C_{T_s} : 现状空间形态的城市建设元胞数量
 T_e : 形态实现时刻
 T_s : 现状时刻
 t_0 : 每个循环对应的真实时间

公式 7-6

对于政策实施力度参数 X 的识别，对 Wu(2002)、Clark 和 Gaydos(1998)二者的方法进行综合并作一定改进，结合二者的优点，利用历史数据，将除邻域之外的政策参数 x_k 根据 *Logistic* 回归的方式求解，在此基础上利用单一参数循环方法 (*MonoLoop*)，以 *Kappa* 指标最大为原则识别邻域的政策参数 x_n 。最后识别的模型参数 x_k 和 x_n （记为 X^* ）可以作为实现各个形态情景的发展政策实施力度。将模拟形态和所设置的形态情景进行点对点对比，如果 *Kappa* 大于 80%，即为有解的情形，则 X^* 对应的是通过已有的政策 A 能够得到的具有最高形态匹配度的政策参数，此时还有其他政策参数同样能够产生与形态情景的 *Kappa* 大于等于 80%的模

拟形态。本部分仅考虑 X^* ，其他满足条件的参数集合将在后续研究中开展。^⑩

通过政策参数 X 的正负，可以判断该政策应该鼓励还是避免，通过各个变量之间参数的横向对比，可以看出不同政策应该给予的倾向。同时通过和其他历史阶段的模型参数对比，鉴于对历史阶段的政策参数的了解，可以更为形象地给出要采用的发展政策与其他历史阶段对应政策的差异。对于 X 可以利用公式 7-7 计算政策的实施力度变化情况 (dt)，进而给出相同的政策在历史和未来的对比效果 (即政策倾向的变化)。

$$dt_k = \frac{x_k}{x_k^*}$$

公式 7-7

dt_k : 政策 k 的实施力度变化

x_k : 政策 k 的识别的权重系数

x_k^* : 政策 k 的历史阶段的权重系数

下面基于所建立的约束性 CA 实现形态情景分析的实例，以北京 2020 年城市总体规划为例，分析根据所设置的多个形态情景和确定的政策，求取政策参数在模拟上是否有效，对实现其进行横向对比给出政策释义。

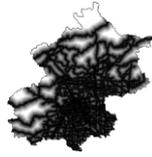
7.2 北京市域的基础数据

约束性 CA 模型的政策变量 (A) 及相应的数据如表 7-1 所示。宏观约束条件中，增长速度参数 $stepNum$ 作为一个控制指标，反映为土地开发的总量，对应社会经济发展规划的目标；空间约束条件主要反映了城镇体系、防洪、交通发展等方面的规划政策 (或专项规划)；制度性约束条件主要反映了生态保护、灾害防治、耕地保护等方面的规划政策 (或专项规划)；而邻域约束条件则反映了对开发规模的控制政策。

为了便于进行政策参数 X 的识别和横向、纵向的对比，我们对政策 A 进行了标准化处理，将其范围都统一为 0-1 之间，数值越大表示假设被开发的概率越大，反之则概率越小。对于空间类约束条件，其原始数据为各类政策的空间分布的 GIS 图层，采用 ESRI ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块的 “Distance/Straight Line” 命令，可以获取相应的距离数据 $dist_k$ ，通过 $a_k = e^{-\beta * dist_k}$ 可以计算吸引力 a_k ，其中 $\beta=0.0001$ 。对于制度性约束条件，禁止建设区中数值为 0 表示禁止一切城乡建设，反之为 1；农业用地适宜性表示对耕作的适宜条件，数值越大表示适宜性越低。

^⑩ 如果 Logistic 回归的 Kappa 系数低于 50%，则没有必要开展 MonoLoop 过程，根据经验，此时在 MonoLoop 过程后，Kappa 系数仍然不会超过 80%。

表 7-1 约束性 CA 模型变量及相应数据一览表^①

类型	变量	政策	数值	数据	数据来源
宏观 约束 条件	$stepNum$	增长速度	>0		土地利用数据
	a_1	天安门 (城镇体系)	0-1		基础数据 空间分析
	a_2	新城 (城镇体系)	0-1		基础数据 空间分析
空间 约束 条件	a_3	镇 (城镇体系)	0-1		基础数据 空间分析
	a_4	河流 (防洪)	0-1		基础数据 空间分析
	a_5	2006 年道路 (交通发展)	0-1		2006-11-01 TM 影像解译
制度 性约 束条 件	a_6	禁止建设区 (环境保护、 灾害防治等)	0、1		北京市规划 委员会, 2007 ^⑧
	a_7	针对农业用地适 宜性的土地等级 (耕地保护)	0-1		北京市计划委 员会国土环保 处, 1988
邻域 约束 条件	a_n^t	邻域开发强度	0-1		土地利用数据 及模型生成

① 图中黑色表示 1，白色表示 0（边界外除外）。

⑧ 禁止建设区的划定方法参见文献(龙瀛等, 2006)。

7.3 北京市的实证分析结果

7.3.1 形态情景的设置：四个典型规划方案

自1958年行政区划调整形成目前的市域范围以来，北京市域范围内开展的总体规划主要有五次，1958年、1973年、1982年、1992年和2004年(北京市规划委员会等, 2006)，其中2004年版总体规划的规划目标为2020年，确定了1800万的人口发展规模(对应建设用地区域为2300 km²)，以及“两轴—两带—多中心”的城市空间结构，进而形成中心城-新城-镇三级的城镇结构。在该规划的制定中，制定了四个规划方案(图7-1)，各个规划方案的总用地规模基本一致(略有少量偏差，具体见表7-2)，只是城市布局有较大差别(反映了规划师或领导的不同偏好)，但当时并没有对这些方案政策实施的可能性进行分析就进行了方案比选。本部分拟对这些形态情景进行分析，分析其政策参数的可行性(上文的各个政策A的空间分布也是在本次总规编制时的相关政策或专项规划内容)，进而对城市形态与相关政策、专项规划的协调性进行识别。

各个形态情景的基本情况如下：

(1) 情景 A (y_A)：规划情景，即为最后选取的、被国务院所批复的城市形态(北京市规划委员会等, 2006)，其主要特点是控制中心城的继续蔓延，大力发展新城；

(2) 情景 B (y_B)：蔓延情景，继续在中心城周边开发，新城的开发规模较小，即为所谓“摊大饼”的城市形态；

(3) 情景 C (y_C)：葡萄串情景，大力发展小城镇及沿交通走廊的开发，新城和中心城基本保持原有规模，进而形成指状、葡萄串状的城市形态；

(4) 情景 D (y_D)：生态保护区情景，在开发的过程中尽量避免对禁建区的占用和对优等农田的蚕食，进而形成所谓的可持续城市形态，从布局上看，鉴于考虑了较为零散的禁止建设区，这种形态较为分散。

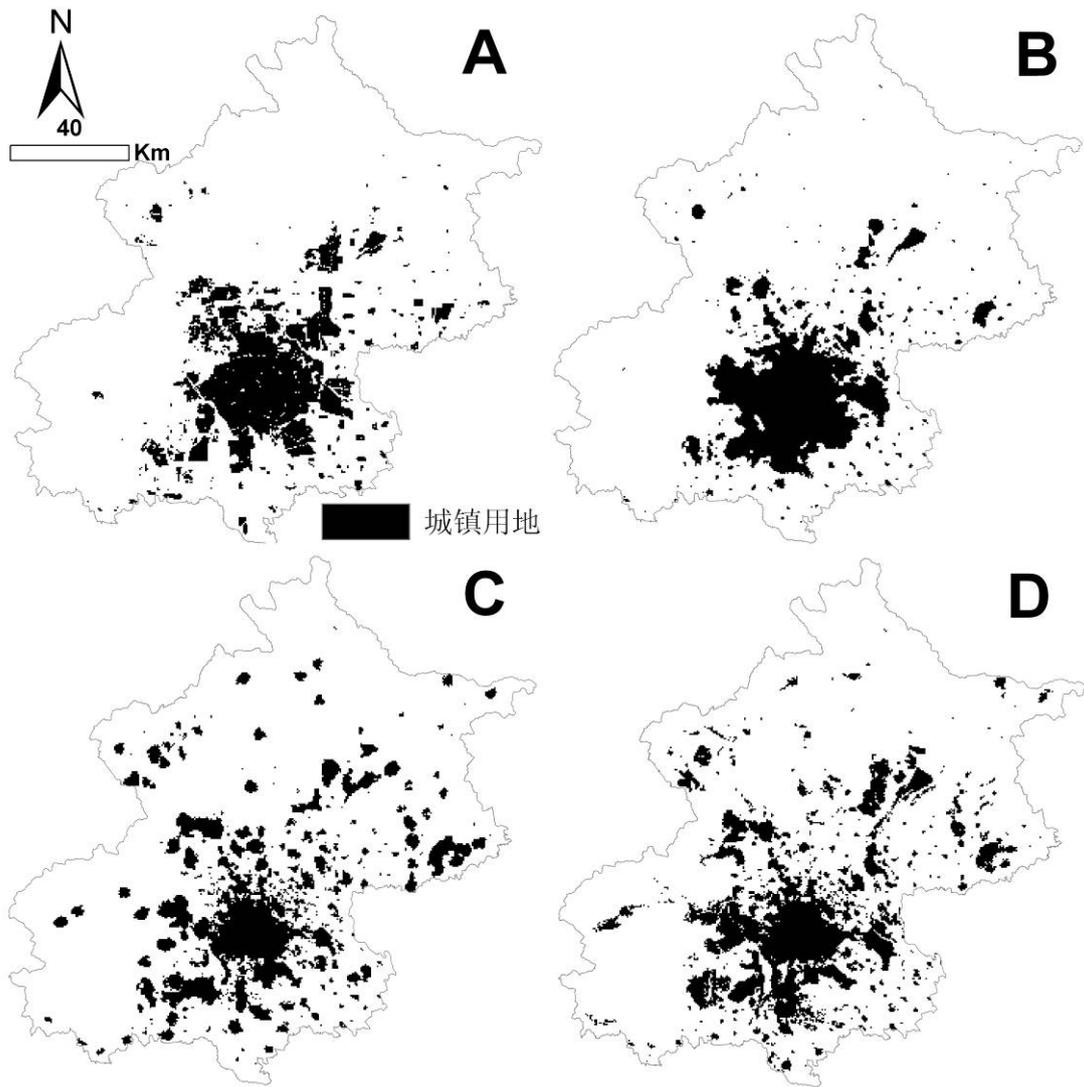


图 7-1 北京市的形态情景设置图

7.3.2 政策参数的识别结果

形态情景分析的工作主要基于第5章的BUDEM模型实现,精度即元胞大小为 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ (研究区域共65628个元胞)。根据2006年现状空间形态(y_{2006}), $C_T=5011$ 。以情景A为例,空间形态中的城镇建设用地元胞为 $C_T=9254$ 个。约束性CA的循环次数为 $(2020-2006)\times 12=168$,则每次循环的新增元胞数量 $stepNum=(9254-5011)/168=25.3$,最后取值为25。其他情景的 $stepNum$ 识别方法相同。

对于 X 的识别,采用 $Logistic$ 回归和 $MonoLoop$ 集成的方法实现。 $Logistic$ 回归的因变量是否发生由非城镇建设用地向城镇建设用地的转变(发生转变为1,不发生转变为0),自变量为表7-1中的除邻域之外政策 A 。将各情景的形态与现状

形态作代数减法运算，其结果作为 *Logistic* 回归的因变量，回归结果如表 7-2 所示，其中情景 B、C 和 D 的 *Kappa* 系数（对应表 7-2 中的 *Kappa*_{回归}）均超过 80%，自变量的显著性均为 0.001，回归结果可以接受，说明已有的政策可以解释所设定的形态情景，而情景 A 的 *Kappa* 系数仅为 42.9%，说明除邻域外的已有政策不能够解释所设定的形态情景。

通过 *Logistic* 回归方法确定 x_i ($i=0\sim 7$) 之后，保持这些政策参数不变，采用 *MonoLoop* 方法识别 a_n 的系数 x_n ，进而实现各个情景的 x_n 参数的识别。参数识别最终结果参见表 7-2。

表 7-2 形态情景分析结果（政策参数）^⑩

变量	情景 A	情景 B	情景 C	情景 D	历史
总规模	9254	9270	9895	10679	1892-5011
stepNum	25	25	29	34	9
x_0	-8.700	-30.696	-63.599	-55.624	-12.263
x_1	15.268	54.558	15.106	20.849	11.782
x_2	3.575	10.294	10.046	9.701	2.490
x_3	-0.717	5.272	31.639	7.807	-1.872
x_4	4.105	8.765	24.348	11.622	7.574
x_5	1.368	6.027	7.627	8.113	0.917
x_6	1.193	3.672	4.078	23.000	1.535
x_7	-2.396	5.066	6.094	12.003	-1.179
x_n	15	17	9	7	20
<i>Kappa</i> _{回归}	42.9	76.0	79.7	71.3	41.9
<i>Kappa</i> _{最终}	69.4	91.8	85.0	85.8	67.5
是否通过有效性检验	否	是	是	是	否

^⑩ 回归 *Kappa* 是指不考虑邻域政策，根据 *Logistic* 回归结果计算的匹配系数，最终 *Kappa* 考虑了邻域政策，为基于识别的全部参数利用约束性 CA 模拟结果计算得到的匹配系数。

7.3.3 形态情景的有效性检验

MonoLoop 的过程其实就是对所设置的形态情景进行检验的过程（采用 *Kappa* 一致性检验的方法），*Kappa*_{最终} 低于 80% 的形态情景，不能够通过形态情景的有效性检验，而高于 80% 的形态情景，通过了有效性检验，被证明有政策参数能够满足所设置的形态情景以较高的精度实现。为了进行说明，将表 7-2 中所识别的各形态情景的政策参数（*stepNum*、 x_{0-7} 和 x_n ）作为约束性 CA 的输入条件，经过 168 个循环，模型停止运行，得到相应的模拟城市形态 y' （第 1~168 次循环的模拟结果对应未来不同阶段的可能的空间形态^②），并将其与所设置的形态情景 y 进行对比，如图 7-2 所示。根据 *Kappa* 检验的结果以及图 7-2 的对比结果，情景 B、C 和 D 的政策参数对应的 y' 能够保证与所设置的形态情景 y 具有较高的点对点匹配精度，而情景 A 的政策参数对应的 y' ，则与 y_A 的点对点匹配精度较低，不能用于 y_A 的模拟，此时需要调整 y_A 或政策 A 的设置，以实现政策参数与形态情景的一致性。

7.3.4 比较形态情景的政策参数

根据参数识别的结果，可以对要实现通过有效性检验的各个形态情景（B、C 和 D，不包括 A）的政策需求进行解释，主要可以体现在三个方面：

（一）情景内各参数横向对比：以情景 B 为例，根据 *stepNum* 参数，2006-2020 年每年增长的城镇建设用地规模为 $25 \times 12 / 4 = 75$ 平方公里，如果按人均城镇建设用地 100 平方米指标计算，则每年预期的人口增长规模为 75 万人。对其他政策参数可进行横向对比，系数越大表示该政策的执行力度需要越大，以实现所设置的形态情景，如该情景应该大力促进中心城开发、新城开发和滨河开发（相比其他政策）。

（二）情景间各参数横向对比：针对各个政策参数进行情景间的对比分析，可以更为形象地了解要实现各个形态情景所需要采取的政策间的差别。例如情景 B 的参数 x_1 高于情景 C，说明要实现情景 B，相比实现情景 C，沿中心城的开发力度应该更高，即更应该大力促进中心城的开发；而情景 D 的参数 x_6 明显高于情景 C，说明要实现情景 D，相比实现情景 C，对禁止建设区的保护力度应该更高。

（三）与历史阶段进行对比：以 1976-2006 年这一历史阶段为例，利用约束性

^② 对于情景 B、C 和 D 的 y 和 y' ，在基于 *Kappa* 验证的基础上，还采用空间格局验证（Moran I、Separate clusters、Edge cells）、空间结构验证（根据到天安门的直线距离划分若干圈层）等方法进行验证，匹配程度同样较高。

CA 采用类似的政策参数识别方法²¹，可以获得 1976-2006 年的模型参数（表 7-2 最后一列）。相比这一历史阶段的城市增长策略，各个形态情景在规划期（2006-2020）内的城市增长速度为 1976-2006 年城市增长速度的 2-3 倍，这也就实现所设置的各个形态情景，未来需要从宏观社会经济的角度，促进城市的经济发展，提高人口的增长速度，以保证实现规划的城镇建设用地规模。同时，相比历史阶段，各情景邻域扩展趋势都需要控制，尤其是情景 C 和 D；情景 A 应该强化中心城扩张、道路引导开发政策；情景 B、C 和 D 除了邻域开发政策弱化外，其余政策的实施力度都应该得以强化，如需强化禁止建设区的保护力度、小城镇的开发力度等。

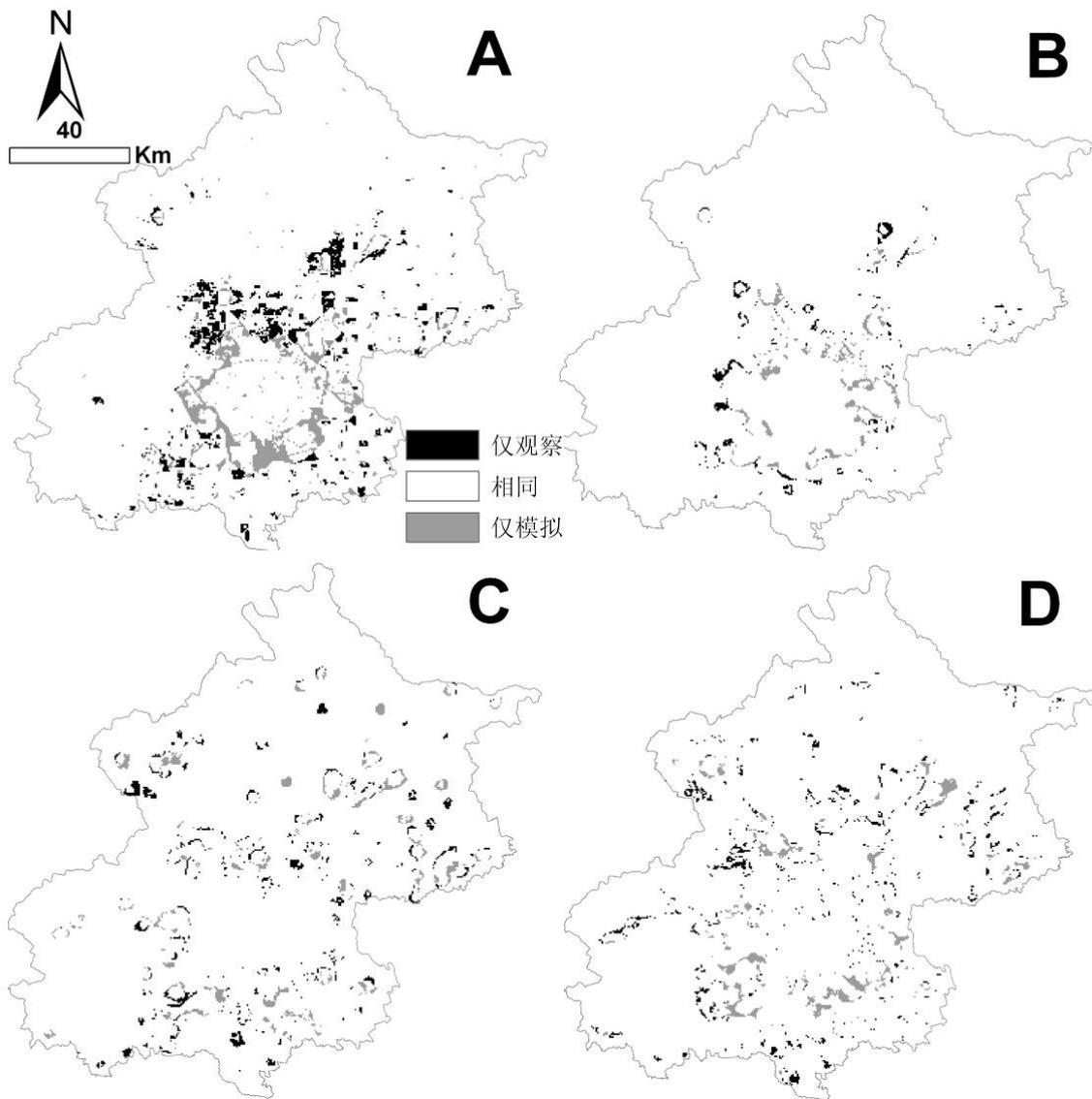


图 7-2 模拟结果与形态情景对比图

21 因为时间范围不同，历史时期的政策与各形态情景的政策 A 不同。

7.4 小结：利用微观模拟能够满足空间规划的核心需求

在城市增长模拟领域，传统的研究或应用都是利用发展政策进行城市形态的情景分析，作为决策部门进行城市发展决策支持的参考，这种应用较为普遍并且已经较为成熟。但在很多情况下，尤其是在城市规划领域，往往是先有根据规划师所制定的城市形态，其反映了规划师的想法，但是部分所制定的形态往往根本不可能实现，与配套制定的或已有的发展政策不协调，这种情况下或者需要调整所制定的形态，或者改变发展政策，以实现二者的匹配。

规划实践中，规划空间形态是由规划师制定，规划师的想法因人而异，有主观的因素，很难在 CA 中有所体现。规划师所制定的规划空间形态可以反映 CA 无法反映的因素，如经济的发展、产业结构的调整、领导等人的规划意图等。本部分是对以城市形态作为情景分析条件的初步尝试，能够探讨所设置的城市形态情景在目前政策框架下的可行性。这一探索从规划实践的要求出发，分析在有具体的规划政策和方针的条件下，规划师从综合的角度制定的规划空间形态，从地理条件、发展需要来看，其形态实现的可能性，是 CA 应用的突破，对于促进解决规划行业所面临的常见、棘手的问题具有一定的作用，并可以用于评估规划形态与各个专项规划或政策的协调程度。

第8章 城市规划空间控制成效评估

城市规划是政府引导和控制城市发展的一个重要工具。为了保障规划的实施效果,规划实施评价往往被引入到城市规划的制度之中,成为规划的一个不可或缺的环节。在英国的区域规划指南以及美国的一些州的规划文本中,都规定了规划实施评价的相关内容(吕晓蓓和伍炜,2006)。在我国,规划实施评价工作也在规划制度化和法制化的进程中不断得到强化。2008年1月1日开始实施的《中华人民共和国城乡规划法》第四十六条规定:“省域城镇体系规划、城市总体规划、镇总体规划的组织编制机关,应当组织有关部门和专家定期对规划实施情况进行评估,并采取论证会、听证会或者其他方式征求公众意见……经评估确需修改规划的,组织编制机关可按照规定的权限和程序修改省域城镇体系规划、城市总体规划、镇总体规划”。可见,规划实施评价已经被法律确立为规划修改的一个基本依据,因而成为我国各级政府所倡导的规划工作的重点。

根据 Talen(1996a)对规划评价的综述研究,规划评价包括规划实施预评价(evaluation prior to plan implementation)、规划实践评估(evaluation of planning practice)、政策实施分析(policy implementation analysis)以及规划实施评价(evaluation of the implementation of plans),本章属于其中最后一点(规划实施评价)的范畴。在我国,规划实施评价也可以从规划内容或不同专业构成进行分类,如空间控制、交通规划、市政基础设施规划等部分的实施评价。本章主要从侧重于空间控制进行探讨。规划实施评价方面的研究虽然历经很久,然而开展并不普遍,其中根本性的原因主要在于:(1)规划的实施受到诸多因素的影响,很难将规划因素与其他因素明确地加以分离;(2)规划实施的效果较为广泛,很难对复杂的规划效果进行综合评价;(3)规划评价的价值观具有多样性,很难找出统一的可供评价的价值观(孙施文,2003)。相应的,规划实施评价其实包括了两部分的内容:(1)实证方面,规划实施究竟产生了什么样的影响;(2)规范方面,基于特定的价值观,这一影响是好是坏。我们会在今后的研究中对此进行深入分析。

尽管如此,应用一些特定的方法,仍然可以在一定程度上反映规划实施的成效。根据 Alexander 和 Faludi(1989)所提出的 PPIP (policy- plan/programme-implementation- process) 规划评估模型,规划的实施可以通过一致性(conformity)、合理的操作过程(rational process)、关于最优的事前分析(optimality ex ante)、关于最优的事后评价(optimality ex post),以及有用性(utilization) 等五个准则来进行评价。

其中,一致性准则是目前国际上应用最普遍的一项指标(Talen, 1996b, 1997; Laurian 等, 2004; Brody 等, 2006)。一致性准则认为,如果忽略或排除对不确定因素的考虑,规划实施的最终结果与最初规划设计方案的一致性越高,则方案的实施就越成功。这种以规划的一致性(或契合度)为评价标准的方法,确实可以在很大程度上反映传统的蓝图式的规划的实施成效。事实上,我国现有的很多评价方式也都沿用了这一思路。如田莉等(2008)、Han 等(2009)分别对广州、北京的城市规划方案的实施评价结果显示,在中国大都市圈的中心城市中,相当大一部分的城市扩展都超出了规划的总量或形态控制范畴。这反映了中国城市中规划的总量和形态常常被突破的普遍情况。

在空间控制评价方面,一致性评价的局限在于其只描述了规划实施效果的宏观情况,并没有涉及对包括城市规划在内的空间扩展影响因素(驱动力)的分析,也不涉及对城市规划空间控制成效的时间尺度和空间尺度的对比分析(即微观细节)。因此,本章将沿用“第5章 北京城市增长模拟(BUDEM模型)”的思路,提出了基于 Logistic 回归识别城市规划在城市扩展中的作用,并进行时间维度和空间维度的对比,进而给出更为详细、客观的规划实施评价结果的微观分析方法。下文分别就两个方面展开已有文献分析评述工作,一为城市规划在已有研究中的引入情况,二为如何识别驱动力的空间维度和时间维度的异质性。

侧重于城市经济学的城市扩展研究和侧重于地理学的土地利用覆盖变化(Land-Use change and Cover Change, LUCC)研究都承认作为制度性因素的城市规划是影响城市扩展过程的驱动力之一。在城市经济学领域,大部分实证研究都侧重于采用回归的方法,应用跨城市(inter-city)的数据分析人口、收入、通勤成本和农业地租等市场因素对城市面积的影响(Brueckner 和 Fansler, 1983; McGrath, 2005)。或许是由于数据的限制,只有少数研究分析了制度性因素在城市扩展中的作用(Ke 等, 2006)。在 LUCC 研究中,已经有了较为成熟的方法来分析土地使用变化的驱动力或各种因素对土地利用变化影响的定量识别,如马尔科夫链(markov-chain analysis)(Muller 和 Middleton, 1994)、人工神经网络(artificial neural networks, ANN)(Pajanowski 等, 2002)、Logistic 回归(Wu, 2002; Xie 等, 2005)、元胞自动机(Yeh 和 Li, 2001; 龙瀛等, 2009; 龙瀛等, 2010b)和多主体系统(Brown 等, 2005)等。需要强调的是,在元胞自动机和多主体系统的研究中,多将邻域影响作为城市扩展的驱动力之一。

在城市扩展的相关研究中,对驱动力的空间异质性(spatial heterogeneity)和时间异质性(temporal heterogeneity)都有了探索性研究。空间异质性方面,如 CA 城市模型中考虑状态转换规则的空间分异,即模拟范围内不同子区域的元胞状态

转换规则的参数设置存在差异(Li 等, 2008), 在土地利用变化模型中考虑驱动力的空间异质性(Liu 等, 2005)。关于空间异质性, 城市经济学中对分市场(submarkets)的研究与其比较类似。这类研究侧重于验证住房分市场效应(housing submarkets)的存在(即在研究区域的不同子区域, 各种市场力的作用存在显著差异)(Watkins, 2001; Jones 等, 2004; Stevenson, 2004; Bourassa, 2007), 以及识别分市场的边界(Goodman 和 Thibodeau, 1998)。时间异质性方面的研究则更为成熟, 最为典型的方式是根据多个时间点的遥感影像, 识别各个历史时间点的城市形态, 进而分析各个时间阶段的城市扩展驱动力。然而在规划实施评价方面, 少有研究考虑规划实施效果的空间异质性和时间异质性。城市扩展方面已有的研究方法可以用于时空动态(即时间异质性和空间异质性)的规划实施评价, 可以给出相应的政策含义, 如不同区域规划实施情况的差异, 以及不同阶段城市规划所起到的作用差异。

本部分将利用 BUDEM 模型的历史参数识别功能, 利用 Logistic 方法对城市扩展过程进行分析, 识别城市规划因素在其中的影响, 并将针对不同版本的总体规划实施周期进行时间动态评价, 以及将研究区域分为多个子区域, 进行空间动态评价。我们将以北京为例, 对 1949 年建国以来北京的历次总体规划进行实施评估, 探讨其在城市扩展中所起到的作用。

8.1 基于 BUDEM 模型评价规划空间控制成效的可能性

本章将利用 BUDEM 模型评价城市规划空间控制成效。具体的, 规划实施评价主要用于评估城市规划对城市各个发展指标(本部分将其定义为城市的状态)的影响, 其中每项指标对应于城市状态。总体上供评价的状态除了常规的是否为城市建设用地外, 还可以是土地使用类型、容积率、建筑密度、城市规模等。城市规划对城市状态的改变具有一定的作用, 但城市状态的改变同样还受到市场因素和其他制度性因素的影响。城市状态的变化与影响因素之间的关系如公式 8-1 所示, 其中 Y 为城市状态的变化程度, X 为影响因素, A 为影响因素的作用程度, F 为影响函数。在规划评价中, Y 为可以观测的变量, X 为影响因素的空间分布(如制度性因素的作用范围、可达性因素的空间分布等), 一般也可以观测, 因此可以求取各个因素的影响程度 A 。

$$Y = F(A, X) \quad \text{公式 8-1}$$

假设需要评价的城市状态 S 有 n 个, 相应的城市状态的变化为 y , 影响因素 X 有 m 个, 其中影响因素为 x , 城市规划因素为 x_p , 每项影响因素的影响程度为 a , 城市规划因素的影响程度为 a_p (该变量为规划实施评价中需要关注的变量)。则公

式 8-1 可以更具具体地表示为以下形式:

$$y_n = f_n(a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_m, x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_m) \quad \text{公式 8-2}$$

如果考虑空间维度和时间维度, 则这一关系可以用公式 8-3 表示。其中, k 为区域的 ID, t 为时间阶段。区域 k 在时间段 t (从 t_s 到 t_e) 起始时刻的城市状态 $S_k^{t_s}$, 结束时刻的状态 $S_k^{t_e}$, 则区域 k 在时间段 t 的城市状态变化 $Y_k^t = S_k^{t_e} - S_k^{t_s}$ 。

$$Y_k^t = F(A_k^t, X_k^t) \quad \text{公式 8-3}$$

利用公式 8-3 可以识别不同时间阶段、不同区域的城市规划因素的影响程度 $a_{p,k}^t$ 。城市规划变量的影响程度可以进行时间维度 ($r_t = \frac{a_{p,k}^{t_2}}{a_{p,k}^{t_1}}$)、空间维度

($r_s = \frac{a_{p,k_2}^t}{a_{p,k_1}^t}$) 和因素维度 ($r_f = \frac{a_{m,k}^t}{a_{p,k}^t}$) 三个维度的对比。对比规划变量的系数与

其他因素的系数, 可以横向对比城市规划与其他因素在城市发展中的作用, 同时纵向对比各个时间阶段或空间的规划的系数, 可以进行时间维度和空间维度的对比, 进而有更为直接的规划效用的认识。

要识别各个影响因素的影响程度, 进而评价规划因素对城市状态变化的影响, 可以采用统计回归的方法。其中因变量是 Y , 自变量是 X 。对于因变量是二项分类常量的情况, 采用 Logistic 回归分析方法获取 A 的方法如公式 8-4 所示 (Wu, 2002), 其中 a_0 为常数项, a_k 为回归系数, x_k 为空间变量, P 为转变概率。回归系数 a 反映了变量的敏感性, 即变量变化 1 个单位对整体概率的影响, 其绝对值越大, 则其对应变量越敏感。

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad \text{公式 8-4}$$

$$z = a_0 + \sum_k a_k * x_k$$

本部分所提出的方法适用于城市总体规划、控制性详细规划的评价, 下面以北京城市总体规划为例进行实证分析, 评价的状态为是否为城市建设用地 (二元变量), 相应地将采用 Logistic 回归的方法。

8.2 北京的历次总规方案和对应的空间政策数据

本部分的研究范围为北京市域。北京近年来经历了快速的社会经济发展，城镇建设用地的扩张速度也较快，并将在未来继续保持快速增长，城市规划对土地的空间控制也伴随着较大的挑战。以城市建设用地的空间分布作为待评价的城市状态，考虑到研究范围为区域尺度而非中心城地区对应的城市尺度，参考城市经济学和 Hedonic 模型的理论框架(Alonso, 1964; Butler, 1982)，选择四类影响这一城市发展状态的要素，即区位变量，对应市场驱动力，如各级城镇中心、河流、道路等的吸引力；邻域变量，即邻域内的城镇开发强度，一般用邻域内的城镇建设用地所占邻域面积的比例表征；制度变量，对应政府主导的驱动力，主要包括禁止建设区、农业用地适宜性和规划城镇建设用地三项；自身变量，是指是否为农村建设用地。通过相关性分析，剔除了相关性较大的变量。空间数据的格式统一为栅格数据（GRID），大小为 100m*100m，共 1640496 个网格，空间参考相同。

数据的描述如表 8-1 所示（最小值、最大值、均值和标准差为利用 SPSS 统计的结果），各个历史阶段的城市形态数据的空间分布如图 8-1 所示，主要空间变量的空间分布如图 8-2 所示。因为要进行时间动态的评价，所以对于道路、城市规划、邻域和城市形态等变量，考虑了多个时间点的数据。鉴于没有 1947 年和 2004 年的道路数据，分别以 1958 版规划道路和 2001 年的现状数据替代；同时因为数据的限制，1958 年的城市形态数据，以 1947 年的数据替代。

表 8-1 城市规划空间控制成效评估涉及的变量一览表

类别	名称	最小值	最大值	均值	标准差	说明	数据来源	
区位 变量	<i>l_tam</i>	0.000	1	0.037	0.091	天安门（城市主中心）吸引力	(北京市规划委员会等, 2006)	
	<i>l_cty</i>	0.000	1	0.214	0.198	新城中心吸引力 ²²		
	<i>l_twn</i>	0.026	1	0.531	0.198	镇中心吸引力		
	<i>l_rvr</i>	0.238	1	0.789	0.162	河流吸引力		
	<i>l_bdtwn</i>	0.450	1	0.884	0.097	镇行政边界的吸引力 ²³		
	<i>l_r</i>	<i>l_r01</i>	0.091	1	0.841	0.163	2001 年道路吸引力	解译自同 <i>fm</i> 的影像
	<i>l_r91</i>	0.050	1	0.819	0.187	1991 年道路吸引力		
<i>l_r81</i>	0.050	1	0.797	0.202	1981 年道路吸引力			

22 这里选取规模最大的城镇建设用地斑块的几何中心作为新城和镇的中心。

23 该变量主要用于评估行政管理界线是否对城市开发具有负面影响，即行政区的分界线处的开发概率更低。

类别	名称	最小值	最大值	均值	标准差	说明	数据来源
制度 变量	<i>l_r76</i>	0.050	1	0.785	0.203	1976年道路吸引力	(北京市规划委员会等, 2006) (龙瀛等, 2006) 北京市计划委员会国土环保处(1988)
	<i>l_r58p</i>	0.077	1	0.797	0.184	1958版规划道路	
	<i>g_conf</i>	0	1	0.593	0.491	禁止建设区	
	<i>g_agri</i>	0	1	0.418	0.237	农业用地适宜性	
	<i>g_pln04</i>	0	1	0.146	0.353	是否为规划城镇建设用地	
	<i>g_pln92</i>	0	1	0.066	0.248		
	<i>g_pln82</i>	0	1	0.028	0.164		
<i>g_pln73</i>	0	1	0.050	0.218			
邻域 变量	<i>g_pln58</i>	0	1	0.043	0.203	邻域内的开发强度	同 <i>fm</i> 变量
	<i>nei04</i>	0	1	0.077	0.231		
	<i>nei91</i>	0	1	0.049	0.175		
	<i>nei81</i>	0	1	0.038	0.160		
	<i>nei76</i>	0	1	0.030	0.144		
自身 变量	<i>nei47</i>	0	1	0.003	0.041	是否为农村建设用地 ²⁴	同 <i>fm76</i> 变量
	<i>s_rrl</i>	0	1	0.029	0.168		
城市 形态	<i>fm08</i>	0	1	0.082	0.274	2008年城镇建设用地	TM 2008-06-12
	<i>fm04</i>	0	1	0.077	0.266	2004年城镇建设用地	TM 2004-04-01
	<i>fm91</i>	0	1	0.049	0.216	1991年城镇建设用地	TM 1991-05-16
	<i>fm81</i>	0	1	0.038	0.192	1981年城镇建设用地	MSS 1981-06-23 MSS 1981-04-21
	<i>fm76</i>	0	1	0.030	0.170	1976年城镇建设用地	MSS 1976-06-05 MSS 1976-09-20
	<i>fm47</i>	0	1	0.003	0.057	1947年城镇建设用地, 此图不能覆盖北京全市域 ²⁵	(北平市政府工程局, 2007)

24 该变量用于评估农村建设用地是否具有更大的概率向城镇建设用地转变, 通过多个时间段的对比, 分析这一转变在转型经济背景下的动态变化。

25 对于没有数据的区域, 考虑到1947年中心城区之外的城镇建设用地数量较少, 因此假设均为非城镇建设用地。

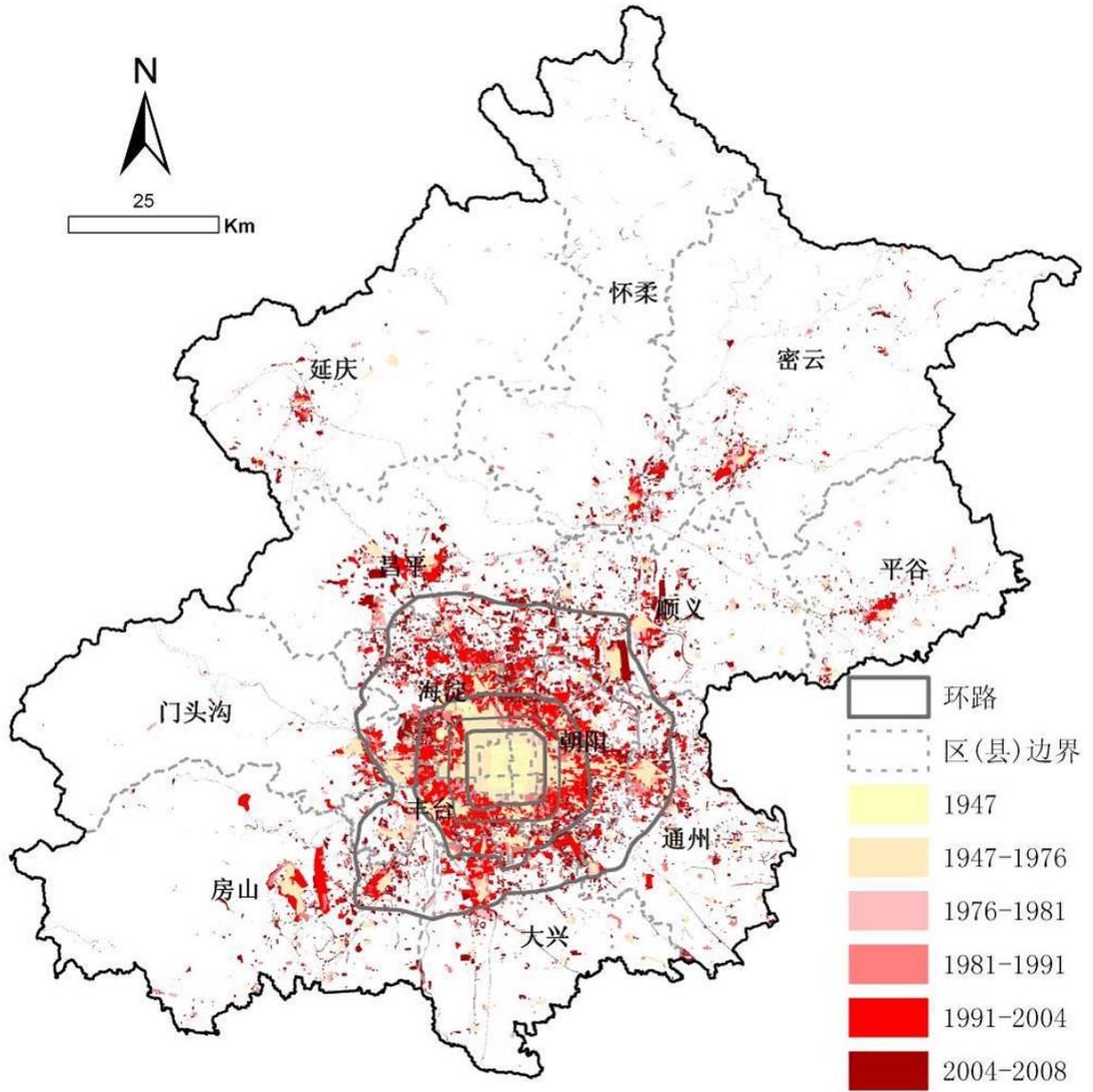
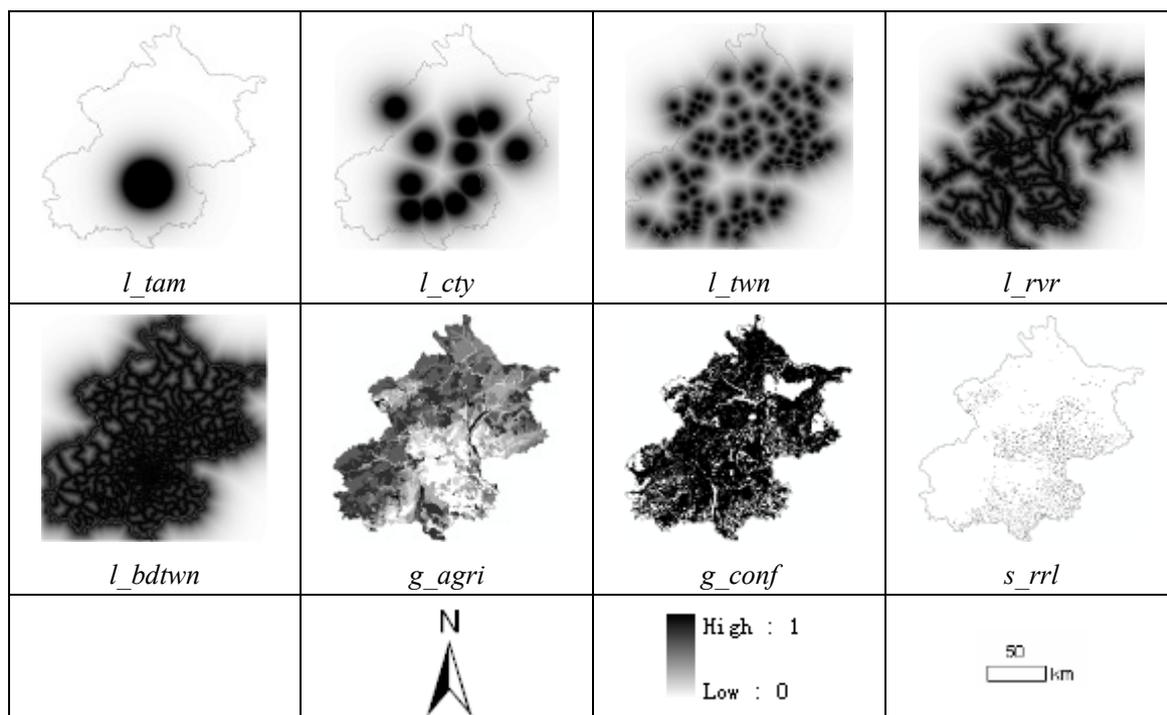


图 8-1 各个历史阶段的城市形态数据分布

图 8-2 主要空间变量分布图²⁶

为了便于对回归系数进行对比，需要对各空间变量进行标准化处理，将其数值范围统一为 0~1（部分变量的数值为 0 或 1），数值越大表示假设被开发的概率越大，反之则概率越小（除了用于表征行政边界对城镇开发的影响 l_bdtn ）。对于区位变量，其原始数据为空间要素空间分布的矢量 GIS 图层，采用 ESRI ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块，可以获取相应的直线距离数据 $dist_k$ ，通过 $f_k = e^{-\beta * dist_k}$ 可以计算吸引力 f_k ，其中 β 根据经验取值 0.0001。对于制度变量，禁止建设区 g_conf 中数值为 0 表示禁止一切城乡建设，反之为 1；农业用地适宜性 g_agri 表示对耕作的适宜条件，数值越大表示适宜性越低（其已经用于指导农业用地的选址，以及作为确定城市开发中选择被占用农田的优先序）；城市规划 g_pln 表示规划布局，数值为 1 表示规划城镇建设用地，反之为 0（将在第四部分“规划形态对比及一致性评价”进行重点介绍）。对于邻域变量，考虑的为圆形邻域类型，半径为 5 个网格，共 81 个网格，其数值等于邻域内不包括自身的城市建设用地面积（即网格数）与邻域内的不包括自身的土地面积（80 个网格）之商。

26 篇幅有限，各个时间段的道路数据 l_r 和邻域数据 nei 的空间分布本部分不一一列出。

8.3 一致性评价结果：对比规划方案与实际发展

自北京 1958 年行政区划调整形成目前的市域范围以来，北京市域范围内编制的总体规划主要有五版：1958 年、1973 年、1982 年、1992 年和 2004 年（北京市规划委员会等，2006）。历次总规的核心内容为：

（1）1958 版总规，将北京的城市性质确定为“我国的政治中心和文化教育中心，我们还要迅速把它建设成一个现代化的工业基地和科学技术的中心，使它站在我国技术革命和文化革命的最前列”。规划总人口 1000 万人，其中市区 350 万人，形成“分散集团式”的布局模式。1957 年的现状常住人口规模为 415 万人，房屋建筑规模为 2230 万 m^2 。

（2）1973 版总规，确定的发展目标是“多快好省地把北京建成一个具有现代工业、现代农业、现代科学文化和现代城市设施的清洁的社会主义首都”。规划市区人口规模 370-380 万人。

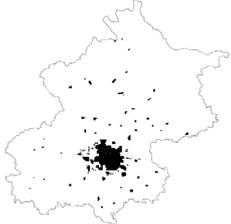
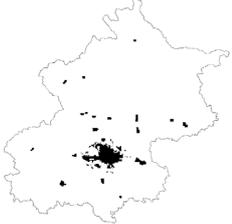
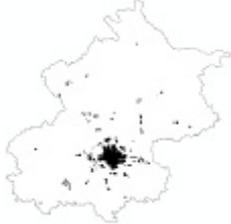
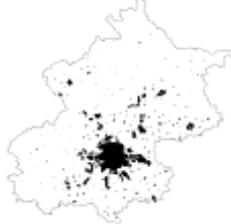
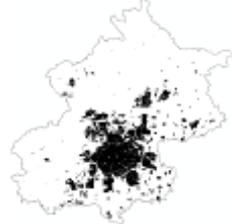
（3）1982 版总规将北京定位为“伟大社会主义中国的首都，是全国的政治中心和文化中心”。规划全市人口 1000 万人，市区 400 万人。1980 年常住人口规模为 904 万人，房屋建设规模 9500 万 m^2 。总体上该版总规的开发规模与现状差别不大。

（4）1992 版总规将北京定位为“伟大社会主义中国的首都，是全国的政治中心和文化中心，是世界著名的古都和现代国际城市”。规划全市常住人口 1250 万人，市区 650 万人。1989 年常住人口规模为 1086 万人，城镇建设用地规模 904 km^2 ，房屋建筑规模 17900 万 m^2 。

（5）2004 版总规将北京定位为“中华人民共和国的首都，是全国的政治中心、文化中心，是世界著名的古都和现代国际城市”。规划全市人口 1800 万人，中心城 850 万人，形成“两轴-两带-多中心”的布局形态。2003 年全市常住人口规模为 1456 万人，城镇建设用地规模 1150 km^2 ，房屋建筑规模 43000 万 m^2 。

规划的土地利用类型总体上可分为城市建设用地（还可细分为居住、公建、工业用地等）和非城市建设用地，基本情况如表 8-2 所示。我们基于 GIS 对各版规划的规划建设用地范围进行了量算。总体上规划建设用地的面积随时间持续增长，目前已达到 2389 km^2 ，用地布局也不断从集中走向分散。

表 8-2 北京历次总体规划基本情况表

指标	<i>g_pln58</i>	<i>g_pln73</i>	<i>g_pln82</i>	<i>g_pln92</i>	<i>g_pln04</i>
规划编制年代	1958	1973	1982	1992	2004
规划时间范围	1958-2000	1973-2000	1982-2000	1991-2010	2004-2020
执行期限(年)	15	9	10	12	至 2008 年为 4 年
空间布局					
规划总面积 (km ²)	611	465	454	1079	2389
斑块数目 ²⁷	78	58	192	512	9958
斑块平均面积 (km ²)	7.8	8.0	2.4	2.1	0.2
规划期末对应的城市形态	<i>fm76</i>	<i>fm81</i>	<i>fm91</i>	<i>fm04</i>	<i>fm08</i>
规划实现率(%)	38.5	45.6	60.9	69.2	42.9
开发合法率(%)	55.3	59.4	34.4	59.1	76.3
总精度(%)	96.0	95.7	95.7	94.8	89.8

参考一致性评价的方法，将城市规划布局与规划期末的城市形态两类数据对比，可以得到四类区域，如表 8-3 所示。

表 8-3 规划与实际开发对比示意表

		<i>fm</i>	
		非城镇建设用地 (0)	城镇建设用地 (1)
<i>g_pln</i>	非城镇建设用地 (0)	a_{00}	a_{01}
	城镇建设用地 (1)	a_{10}	a_{11}

27 用于评估规划方案空间布局的集中/分散的程度。斑块是指规划城镇建设用地布局中地块（有一条或一条以上边相接的地块属于同一个斑块）。

根据规划布局与城市形态的对比,选取下面的三个指标用于评价二者的一致性程度,这三个指标可以对空间分布和总体开发规模的一致性程度进行较好的表征。

(1) 规划实现率: $r_p = \frac{a_{11}}{a_{10} + a_{11}} * 100\%$, 表示规划范围内已开发的用地所占的

比例,即为城市规划实现的比例;

(2) 开发合法率: $r_D = \frac{a_{11}}{a_{01} + a_{11}} * 100\%$, 表示已开发用地范围内位于规划区域

的比例,即为合法开发的比例,位于规划区域外则认为是非法开发;

(3) 总精度: $r_T = \frac{a_{00} + a_{11}}{a_{00} + a_{01} + a_{10} + a_{11}} * 100\%$, 表示规划与开发一致的范围占整

个研究范围的比例。

历次总体规划的规划实现率、开发合法率和总精度三项指标的计算结果见表 8-2。

(1) 对于规划实现率指标,鉴于北京的总规并不是在上版总规的规划期末修编,造成部分规划区域没有得到开发,因此该指标数值普遍不高,其中 1992 版总规最高,该总规的规划期末是 2010 年,而实际的规划有效执行时间仅为 2004 年。2004 版总规的规划期末为 2020 年,而评价时间为 2008 年,因此规划实现率指标数值较低。

(2) 对于开发合法率指标,以 2004 版总规最高,达到了 76.3%,说明 2004 年以来的城市开发受城市规划的约束作用较强。而其他版本的总规,其对城市开发的引导作用明显弱于 2004 版总规。但更多可能是因为 2004 版总规目前仅执行 4 年,而其他版本的总规最短的执行期限都是 8 年,即规划与发展的一致性程度随执行期限的增加而衰减。

(3) 对于总精度指标,鉴于规划建设用地占市域面积的比例偏低,因此该指标的数值普遍较为理想,但也说明该指标对位于面积较大区域中的真实城市开发的反映并不敏感,对于类似区域可以不引入该指标用以评估规划与实际开发的一致性程度。

本部分以及 Han 等(2009)所进行的针对规划实施的一致性评价方法,属于时空静态的范畴,即针对整个规划范围在一个时间点进行评价,所评价的是规划的实施结果而非过程,也不是在城市扩展的综合框架下对过程的评价。下面将分别给出时间和空间的动态评价结果。

8.4 各历史阶段总规的实施成效对比

为了评价五版总体规划在城市扩展过程中的作用,考虑到各版总规实施的时间阶段,采用第2部分提出的方法对历史数据进行分析(FORWARD:LR方法),可以获得不同历史阶段的相应参数。根据数据的可获得情况,可以分析的历史阶段主要有五个:1947-1976、1976-1981、1981-1991、1991-2004以及2004-2008,分别用于评价五版总体规划。在各个历史阶段的回归中,假设 l_tam 、 l_cty 、 l_tw 、 l_rvr 、 l_bdtwn 、 g_agri 、 g_conf 和 s_rrl 等变量值均相同,不随时间变化,而 l_r 、 g_pln 、 nei 和因变量在各个阶段不同。

不同阶段所采用的因变量和自变量如表8-4所示。表中同时列出了不同历史阶段的城市扩展速度,可以作为宏观参数,用于对比不同阶段的宏观经济条件。

表 8-4 各时间阶段的回归设置表

时间阶段 (时间跨度, 年)	1947-1976 (29)	1976-1981 (5)	1981-1991 (10)	1991-2004 (13)	2004-2008 (4)
因变量 (括号内为年平均 扩展速度, km ² /a)	$fm76-fm47$ (15)	$fm81-fm76$ (28)	$fm91-fm81$ (17)	$fm04-fm91$ (35)	$fm08-fm04$ (21)
l_tam					
l_cty					
l_tw			保持不变		
l_rvr					
l_bdtwn					
自变量					
l_r	l_r58p	l_r76	l_r81	l_r91	l_r01
g_agri			保持不变		
g_conf					
g_pln	g_pln58	g_pln73	g_pln82	g_pln92	g_pln04
s_rrl			保持不变		
nei	$nei47$	$nei76$	$nei81$	$nei91$	$nei04$

各个历史阶段的回归系数如图8-3所示,纵向分析各个历史阶段,可以看出城市扩展的驱动力差异较大,市场和政府在其中所起到的作用也存在差异(对改革开放的背景也是个印证)。各个历史阶段城市扩展的共同点是城市主中心、新城中心和道路的影响显著,对禁建区的保护显著,而对农业用地的保护则明显不足,主要在于农业用地的适宜性较好的区域,一般也比较适宜进行城镇开发。纵向对比不同时期的城市规划与其他影响因素的作用,可以看出相比沿城市主中心扩展、沿道路发展,以及邻近开发的趋势等市场驱动力,城市规划这一制度性因

素对城市开发的影响偏弱，即市场因素可以解释的城市扩展所占比例占主要地位。

横向对比不同阶段城市规划的作用，其在各个阶段均保持正值，表明城市规划对城市扩展都起到了促进的作用。此外，其数值除了在 1981—1991 年间略有下降之外，总体呈逐渐上升的趋势。1981—1991 年间的下降可能是由于改革开放初期，城市总体规划所制定的用地指标远远不能满足经济蓬勃发展所带来的超预期的用地需求，因而造成规划影响因素的大大减弱。同时，规划控制因素的总体上升趋势表明，随着时间的推移，城市规划的实施力度在不断增强，对城镇开发的引导作用得到了提高。

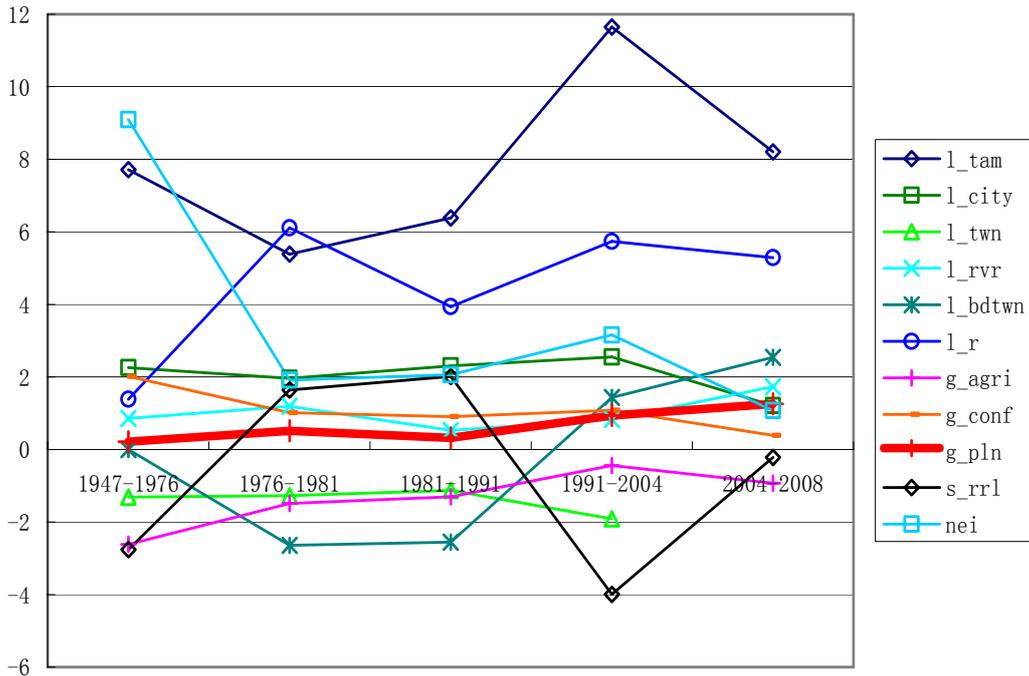


图 8-3 不同时期各Logistic回归系数的变化

8.5 新版总规在各区县的实施成效对比

城市规划所产生的作用存在空间异质性，即在不同的区域间存在差异。为了识别不同区域的城市规划在城市扩展过程中的作用，开展了城市规划实施的空间动态评价。以 2004 年至 2008 年这一时间阶段为例，将市域空间按照区（县）行政区划分为 18 个子区域（鉴于城八区的开发相对成熟，同时面积较小，将其合并为一个区域进行分析）。图 8-4 示意性地对各个区县的城市规划在城市扩展中的作用进行了横向对比，可以看出各个子区域的城市规划影响程度存在较大的差异（0.464~1.612），其中以顺义区的规划影响程度最低，而延庆最高。远郊区县的规划作用效果明显高于近郊和中心地区。不过，这可能也反映出，与中心城和近

年来快速发展的近郊区县相比，由于远郊区县的建设活动较少，规划对建设的管制力度相对要低一些，使得城市规划在远郊区县的发展中表现出了更好的一致性。

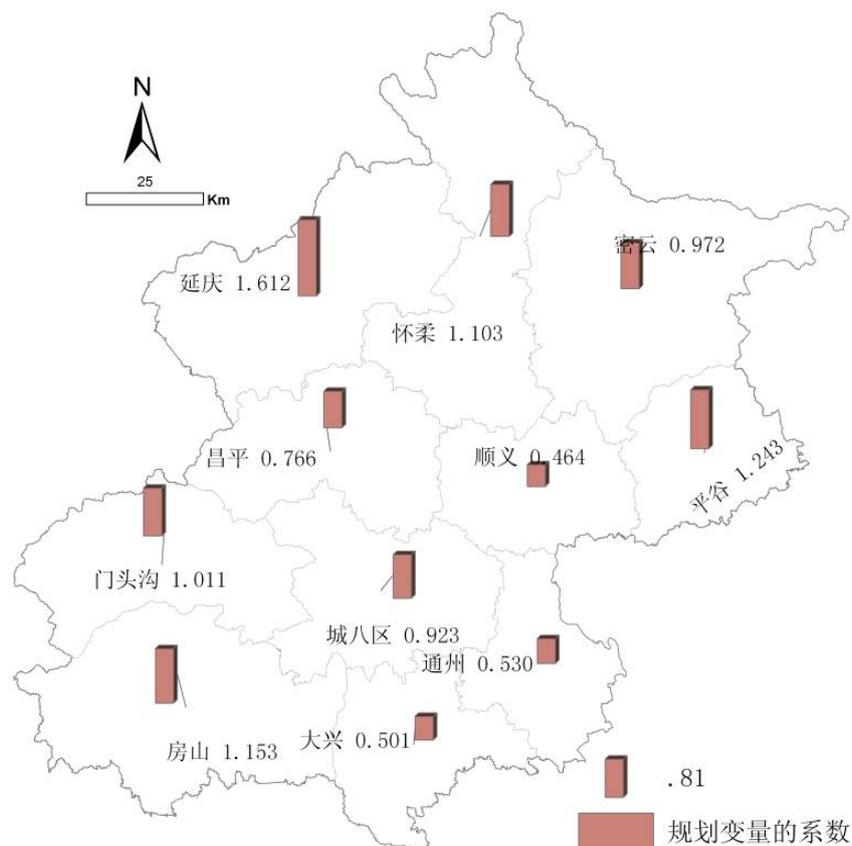


图 8-4 各区县的城市规划因素在城市扩展中的作用评价结果图

8.6 一致性评价与基于城市扩展视角评价的对比分析

以一致性指标为特征的静态指标评价，是以往的规划评价中所普遍采用的方法。由于该方法通常采用了多个指标来进行综合评价，面对不同指标的差异性结果，往往很难得出一致的评价结果。例如，Han 等(2009)以北京六环路作为研究范围，引入了边界容纳率(Boundary Containment Ratio, BCR)、开发实现率(Boundary Sufficiency Ratio, BSR)和边界邻近开发率(Boundary Adjacent Development Ratio, BADA)三个指标，分别对 1982 版和 1992 版总规实施情况进行了一致性评价。虽然两个时期的结果能够共同反映规划的部分失效的程度，但很难将不同时期的结果加以比较，以判定规划实施成效的优劣。本研究中的静态指标评价也面临着同样的问题。通过对规划实现率、开发合法率和总精度三个一致性指标的评价，虽然能够揭示规划实施成效的部分特征，但仍然难以对规划实施的时空特征进行综合描述。

通过基于 Logistic 回归的时空动态评价,我们则发现,规划控制因素在时空上具有较为稳定的特征。即(1)近阶段的城市总体规划比早期的城市总体规划作用更强。(2)在主城区周边区县,规划的作用较弱;而在远郊区县,规划的作用则较强。可能的原因是,总体上,随着城市规划法律法规的逐步完善以及技术手段的改进,城市规划的实施力度在不断增强,对城镇开发的空間引导作用得到了提高。另外,随着大量外来人口的涌入,主城区周边区县的開發压力较大,突破规划控制的推动力也较大,因而规划实施的效果较差;而远郊区县的開發压力则相对较小,突破规划控制的推动力也较小,因而规划实施的效果则较好。

8.7 小结:微观分析方法在规划评估中的有益尝试

规划实施评价虽然仅仅是规划评价中的一个部分,但仍然涉及到了众多的因素。除了专家型评价的方法外,“一致性”是目前较常采用的评价方法。在城市开发中存在大量不确定因素的复杂市场经济环境下,仅仅以传统的“一致性”准则来进行规划实施评价,由于忽视了市场力因素作用的结果,尚存在着较大的局限性。且应用由“一致性”准则所发展出的各项静态评价指标进行规划实施评价时,往往难以得出较为统一的判定结果。如通过对于北京市各个规划的期末结果的三个静态评价指标的对比分析,本研究发现,不同指标之间的衡量结果虽然各自反映了规划实施的部分成效特征,但不同时期城市规划的总体实施成效仍然较难用此种方式加以统一衡量。更重要的是,这种静态评价难以衡量规划在城市发展中所起到的实际作用。

本研究在 BUDEM 模型的基础上,提出的来自城市扩展分析视角的时空动态评价方法,可以反映城市规划的控制作用的整体特征,可以在很大程度上弥补原有静态评价指标体系的不足。通过 Logistic 回归模型对于北京市城市规划的时空动态评价分析,本研究发现,随着时间的推移,建国后北京市城市规划的控制作用呈现出逐渐增强的趋势。与此同时,在北京市域的不同区域中,城市规划对于城市发展的影响程度有着较大的差异,主要体现在,远郊区县的规划作用效果明显高于近郊和中心地区。这表明,在市场经济的转型过程中,虽然我国现有的规划体系仍显示出种种不适应性,它对于城市发展的引导和控制作用已经有了一定程度的改善。

第五篇 结论篇

第9章 结论与建议

9.1 主要结论

本文针对我国城乡规划中的空间规划，提出了适合我国国情的微观模拟研究框架，就微观模拟研究从数据获取、规划方案模拟和评估等三个方面，提出了一系列的研究方法，并在虚拟城市和北京开展了相应的实证分析。研究方法包括元胞自动机（CA）、多智能体系统（MAS）、空间分析和空间统计等，研究对象包括总规和控规中的空间规划部分，是在空间规划中采用微观模拟方法进行规划编制和评估支持的有益探索，有望提高我国规划支持系统领域的理论水平，改善规划实践中的量化分析能力。

本文主要取得如下结论：

（1）总体上，本文借鉴来自地理学和社会学领域的微观模拟技术，针对空间规划的研究内容，提出了基于微观模拟支持规划方案编制和评估的方法，针对数据获取方面的难点给出了专门的解决方法，在虚拟城市和北京市进行了多项实证研究，证明将微观模拟技术用于空间规划具有可行性，可以与宏观分析和模拟等技术方法一同，作为规划支持技术辅助空间规划方案的编制和评价。

（2）在空间规划中开展微观模拟所需要的数据方面，我国目前没有公开的微观样本数据，本文提出了一种利用宏观统计数据、典型调查数据和常识性知识等，反演用于微观模拟的个体样本数据（包括属性和空间位置），对解决空间规划中微观模拟研究的数据瓶颈具有显著意义。

（3）利用微观模拟模型支持空间规划方案制定方面，所建立的用于城市扩展模拟的北京城市空间发展模型（BUDEM），可以对远景城市空间布局进行情景分析，给出不同政策条件下的空间布局，并实现了基于模拟结果制定城市增长边界。所建立的用于城市形态-通勤交通-环境集成的微观模拟模型（FEE-MAS），对居民的居住区位、就业区位和交通方式的选择行为进行了模拟，结合所生成的土地使用方式和容积率分布各异的城市形态对应的能源消耗和环境影响，识别一般规律，可以用于详规尺度的方案制定。这两个方面的研究分别在北京市和虚拟空间证明了微观模拟模型的有效性，对提高空间规划编制的科学性具有一定意义。

(4) 利用微观模拟模型支持空间规划方案评估方面, 针对我国空间规划评估的需要, 开展了两方面的工作。其一为针对规划方案进行评估, 分析是否有城市发展政策能够保证其实实现, 如果可以, 则给出相应的政策参数, 通过这项工作, 可以在源头保证空间规划方案的可实现性, 提高规划方案实现的概率。其二为针对北京市历次总规的空间布局方案进行评估, 分析其在城市扩展中所起到的作用, 并将历次总规进行了横向对比。

9.2 主要创新点

(1) 面向空间规划的微观模拟研究: 本文将微观分析和模拟技术系统地引入我国城乡规划领域的空间规划, 并对其进行了相应的改进, 提出了一系列的关键技术(具体见创新点 2-6) 用于支持空间规划方案的制定和评估, 为规划支持系统方面的研究提供了新的视野。

(2) 稀缺数据条件下微观样本数据反演方法: 该方法充分考虑中国的数据稀缺环境的特征, 充分利用已有的统计信息、典型调查和常规规则等多源数据反演个体样本的属性信息, 是对解决当前城市系统微观模拟中个体数据稀缺问题的有益探索, 有望缓解微观模拟在我国乃至国际上应用的数据瓶颈问题, 在国际上没有研究的先例。

(3) 综合约束 CA 城市模型: 本文建立集成四类约束条件的综合约束 CA 城市模型, 引入了复杂环境约束、城市规划等其他 CA 城市增长模型少有考虑并体现中国城市发展特色的制度性约束的研究视角, 并引入京津冀吸引力变量, 用于表征京津冀区域(大北京)对北京城市空间增长的影响, 从而在常规 CA 模型没有考虑区域因素这一方面有所突破。此外, 该模型直接面向北京城市规划的实践工作, 是对 CA 在超大城市城市规划部门应用的可能性和实际效果的有力尝试。

(4) 识别城市形态、交通能耗和环境影响三者定量关系的方法: 城市形态与城市系统能耗相关性的已有研究目前多侧重于以整个城市作为研究对象, 少有研究以一个城市作为研究对象定量分析城市功能的空间组织、开发强度的空间分布以及居民偏好对城市系统能耗, 特别是通勤交通能耗的影响。基于景观生态学、全局敏感性分析和多智能体系统构建的这一方法适合分析城市系统的客观规律, 并可用于规划方案的定量评估。

(5) 城市形态与空间发展政策的一致性评估方法: 已有研究主要侧重于基于政策参数模拟未来的城市形态, 而本方法实现了基于城市形态分析政策支持的情况, 具有创新理论价值, 在国际上没有研究的先例, 同时其对我国城市规划编制也具有特别的意义, 可以使规划师在规划编制之处考虑其可实现性, 进而提高

规划方案实现的可能性。

(6) 在城市扩展框架下进行空间规划方案实施成效时空动态评价的方法：已有的关于评估城市规划方案实施成效的研究，主要采用一致性方法通过对比规划方案 and 实际开发情况开展，本文所提出的时空动态评价方法，以城市扩展驱动力分析为研究视角，识别作为政府主导的空间规划和市场力量的博弈，识别城市规划实施成效的时空分异特征，可以作为一致性评价方法的必要补充。

9.3 建 议

本文初步提出了面向空间规划的微观模拟研究框架，鉴于篇幅和研究精力有限，本文仅针对其中的部分内容开展了理论和实证研究工作。下一个阶段，除了对本文没有涉及的面向空间规划的微观模拟研究框架中的内容开展研究工作外，本文的各个章节的研究内容，也需要进行更为深入的探讨，具体如下。

(1) 数据反演方面，拟通过数据挖掘的方法，使用实际统计数据对个体属性之间的概率关系，或函数关系进行挖掘，对生成的微观样本进行验证，进而修正样本以提高样本的真实性。

(2) 关于BUDEM模型，拟在基于CA模拟的城市空间布局的基础上，细化研究尺度，将其扩展到控规尺度，引入规划师主体理论，对掌握的不同区域的现状图和规划图进行数据挖掘，得到决策树形式的规划师的规则，用于辅助制定不同偏好的控规用地布局方案。

(3) 关于FEE-MAS模型，建议除了考虑居民的通勤交通，增加居民的居民家庭生活、娱乐休闲等其他交通组成，以及城市的第二产业和第三产业的能源消耗，以实现针对规划方案进行综合能耗的模拟和评估。

(4) 规划方案的政策参数识别方面，拟进行多种用地类型的形态情景分析，例如多种城市用地类型——居住、商业和工业等，以适应控规方案的情景分析，分析空间规划与发展政策的一致性。

(5) 规划空间控制成效评估方面，还需要结合北京建国以来城市规划建设的背景，对所得到的数据结论进行深入阐述，给出相应的政策含义。

参考文献

- Alexander E R, Faludi A. 1989. Planning and plan implementation - notes on evaluation criteria. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 16:127-140.
- Alford G, Whiteman J. 2009. Macro-urban form and transport energy outcomes: Investigations for Melbourne. *Road & Transport Research*, 18:53-67.
- Alonso W. 1964. *Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anderson W P, Kanaroglou P S, Miller E J. 1996. Urban form, energy and the environment: A review of issues, evidence and policy. *Urban Studies*, 33:7-35.
- Ballas D, Clarke G. 2000. GIS and microsimulation for local labour market analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24:305-330.
- Banister D, Watson S, Wood C. 1997. Sustainable cities: Transport, energy, and urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24:125-143.
- Batty M. 2005. *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Benenson I, Omer I, Hatna E. 2002. Entity-based modeling of urban residential dynamics: The case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29: 491-512.
- Benenson I, Torrens P M. 2004a. *Geosimulation: Automata-based Modeling of Urban Phenomena*. London: John Wiley & Sons.
- Benenson I, Torrens P M. 2004b. Geosimulation: object-based modelling of urban phenomena. *Computers, Environment and Urban System*, 28:1-8.
- Bourassa S C, Cantoni E, Hoesh M. 2007. Spatial dependence, housing submarkets, and house price prediction. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, 35:143-160.
- Breheny M. 1992. *The compact city*. Oxford: Alexandrine Press.
- Brody S D, Highfield W E, Thornton S. 2006. Planning at the urban fringe: An examination of the factors influencing nonconforming development patterns in southern Florida. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33:75-96.
- Brown D G, Page S E, Riolo R, Rand W. 2004. Agent-based and analytical modeling to evaluate the effectiveness of greenbelts. *Environmental Modelling & Software*, 19:1097-1109.
- Brown D G, Page S, Riolo R, Zellner M, Rand W. 2005. Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use. *International Journal of Geographical Information Science*, 19:153-174.

- Brown D G, Robinson D T. 2006. Effects of heterogeneity in residential preferences on an agent-based model of urban sprawl. *Ecology and Society*, 11 [2011-4-2] <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art46/>
- Brueckner J K, Fansler D A. 1983. The economics of urban sprawl: Theory and evidence on the spatial sizes of cities. *The Review of Economics and Statistics*, 65:479-482.
- Bullard R D, Johnson G S, Torres A O. 1999. *Sprawl Atlanta: social equity dimensions of uneven growth and development*. Atlanta, GA, Clark Atlanta University, The Environmental Justice Resource Center.
- Butler R W H. 1982. A structural analysis of the Moine Thrust zone between Loch Eriboll and Foinaven NW Scotland. *Journal of Structural Geology*, 4:19-29.
- Clark K C, Gaydos L J. 1998. Loose-coupling a cellular automation model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12:699-714.
- Crooks A. 2006. Exploring cities using agent-based models and GIS. CASA Working Paper No.109. Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London.
- Crooks A. 2008. Constructing and implementing an agent-based model of residential segregation through vector GIS. CASA Working Paper No.133. Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London.
- Crooks A, Castle C, Batty M. 2008. Key challenges in agent-based modeling for geo-spatial simulation. *Computer, Environment and Urban Systems*, 32:417-430.
- Danielsen K, Lang R, Fulton W. 1999. Retracting suburbia: Smart growth and the future of housing. *Housing Policy Debate*, 10:512-540.
- Deadman P J, Robinson D T, Moran E, Brondizio E. 2004. Colonist household decision making and land-use change in the Amazon rainforest: an agent-based simulation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31:693-709.
- Dieleman F M, Dijst M, Burghouwt G. 2002. Urban form and travel behaviour: Micro-level household attributes and residential context. *Urban Studies*, 39:507-527.
- Engelen G, White R, Uljee I. 1997. Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban and regional planning and policy making. Timmermans, H. (ed): *Decision Support Systems in Urban Planning*. London: E&FN Spon:125-155.
- Evans T P, Kelley H. 2004. Multi-scale analysis of a household level agent-based model of landcover change. *Journal of Environmental Management*, 72:57-72.
- Evans T P, Sun W J, Kelley H. 2006. Spatially explicit experiments for the exploration of land-use decision-making dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 20:1013-1037.
- Ewing R. 1997. Is Los Angeles style sprawl desirable?. *Journal of the American Planning Association*, 63:107-126.

- Ewing R, Pendall R, Chen D. 2002. Measuring sprawl and its impact. *The Smart Growth America*, Washington, DC.
- Ewing R, Schmid T, Killingsworth R, Zlot A, Raudenbush S. 2003. Relationship between urban sprawl and physical activity, obesity, and morbidity. *American Journal of Health Promotion*, 18:47-57.
- Fan Y L, Khattak A J. 2008. Urban form, individual spatial footprints, and travel examination of space-use behavior. *Transportation Research Record*, (2082):98-106.
- Giuliano G, Narayan D. 2003. Another look at travel patterns and urban form: The US and Great Britain. *Urban Studies*, 40:2295-2312.
- Goodman A C, Thibodeau T G. 1998. Housing market segmentation. *Journal of Housing economics*, 7:121-143.
- Gordon P, Richardson H W. 1997. Are compact cities a desirable planning goal?. *Journal of the American Planning Association*, 63:95-106.
- Han H, Dang A R. 2008. Assessment of the implementation of urban construction boundaries in Beijing city by using remote sensing data. *The 16th International Conference on Geoinformatics & Joint Conference on GIS and Built Environment*. Guangzhou, China.
- Han H, Lai S, Dang A, Tan Z, Wu C. 2009. Effectiveness of urban construction boundaries in Beijing: An assessment. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 10:1285-1295.
- Hanaoka K, Clarke G P. 2007. Spatial microsimulation modelling for retail market analysis at the small-area level. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31:162-187.
- He C, Okada N, Zhang Q, Shi P, Zhang J. 2008. Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 86:79-91.
- Holland J H. 1995. *Hidden order: How adaptation builds complexity*. Addison-Wesley.
- Horner M W. 2007. A multi-scale analysis of urban form and commuting change in a small metropolitan area (1990-2000). *Annals of Regional Science*, 41:315-332.
- Hourcade J C, Crassous R. 2008. Low-carbon societies: A challenging transition for an attractive future. *Climate Policy*, 8:607-612.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. New York: Cambridge University Press:996.
- Janssen R, Herwijnen M V, Stewart T J, Aerts J C J H. 2008. Multiobjective decision support for land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35, 740-756.
- Johnson R A, McCoy M C. 2006. *Assessment of integrated transportation / land use models*. Information Center for the Environment, Department of Environmental Science & Policy, University of California, Davis.
- Johnson M P. 2001. Environmental impacts of urban sprawl: A survey of the literature and proposed research agenda. *Environment and Planning A*, 33:717-735.

- Jones C, Leishman C, Watkins C. 2004. Intra-urban migration and housing submarkets: Theory and evidence. *Housing Studies*, 19:269-283.
- Kahn M. 2000. The environmental impact of suburbanization. *Journal of Policy Analysis and Management*, 19:569-586.
- Ke S Z, He M, Song Y. 2006. Economic determinants of urban spatial scale- Chinese cities in transition. Working paper.
- Kerr J, Frank L, Sallis J F, Chapman J. 2007. Urban form correlates of pedestrian travel in youth: Differences by gender, race-ethnicity and household attributes. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 12:177-182.
- Kii M, Doi K. 2005. Multiagent land-use and transport model for the policy evaluation of a compact city. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32:485-504.
- Klosterman R E. 1999. The What if? Collaborative planning support system. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26:393-408.
- Krizek K J. 2003. Residential relocation and changes in urban travel - Does neighborhood-scale urban form matter?. *Journal of the American Planning Association*, 69:265-281.
- Lancaster K. 1966. A new approach to consumer theory. *Journal of Political Economy*, 74:132-157.
- Landis J. 1994. The California Urban Future model: a new generation of metropolitan simulation models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21:399-420.
- Landis J. 1995. Imaging land use futures: Applying the California Urban Future model. *Journal of American Planning Association*, 61:438-457.
- Landis J, Zhang M. 1998a. The second generation of the California Urban Future model, Part1: Model logic and theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25:657-666.
- Landis J, Zhang M. 1998b. The second generation of the California Urban Future model, Part2: Specification and calibration results of the land-use change submodel. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25:795-824.
- Laurian L, Day M, Berke P, Ericksen N, Backhurst M, Crawford J, Dixon J. 2004. Evaluating plan implementation: A conformance-based methodology. *Journal of the American Planning Association*, 70:471-480.
- Laurie A J, Jaggi N K. 2003. Role of 'vision' in neighbourhood racial segregation: A variant of the Schelling segregation model. *Urban Studies*, 40:2687-2704.
- Li X, Liu X. 2007. Defining agents' behaviors to simulate complex residential development using multicriteria evaluation. *Journal of Environmental Management*, 85:1063-1075.
- Li X, Liu X. 2008. Embedding sustainable development strategies in agent-based models for use as a planning tool. *International Journal of Geographical Information Science*, 22:21-45.
- Li X, Yang Q S, Liu X P. 2008. Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 86:177-186.
- Li X, Yeh A G O. 2002. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16:323-343.

- Li X, Yeh A G O. 2000. Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14:131-152.
- Li X, Yeh A G O. 2002. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16:323-343.
- Liao Y, Wang J, Meng B, Li X. 2010. Integration of GP and GA for mapping population distribution. *International Journal of Geographical Information Science*, 24:47-67.
- Ligtenberg A, Bregt A K, Lammeren R V. 2001. Multi-actor-based land use modelling: spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning*, 56:21-33.
- Liu X H, Wang J F, Liu M L, Meng B. 2005. Spatial heterogeneity of the driving forces of cropland change in China. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 48:2231-2240.
- Liu X, Li X, Liu L, He J. 2008. A bottom-up approach to discover transition rules of cellular automata using ant intelligence. *International Journal of Geographical Information Science*, 22:1247-1269.
- Long Y, Shen Z, Du L, Mao Q, Gao Z. 2008a. BUDEM: An urban growth simulation model using CA for Beijing metropolitan area. *Proceedings of Geoinformatics*.
- Long Y, Shen Z, Du L, Mao Q, Gao Z. 2008b. Complex constrained CA urban model: Long-term urban form prediction for Beijing metropolitan area. *Proceedings of the 44th ISOCARP Congress*.
- Long Y, Mao Q, Dang A. 2009a. Beijing urban development model: Urban growth analysis and simulation. *Tsinghua Science and Technology*, 14:787-794.
- Long Y, Shen Z, Mao Q, Dang A. 2009b. Form scenario analysis using constrained CA. *Proceedings of the Conference of Computers in Urban Planning and Urban Management*.
- Long Y, Mao Q. 2010. A constrained CA model for planning simulation incorporating institutional constraints. *China City Planning Review*, 19:17-25.
- Long Y, Mao Q, Dang A. 2010a. Establishing urban growth boundaries using Geosimulation for land use control. *Proceedings of 46th ISOCARP*.
- Long Y, Shen Z, Mao Q, Dang A. 2010b. Retrieving individuals' attributes using aggregated dataset for urban micro-simulation: A primary exploration. *Proceedings of Geoinformatics*.
- Long Y. 2011. Housing and job places identification using smart card data: A case study of Beijing. *Proceedings of Geoinformatics*.
- Long Y, Shen Z, Mao Q. 2011a. An urban containment planning support system for Beijing. *Computers, Environment and Urban Systems*, In Press. [DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2011.02.004]
- Long Y, Shen Z, Mao Q. 2011b. Retrieving spatial policy parameters from alternative plans using constrained cellular automata and regionalized sensitivity analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Minor revision and tentatively accepted.

- Loo B P Y, Chow A S Y. 2007. Travel behaviour, urban form and transport policies: A comparative Study of Hong Kong and Taipei. *Transportation Systems: Engineering & Management*, 489-498.
- Maat K, Timmermans H J P. 2009. A causal model relating urban form with daily travel distance through activity/travel decisions. *Transportation Planning and Technology*, 32:115-134.
- McGarigal K, Cushman S A, Neel M C, Ene E. 2002. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html.
- McGrath D T. 2005. More evidence on the spatial scale of cities. *Journal of Urban Economics*, 58:1-10.
- McMillan T E. 2007. The relative influence of urban form on a child's travel mode to school. *Transportation Research Part a-Policy and Practice*, 41:69-79.
- Mennis J. 2003. Generating surface models of population using dasymetric mapping. *The Professional Geographer*, 55:31-42.
- Miller E J, Hunt J D, Abraham J E, Salvini P A. 2004. Microsimulating urban systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28:9-44.
- Moreno N, Menard A, Marceau D J. 2008. VecGCA: A vector-based geographic cellular automata model allowing geometric transformations of objects. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35:647-665.
- Moreno N, Wang F, Marceau D J. 2009. Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1):44-54.
- Muller M R, Middleton J. 1994. A markov model of land-use change dynamics in the Niagara region, Ontario, Canada. *Landscape Ecology*, 9:151-157.
- Nelson A C, Duncan J B. 1995. *Growth management principles and practices*. Chicago, IL; Washington D.C.: Planners Press.
- Newman P W G, Kenworthy J R. 1989. Gasoline consumption and cities: A comparison of US cities with a global survey. *Journal of American Planning Association*, 55:24-37.
- Nijs T C M, Niet R D, Crommentuijn L. 2004. Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030. *Journal of Environmental Management*, 72:35-42.
- Orcutt G. 1957. A new type of socio-economic system. *Review of Economics and Statistics*, 58:773-797.
- Orcutt G, Merz J, Quinke H (eds). 1986. *Microanalytic simulation models to support social and financial policy*. Amsterdam and New York: North-Holland.
- Pajanowski B C, Brown D G, Shellito B A, Manik G A. 2002. Using neural networks and GIS to forecast land use changes: A land transformation model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26:553-575.

- Pan H X, Shen Q, Zhang M. 2009. Influence of urban form on travel behaviour in four neighbourhoods of Shanghai. *Urban Studies*, 46:275-294.
- Parker D C, Manson S M, Janssen M A, Hoffman M J, Deadman P. 2003. Multi-agent systems for the simulation of land use and land cover change: A review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2):314-37.
- Pearman A D. 1988. Scenario construction for transportation planning. *Transportation Planning and Technology*, 7:73-85.
- Pendall R, Martin J, Fulton W. 2002. *Holding the Line: Urban containment in the United States*. Washington, D C: The Brookings Institution Center on Urban and Metropolitan Policy.
- Pudney S, Sutherland H. 1994. How reliable are microsimulation results? : An analysis of the role of sampling error in a U.K. tax-benefit model. *Journal of Public Economics*, 53:327-365.
- Putman S H. 1975. Urban landuse and transportation models: a state of the art summary. *Transportation Research*, 9:187-202.
- Ratcliffe, J S. 1999. Scenario building: A suitable method for strategic property planning?. Cambridge: RICS Cutting Edge Conference.
- Robinson, D T, Brown D. 2009. Evaluating the effects of land-use development policies on ex-urban forest cover: An integrated agent-based GIS approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(9):1211-1232.
- Saarloos D, Arentze T, Borgers A, Timmermans H. 2005. A multiagent model for alternative plan generation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32:505-522.
- Schlossberg M, Greene J, Phillips P P, Johnson B, Parker B. 2006. School trips: Eeffects of urban form and distance on travel mode. *Journal of the American Planning Association*, 72:337-346.
- Schoemaker P J H. 1995. Scenario planning: A tool for strategic thinking. *Sloan Manage. Review*, 25-40.
- Schwanen T, Dijst M, Dieleman F M. 2004. Policies for urban form and their impact on travel: The Netherlands experience. *Urban Studies*, 41:579-603.
- Shen Z, Kawakami M, Kawamura M. 2009a. Geo-simulation model using geographic automata for simulating land use patterns in urban partitions. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36:802-823.
- Shen Z, Yao X A, Kawakami M, Koujin M. 2009b. Simulating the impact on downtown of large-scale shopping centre location: Integrating GIS dataset and MAS platform as a case study in Kanazawa city. *Proceedings of CUPUM*.
- Shen Z, Yao X A, Kawakami M, Chen P. 2011. Simulating spatial market share patterns for impacts analysis of large-scale shopping centers on downtown revitalization. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38:142-162.
- Shen Q, Zhang F. 2007. Land-use changes in a pro-smart-growth state: Maryland, USA. *Environment and Planning A*, 39(6):1457-1477.

- Shi W, Pang M. 2000. Development of voronoi-based cellular automata: An integrated dynamic model for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 14:455-474.
- Shim G E, Rhee S M, Ahn K H, Chung S B. 2006. The relationship between the characteristics of transportation energy consumption and urban form. *Annals of Regional Science*, 40:351-367.
- Shukla P R, Dhar S, Mahapatra D. 2008. Low-carbon society scenarios for India. *Climate Policy*, 8:156-176.
- Spir C, Stephenson K. 2002. Does sprawl cost us all? Isolating the effects of housing patterns on public water and sewer costs. *Journal of the American Planning Association*, 68(1):56-70.
- Stevens D, Dragicevic S, Rothley K. 2007. iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling and Software*, 22:761-773.
- Stevens D, Dragicevic S. 2007. A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(4):708-724.
- Stevenson S. 2004. New empirical evidence on heteroscedasticity in hedonic housing models. *Journal of Housing Economics*, 13:136-153.
- Strachan N, Pye S, Hughes N. 2008. The role of international drivers on UK scenarios of a low-carbon society. *Climate Policy*, 8:125-139.
- Talen E. 1996a. Do plans get implemented? A Review of evaluation in planning. *Journal of Planning Literature*, 10(3):248-259.
- Talen E. 1996b. After the plans: Methods to evaluate the implementation success of plans. *Journal of Planning Education and Research*, 16:79-91.
- Talen E. 1997. Success, failure, and conformance: An alternative approach to planning evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24:573-587.
- Torrrens P M, Benenson I. 2005. Geographic automata systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 19:385-412.
- van Sonsbeek J M, Gradus R H J M. 2006. A microsimulation analysis of the 2006 regime change in the Dutch disability scheme. *Economic Modelling*, 23:427-456.
- Waddell P. 2002. Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. *Journal of the American Planning Association*, 68:297-314.
- Ward D P, Murray A T, Phinn S R. 2000. A stochastically constrained cellular model of urban growth. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(6), 539-558.
- Watkins C A. 2001. The definition and identification of housing submarkets. *Environment and Planning A*, 33:2235-2253.
- Weber C. 2003. Interaction model application for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 63:49-60.
- White R W, Engelen G. 1997. Cellular automaton as the basis of integrated dynamic regional modeling. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24:235-246.

- Wu B M, Birkin M H, Rees P H. 2008. A spatial microsimulation model with student agents. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32:440-453.
- Wu F. 1998. Simland: A prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules International. *Journal of Geographical Information Science*, 12(1):63-82.
- Wu F. 2002. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International journal of Geographical Information Science*, 16(8):795-818.
- Wu F, Webster C J. 1998. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25:103-126.
- Xie Y, Batty M, Zhao K. 2005. Simulating emergent urban form: Desakota in China. Center for Advanced Spatial Analysis (University College London), Working Paper 95, London.
- Xie Y. 1994. Analytical models and algorithms for cellular urban dynamics. Unpublished Ph.D. dissertation, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- Yeh A G O, Li X. 2001. A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28:733-753.
- Yi C, Li Q, Zheng G. 2008. Commercial facility site selection simulating based on MAS. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
- Zellner M L, Theis T L, Karunanithi A T, Garmestani A S, Cabezas H. 2008. A new framework for urban sustainability assessments: Linking complexity, information and policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32:474-488.
- Zhang M. 2005. Exploring the relationship between urban form and nonwork travel through time use analysis. *Landscape and Urban Planning*, 73:244-261.
- Zhuang G Y. 2008. How will China move towards becoming a low carbon economy?. *China & World Economy*, 16:93-105.
- 北京市第五次人口普查办公室, 北京市统计局. 2002. 北京市 2000 年人口普查资料. 北京: 中国统计出版社.
- 北京市规划委员会, 北京市城市规划设计研究院, 北京城市规划学会. 2006. 北京城市规划图志 (1949-2005), 内部报告.
- 北京市计划委员会国土环保处. 1988. 北京国土资源. 北京: 北京科学技术出版社.
- 北京市统计局. 1999. 北京 50 年. 北京: 中国统计出版社.
- 北平市政府工程局. 2007. 北平市城郊地图. 北京: 中国地图出版社.
- 晁怡, 李清泉, 陈顺清. 2007. 基于多主体系统的区位建模. *武汉大学学报(信息科学版)*, 32(7):646-649.
- 陈干, 闰国年. 2000. 城市模型的发展及其存在问题. *经济地理*, 20(5):59-63.
- 陈禹, 钟佳桂. 2006. 系统科学与方法概论. 北京: 中国人民大学出版社.
- 党安荣, 毛其智, 王晓珠. 2002. 基于 GIS 空间分析的北京城市空间发展. *清华大学学报(自然科学版)*, 42(6):814-817.

- 杜宁睿, 李渊. 2005. 规划支持系统(PSS)及其在城市空间规划决策中的应用. 武汉大学学报(工学版), 38(1):137-142.
- 古琳, 程承旗. 2007. 基于 GIS-Agent 模型的武汉市土地利用变化模拟研究. 城市发展研究, 6:47-51.
- 关亚骥, 郭绍禧. 1996. 微观分析模拟及其新的支撑平台. 中国管理科学, 4(1):45-51.
- 韩昊英, 冯科, 吴次芳. 2009. 容纳式城市发展政策: 国际视野和经验. 浙江大学学报(人文社会科学版), 39(2):162-171.
- 景楠. 2007. 基于多智能体与 GIS 的城市人口分布预测研究. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所).
- 黎夏, 叶嘉安, 刘小平. 2006. 地理模拟系统在城市规划中的应用. 城市规划, 30(6):69-74.
- 黎夏, 叶嘉安, 刘小平, 杨青生. 2007. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体. 北京: 科学出版社.
- 李善同, 高嘉陵. 1999. 微观分析模拟模型及其应用. 北京: 机械工业出版社.
- 李新延, 李德仁. 2005. 应用多主体系统预测和分析城市用地变化. 武汉大学学报(工学版), 38(5):109-113.
- 龙瀛, 何永, 刘欣, 杜立群. 2006. 北京市限建区规划: 制订城市扩展的边界. 城市规划, 30(12):20-26.
- 龙瀛. 2007. 规划支持系统原理与应用. 北京: 化学工业出版社.
- 龙瀛, 沈振江, 杜立群, 毛其智, 高占平. 2008. 综合约束 CA 城市模型: 规划控制约束及城市增长模拟. 城市规划学刊, 6:83-91.
- 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 2009. 利用约束性 CA 制定城市增长边界. 地理学报, 64(8):999-1008.
- 龙瀛. 2010. 北京市限建区规划 中国城市科学研究会, 中国城市规划协会, 中国城市规划学会, 中国城市规划设计研究院. 中国城市规划发展报告(2009-2010). 北京: 中国建筑工业出版社:168-177.
- 龙瀛, 毛其智. 2010. 城市规划支持系统的定义、目标和框架. 清华学报, 50(3):335-337.
- 龙瀛, 沈振江, 毛其智. 2010a. 地块方向: 表征城市形态的新指标. 规划师, (4):25-29.
- 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 党安荣. 2010b. 基于约束性 CA 方法的北京城市形态情景分析. 地理学报, 65(6):643-655.
- 龙瀛, 毛其智, 沈振江, 杜立群. 2010c. 北京城市空间发展分析模型. 城市与区域规划研究, 3(2) 180-212.
- 龙瀛, 毛其智, 杨东峰, 王静文. 2011a. 城市形态-交通能耗-环境集成的多智能体模型. 地理学报. (已接受)
- 龙瀛, 沈振江, 毛其智. 2011b. 城市系统微观模拟中的个体数据获取新方法. 地理学报, 66(3):416-426.
- 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 胡卓伟. 2011c. 城市增长控制规划支持系统: 方法、开发及应用. 城市规划, 35(3):62-71.
- 吕晓蓓, 伍炜. 2006. 城市规划实施评价机制初探. 城市规划, 30(11):41-45.

- 马熙源, 高西宽. 2007. 基于 CA/MAS 理论的北京市人口发展仿真模型. 自动化技术与应用, 26(12):76-79.
- 沈清基. 2005. 中国城市能源可持续发展研究: 一种城市规划的视角. 城市规划学刊, (6) 41-47.
- 孙施文, 周宇. 2003. 城市规划实施评价的理论与方法. 城市规划汇刊, (2):15-20.
- 陶海燕, 黎夏, 陈晓翔. 2009. 基于多智能体的居住空间格局演变的真实场景模拟. 地理学报, 64(6):665-676.
- 陶海燕, 黎夏, 陈晓翔, 刘小平. 2007. 基于多智能体的地理空间分异现象模拟——以城市居住空间演变为例. 地理学报, 62(6):579-588.
- 田光进, 邬建国. 2008. 基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展. 生态学报, 28(9):4451-4459.
- 田莉, 吕传廷, 沈体雁. 2008. 城市总体规划实施评价的理论与实证研究——以广州市总体规划(2001-2010年)为例. 城市规划学刊, (5):90-96.
- 王静文, 毛其智, 杨东峰. 2008. 城市规划的能源影响探讨: 规划视角中的城市交通能耗模型. 中国城市规划年会(大连).
- 王凯. 2006. 国家空间规划体系的建立. 城市规划学刊, (1):6-10.
- 王雪梅, 李新, 马明国. 2004. 基于遥感和 GIS 的人口数据空间化研究进展及案例分析. 遥感技术与应用, 19(5):320-327.
- 吴静. 2008. 人地关系分析的自主体模拟理论框架及其平台开发研究. 华东师范大学.
- 吴良镛. 2001. 人居环境科学导论. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 吴文斌, 杨鹏, 柴崎亮介, 唐华俊, 陈仲新. 2007. 基于 Agent 的土地利用/土地覆盖变化模型的研究进展. 地理科学, 27(4):573-578.
- 徐毅松, 石崧, 范宇. 2009. 新形势下上海市城市总体规划方法论探究. 城市规划学刊, (2):10-15.
- 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. 地理科学, 27(4):542-548.
- 叶笃正. 2009. 全球变化中气候变化的时间尺度及大气中 CO₂ 作用问题. 全球变化与自然灾害——科技与社会面临的挑战会议文集:1.
- 张鸿辉, 曾永年, 金晓斌, 尹长林, 邹滨. 2008. 多智能体城市土地扩张模型及其应用. 地理学报, 63(8):869-881.
- 张伟, 刘毅, 刘洋. 2005. 国外空间规划研究与实践的新动向及对我国的启示. 地理科学进展, 24(3):79-90.

致 谢

我的导师毛其智教授多次与我进行研究工作的深入讨论，论文的研究内容和深度在与他的讨论中逐渐得以完善，毛老师在学习和科研方面对我的言传身教将使我终身受益。

我的副导师沈振江淮教授（日本金泽大学）对我的论文倾注了大量心血，将我 从门外汉带到了规划支持系统的殿堂，让我逐渐有了国际研究视野，并使我深刻了解到“报告”与“论文”的区别，这些都对我日后的科研工作大有裨益。

清华大学的党安荣教授，对我的论文研究给予了持续的大力支持，提出了诸多中肯的建议，并推荐我走向一个个学术舞台。

最后但同样重要，感谢北京市城市规划设计研究院副院长杜立群教授对本论文的重要支撑项目之一“北京城市空间发展模型”给予了很大的支持，并提出了对成果水平提高有作用的宝贵意见。

谨对以上各位老师表示衷心的感谢。

声 明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：_____日 期：_____

附录：图表目录

图目录：

图 3-1 中国城乡规划体系及本文研究对象（总体规划和控制性详细规划）	13
图 3-2 面向空间规划的微观模拟研究框架.....	14
图 3-3 规划师主体（PA）方法基本思路.....	16
图 4-1 Agenter 模型的基础数据库.....	25
图 4-2 反演的微观样本空间分布（部分）	30
图 4-3 计算时间与样本和字段数量的关系图.....	32
图 5-1 BUDEM 模型模拟逻辑.....	36
图 5-2 BUDEM 模拟流程.....	41
图 5-3 BUDEM 模型系统结构.....	43
图 5-4 BUDEM 模型主界面（左：参数设置界面；右：模拟结果界面）	43
图 5-5 BUDEM 模型研究区域.....	44
图 5-6 2006 年模拟结果及中心地区与观察数据对比.....	47
图 5-7 BEIJING2049 基准情景模拟结果.....	48
图 5-8 人口高速增长情景模拟结果 (A1)	49
图 5-9 趋势发展情景模拟结果 (C1)	51
图 5-10 蔓延情景模拟结果 (C2)	51
图 5-11 “葡萄串” 情景模拟结果 (C3)	52
图 5-12 可持续发展情景模拟结果 (C4)	52
图 5-13 根据模拟结果制定的中心城及新城 UGBs 空间分布图.....	55
图 6-1 通勤交通能耗的影响因素分析.....	61
图 6-2 FEE-MAS 模型的模拟流程图.....	62
图 6-3 虚拟城市形态示意图.....	64
图 6-4 总通勤交通出行距离的平均累计值随模拟次数的变化曲线.....	67
图 6-5 <i>dist</i> 变量的概率密度分布及其与正态分布对比图.....	68
图 6-6 某城市形态就业区位选择后的容积率分布.....	69
图 6-7 某城市形态各地块的总出行距离分布图.....	69
图 6-8 虚拟空间内六个典型的城市形态.....	73
图 7-1 北京市的形态情景设置图.....	85
图 7-2 模拟结果与形态情景对比图.....	88
图 8-1 各个历史阶段的的城市形态数据分布.....	96
图 8-2 主要空间变量分布图.....	97
图 8-3 不同时期各 Logistic 回归系数的变化.....	102
图 8-4 各区县的城市规划因素在城市扩展中的作用评价结果图.....	103

表目录:

表 3-1 论文研究结构表.....	19
表 4-1 分布与关系的耦合分析表.....	24
表 4-2 AgentAttrInfo 表.....	26
表 4-3 DA 表	27
表 4-4 DB 表	27
表 4-5 RB 表	28
表 4-6 RB_AGE_MARRIAGE 概率关系表.....	29
表 4-7 北京市部分反演结果.....	30
表 4-8 “EDUCATION” 属性的原始分布与反演样本分布的对比.....	31
表 5-1 BUDEM 模型变量一览.....	38
表 5-2 不同历史阶段的 Logistic 回归系数.....	46
表 5-3 各情景模拟结果对比 (km ²)	53
表 5-4 北京市中心城及各新城 UGBs 统计表.....	56
表 6-1 不同出行方式的能耗和环境影响指标.....	65
表 6-2 模拟结果的统计性描述表.....	68
表 6-3 全局敏感性分析结果表.....	70
表 6-4 不同形状的城市形态及其对应的通勤出行距离模拟结果.....	71
表 6-5 典型城市形态的模拟结果表.....	73
表 7-1 约束性 CA 模型变量及相应数据一览表.....	83
表 7-2 形态情景分析结果 (政策参数)	86
表 8-1 城市规划空间控制成效评估涉及的变量一览表.....	94
表 8-2 北京历次总体规划基本情况表.....	99
表 8-3 规划与实际开发对比示意表.....	99
表 8-4 各时间阶段的回归设置表.....	101

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

1980年5月10日出生于吉林省四平市。

1998年9月考入清华大学环境科学与工程系（2011年更名为“环境学院”），本硕连读，2004年7月研究生毕业并获得工学硕士学位（环境规划与管理方向，优秀硕士毕业生）。

2004年9月至今就职于北京市城市规划设计研究院，高级工程师（2009年至今），多次获得省（部）级奖励。

2008年9月考入清华大学建筑学院在职攻读城市规划与设计专业博士至今。

攻读博士学位以来发表的学术论文

一、已经刊载的学术论文

1. Long Y, Shen Z, Mao Q. 2010. An urban containment planning support system for Beijing. Computers, Environment and Urban Systems, In Press. [DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2011.02.004] (SSCI)
2. Long Y, Shen Z. 2011. An urban model using complex constrained cellular automata: Long-term urban form prediction for Beijing. International Journal of Society Systems Science, 3(1-2):159-173. [DOI: 10.1504/IJSS.2011.038938]
3. 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 胡卓伟. 2011. 城市增长控制规划支持系统: 方法、开发及应用. 城市规划, 35(3):62-71. (中文核心期刊)
4. 龙瀛, 沈振江, 毛其智. 2011. 城市系统微观模拟中的个体数据获取新方法. 地理学报, 66(3):416-426. (中文核心期刊)
5. Long Y, Mao Q. 2010. A constrained CA model for planning simulation incorporating institutional constraints. China City Planning Review, 19(1):17-25.
6. Long Y, Shen Z, Mao Q, Dang A. 2010. Retrieving individuals' attributes using aggregated dataset for urban micro-simulation: A primary exploration. Proceedings of Geoinformatics. [\[DOI:10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567738\]](https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567738) (EI)
7. Long Y, Mao Q, Dang A. 2010. Establishing urban growth boundaries using geosimulation for land use control. Proceedings of 46th ISOCARP Congress.
8. 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 党安荣. 2010. 基于约束性 CA 方法的北京城市形态情景分析. 地理学报, 65(6):643-655. (中文核心期刊)

9. 龙瀛, 毛其智. 2010. 城市规划支持系统的定义、目标和框架. 清华学报, 50(3):335-337. (EI)
10. 龙瀛, 毛其智, 沈振江, 杜立群. 2010. 北京城市空间发展分析模型. 城市与区域规划研究, 3(2):180-212. (中文核心期刊)
11. 龙瀛, 沈振江, 毛其智. 2010. 地块方向: 表征城市形态的新指标. 规划师, 4:25-29. (中文核心期刊)
12. 龙瀛. 2010. 北京市限建区规划. 中国城市科学研究会, 中国城市规划协会, 中国城市规划学会, 中国城市规划设计研究院. 中国城市规划发展报告(2009-2010). 北京: 中国建筑工业出版社:168-177.
13. 龙瀛, 杜立群, 毛其智. 2010. 城市规划空间模拟及政策建议: 以北京为例. 北京: 海峡两岸城市地理信息系统论坛 2010 年会. (宣读论文, 一等奖)
14. 龙瀛. 2010. 城市形态与通勤交通能耗的关系识别. 2010 清华大学博士生专题学术论坛(低碳经济专题). (优秀论文)
15. Long Y, Mao Q, Dang A. 2009. Beijing urban development model: Urban growth analysis and simulation. Tsinghua Science and Technology, 14(6):787-794. [DOI:10.1016/S1007-0214(09)70149-X] (EI)
16. Long Y, Shen Z, Mao Q, Dang A. 2009. Form scenario analysis using constrained CA. Proceedings of the Conference of Computers in Urban Planning and Urban Management.
17. 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 2009. 利用约束性 CA 制定城市增长边界. 地理学报, 64(8):999-1008. (中文核心期刊)
18. 龙瀛, 毛其智. 2009. 城市规划空间形态情景分析. 北京: 全国博士生论坛. (优秀论文)
19. Long Y, Shen Z, Du L, Mao Q, Gao Z. 2008. Complex constrained CA urban model: Long-term urban form prediction for Beijing Metropolitan Area. Proceedings of 44th ISOCARP Congress. (available online at: http://www.isocarp.net/Data/case_studies/1226.pdf)
20. Long Y, Shen, Z, Du L, Mao Q, Gao Z. 2008. BUDEM: An urban growth simulation model using CA for Beijing Metropolitan Area. Proceedings of SPIE, 7143: 71431D. [DOI:10.1117/12.812578] (EI)
21. 龙瀛, 沈振江, 杜立群, 毛其智, 高占平. 2008. 综合约束 CA 城市模型: 规划控制约束及城市增长模拟. 城市规划学刊, 6:83-91. (中文核心期刊)
22. 龙瀛, 沈振江, 杜立群, 毛其智, 高占平. 2008. 北京城市发展模型: 城市发展政策模拟的平台. 中国城市规划年会.

二、尚未刊载, 但已经接到正式录用函的学术论文

1. Long Y, Shen Z, Mao Q. 2011. Retrieving spatial policy parameters from alternative plans using constrained cellular automata and regionalized sensitivity analysis. Environment and Planning B: Planning and Design, Minor revision and tentatively accepted. (SSCI)
2. Long Y, Mao Q, Shen Z. 2011. Urban form, transportation energy consumption and environment impact integrated simulation: A multi-agent model. International Journal of

Society Systems Science, Accepted.

3. Long Y, Shen Z, Mao Q. 2011. A challenge to configure form scenarios for urban growth simulation reflecting institutional implications of land-use policy. In Zhenjiang Shen (ed.) Geospatial Techniques in Urban Planning, Springer, Accepted.
4. Long Y, Shen Z, Mao Q. 2011. Identification of possible land-use policies for planning alternatives using constrained CA. In Zhenjiang Shen (ed.) Geospatial Techniques in Urban Planning, Springer, Accepted.
5. Long Y, Shen Z. 2011. An urban growth control planning support system for the Beijing Metropolis Area. In Zhenjiang Shen (ed.) Geospatial Techniques in Urban Planning, Springer, Accepted.
6. 龙瀛, 毛其智, 杨东峰, 王静文. 2011. 城市形态-交通能耗-环境集成的多智能体模型. 地理学报, 已接受. (中文核心期刊)
7. 龙瀛, 韩昊英, 谷一桢, 沈振江, 毛其智. 2011. 城市总体规划空间控制实施的时空动态评价: 来自城市扩展分析的方法. 地理科学进展, 已接受. (中文核心期刊)

三、其他学术论文

1. Ma Y, Shen Z, Long Y, Kawakami M. 2011. An agent-based approach to support government decision-making of total amount control for household water consumption and waste discharge. International Journal of Society Systems Science, Accepted.
2. Yang D, Yin C, Long Y. 2011. Urban sustainability: Theoretic framework and conceptual models. Planning Theory, Forthcoming. (SSCI)
3. Shen Z, Bian L, Long Y. 2011. A planning support system for retrieving planning alternatives of historical conservation areas from spatial data using GIS. In Zhenjiang Shen (ed.) Geospatial Techniques in Urban Planning, Springer, Accepted.
4. Ma Y, Shen Z, Long Y, Kawakami M, Wang K, Suzuki K. 2010. Urban growth simulation for spatial strategic plan of Chuandong area, China. Proceedings of Geoinformatics. (EI) [\[DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567666\]](https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567666)
5. 杨东峰, 毛其智, 龙瀛. 2010. 迈向可持续的城市: 国际经验解读——从概念到范式. 城市规划学刊, 1:49-57. (中文核心期刊)
6. 韩昊英, 龙瀛. 2010. 绿色还是绿地? 北京市第一道绿化隔离带实施成效研究. 北京规划建设, 3:59-63.

截至 2011 年 4 月 8 日尚有多篇中英文论文审稿或修改中。