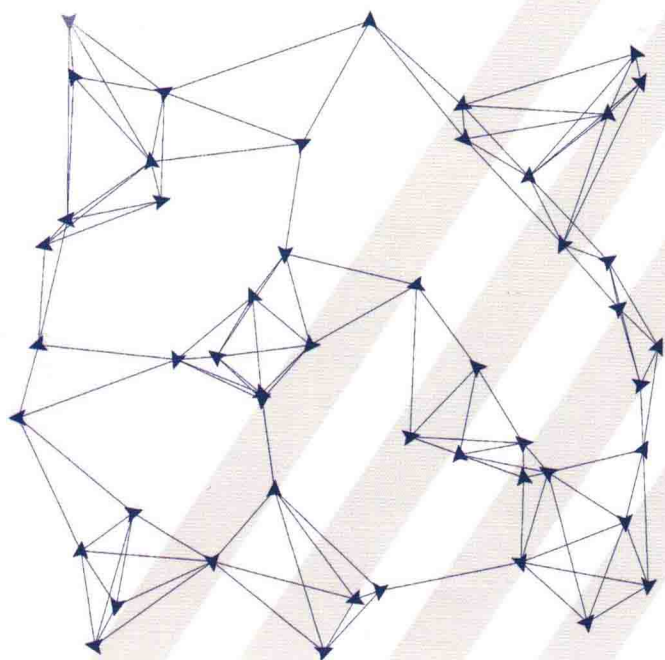


高校城乡规划专业规划推荐教材

# 多代理人模拟： 原理及城市规划应用

朱 玮 编著



中国建筑工业出版社

国家自然科学基金资助项目“基于低精度定位数据的城市尺度时空  
行为可识别性研究”：批准号 41771168

同济大学本科教材出版基金资助  
高校城乡规划专业规划推荐教材

# 多代理人模拟： 原理及城市规划应用

朱 玮 编著



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

多代理人模拟：原理及城市规划应用 / 朱玮编著. —北京：中国建筑工业出版社，2018.7

高校城乡规划专业规划推荐教材

ISBN 978-7-112-22325-1

I. ①多… II. ①朱… III. ①城市规划—计算机模拟—高等学校—教材  
IV. ①TU984-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 123618 号

本书共分为 10 章，包括多代理人模拟与城市规划、NetLogo 体验、NetLogo 模型设计基础、模拟环境、模拟网络、参数标定及系统动力学、作为理论验证的工具——中心地理论在 NetLogo 中的实现及验证、作为模型验证的工具——基于 NetLogo 的商业街消费者行为模型验证、作为情景预估的工具——基于 NetLogo 的上海市域零售业中心体系展望、作为规划设计的工具——基于 NetLogo 的大型展会规划与管理优化等内容。同时，本书包含了模拟实例，能够强化读者对内容的理解和掌握。

本书既可以作为高等院校城乡规划专业教材，亦可为相关领域的管理及技术人员提供参考。

为更好地支持相应课程的教学，我们向采用本书作为教材的教师提供教学课件，有需要者可与出版社联系，邮箱：jgcabpbeijing@163.com。

本书配有若干练习文件，本书的配套资源下载流程：中国建筑工业出版社官网 [www.cabp.com.cn](http://www.cabp.com.cn) → 输入书名或征订号查询 → 点选图书 → 点击配套资源即可下载（重要提示：下载配套资源需注册网站用户并登录）。

责任编辑：杨虹 牟琳琳

责任校对：张颖

高校城乡规划专业规划推荐教材

## 多代理人模拟：原理及城市规划应用

朱玮 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路9号）

各地新华书店、建筑书店经销

北京雅盈中佳图文设计公司制版

北京建筑工业出版社印刷

\*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 字数：254千字

2019年6月第一版 2019年6月第一次印刷

定价：56.00元（赠课件及配套资源）

ISBN 978-7-112-22325-1

(32183)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

## 前言

多代理人模拟 (Multi-Agent Simulation) 是一种通过计算机模仿现实世界中的个体之间、个体与环境之间交互的技术, 在解决复杂、非线性问题上具有独特的优势。从 1990 年代开始, 随着计算机技术的发展, 多代理人模拟迅速渗透到众多的应用领域。然而, 在城市规划领域, 应用多代理人模拟的研究多只见于学术期刊, 相关实践面向公众的机会很少, 因此鲜有系统讲授多代理人模拟技术及其如何与规划结合的书籍。希望本书对弥补这些不足有所贡献。

使用多代理人模拟技术需要具备编程技能, 这往往成为城乡规划专业学生、研究者和实践者的忧虑, 这是完全没有必要的! 多代理人模拟技术的具体实现方式很多, 本书介绍的 NetLogo 是一个学习门槛很低, 同时学习曲线很高, 即很容易掌握的一个多代理人模拟软件。其语法简单、直观、灵活, 对问题的适应性强, 对于规划研究者和实践者来说, 是一个解决复杂规划理论和实践问题的得力工具。我就曾经从构思问题, 到开发 NetLogo 程序, 再到实验并产出具有学术质量的结果, 只花了一个星期的时间。我们也曾用它开发人流模拟软件, 用来支撑和优化实际规划项目, 本书的下篇将介绍这些经验。

多代理人模拟对于规划教育有着很大的潜力。我从 2013 年开始尝试在同济大学城乡规划专业本科课程中讲授 NetLogo, 并逐步开设了一门“城市模拟与规划”课, 取得了很好的教学效果。学生不仅快速掌握了基本模拟技术, 而且在程序设计选题和问题解决手法上均有很多创新, 感到锻炼了逻辑思维、动手能力, 开阔了规划设计的思路, 对城市现象背后的规律性也有了更深刻的认识, 对新方法在城市规划实

践中的作用寄予很多期望。其中最重要的原因是，NetLogo 提供给他们一个创造的平台，打开了一片天地。

对于非规划专业的人员，本书亦可作为了解多代理人模拟和学习 NetLogo 基础技能的练习书和参考书，相信其中的思路和技巧亦能对这些读者有所启发。

本书能够面世，首先感谢同济大学城市规划系王德教授的支持，他从其宝贵的课时中调剂一些给我用作多代理人模拟教学实验，让我逐渐积累了教学经验和信心。同时感谢同济大学城市规划系杨贵庆教授、耿慧志教授给予我课程开设和培育上的支持和关心。我也从学生那里得到了很多的帮助和启发。硕士生张乔扬做了很多富有探索性的程序开发；硕士生魏晓阳参与了书稿的整理工作。最后感谢所有参与了本教学的本科生们，他们的一些有趣而富有创新的成果成为本书的素材，这是对教学相长的一个最好阐释。

朱玮

2017年10月

# 目录

---

- 001 0 多代理人模拟与城市规划
- 002 0.1 什么是模拟
- 003 0.2 什么是多代理人模拟
- 005 0.3 多代理人模拟是如何发展的
- 006 0.4 多代理人模拟对城市规划有什么用
- 007 0.5 本章小结
- 008 0.6 练习

## 上篇 NetLogo 模型开发原理

- 011 1 NetLogo 体验
- 012 1.1 NetLogo 概述
- 013 1.2 NetLogo 编程环境
- 019 1.3 创造一个世界
- 030 1.4 本章小结
- 030 1.5 练习
  
- 031 2 NetLogo 模型设计基础
- 032 2.1 基本概念

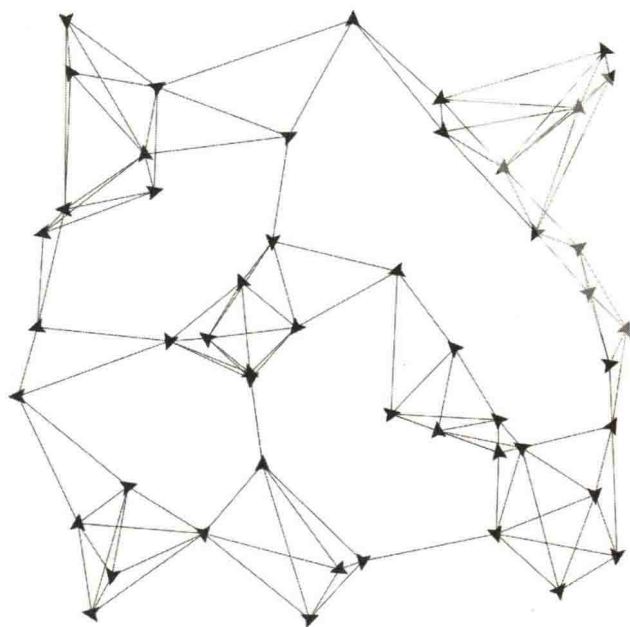
042	2.2	多代理人模型设计方法论
048	2.3	案例解析
054	2.4	本章小结
054	2.5	练习
055	3	模拟环境
056	3.1	嵌块
064	3.2	世界的输出与输入
064	3.3	Bitmap 扩展
065	3.4	案例解析
074	3.5	本章小结
075	3.6	练习
077	4	模拟网络
078	4.1	链接
082	4.2	网络扩展
092	4.3	GIS 扩展
101	4.4	案例解析
109	4.5	本章小结
109	4.6	练习
111	5	参数标定及系统动力学
112	5.1	参数标定
120	5.2	系统动力学模拟
127	5.3	本章小结
127	5.4	练习

## 下篇 NetLogo 的规划应用

131	6	作为理论验证的工具——中心地理论在 NetLogo 中的实现及验证
132	6.1	背景
134	6.2	模拟方法
143	6.3	小结

- 145 7 作为模型验证的工具——基于 NetLogo 的商业街消费者行为模型验证
  - 146 7.1 背景
  - 148 7.2 模拟平台
  - 151 7.3 数据
  - 152 7.4 模拟结果
  - 155 7.5 小结
  
- 157 8 作为情景预估的工具——基于 NetLogo 的上海市域零售业中心体系展望
  - 158 8.1 背景
  - 159 8.2 模拟平台
  - 160 8.3 上海市域零售业中心体系的实证
  - 162 8.4 上海市域零售业中心体系的推演
  - 165 8.5 小结
  
- 167 9 作为规划设计的工具——基于 NetLogo 的大型展会规划与管理优化
  - 168 9.1 背景
  - 169 9.2 园区概况
  - 170 9.3 模拟系统建构
  - 174 9.4 评价指标体系
  - 175 9.5 参观者行为模拟分析与问题辨识
  - 179 9.6 预警与对策
  - 182 9.7 小结
  
- 183 参考文献

# 多代理人模拟 与城市规划



## 0.1 什么是模拟

模拟，又称仿真，指利用模型复现实际系统中发生的本质过程，并通过对系统模型的实验来研究存在的或设计中的系统。当所研究的系统造价昂贵、实验的危险性大或需要很长的时间才能了解系统参数变化所引起的后果时，模拟是一种特别有效的研究手段。

模拟技术得以发展的主要原因，是它所带来的巨大社会效益。1950年代和1960年代模拟主要应用于航空、航天、电力、化工以及其他工业过程控制等工程技术领域。在航空工业方面，采用模拟技术使大型客机的设计和研制周期缩短20%。采用模拟实验代替实弹试验可使实弹试验的次数减少80%。在电力工业方面采用模拟系统对核电站进行调试、维护和排除故障，一年即可收回建造模拟系统的成本。现代模拟技术不仅应用于传统的工程领域，而且日益广泛地应用于社会、经济、生物等领域，如交通控制、城市规划、资源利用、环境污染防治、生产管理、市场预测、世界经济的分析和预测、人口控制等。对于社会经济等系统，很难在真实的系统上进行实验。因此，利用模拟技术来研究这些系统就具有更为重要的意义。

模拟与数值计算、求解方法的区别在于它首先是一种实验技术。模拟过程包括建立模拟模型和进行模拟实验两个主要步骤。模拟技术通过对模型进行调试和计算，并利用测试和计算的结果研究、改进模型的一定方法和技术。它是模型化方法的继续，随着时间数值的增加，一步一步地求解系统动态模型方程。模拟过程中，任何一步

计算所得的即时值，都表示在指定时间内已被模型化了的系统状态。这样，在全段时间内就可以通过对系统的动态模型性能的观测来求得问题的解。

模拟工具主要指的是模拟硬件和模拟软件。模拟硬件中最主要的是计算机。模拟计算机（Analog Computer）的人机交互性好，适合于实时仿真。改变时间比例尺还可实现超实时的模拟。数字计算机（Digital Computer）已成为现代仿真的主要工具。混合计算机把模拟计算机和数字计算机联合在一起工作，充分发挥模拟计算机的高速度和数字计算机的高精度、逻辑运算和存储能力强的优点。但这种系统造价较高，只宜在一些要求严格的系统模拟中使用。除计算机外，模拟硬件还包括一些专用的物理模拟器，如运动模拟器、目标模拟器、负载模拟器、环境模拟器等。模拟软件包括为模拟服务的模拟程序、模拟程序包、模拟语言和以数据库为核心的模拟软件系统。除进一步发展交互式模拟语言和功能更强的模拟软件系统外，另一个重要的趋势是将模拟技术和人工智能结合起来，产生具有专家系统功能的模拟软件。

## 0.2 什么是多代理人模拟

多代理人模拟（Multi-Agent Simulation, MAS；或 Agent-Based Modeling, ABM）是在一个由多个代理人（Agent）和环境所构成的系统中，对代理人之间以及代理人与环境之间交互的模拟。代理人是一个自主的个人或者物件，其具有特定的属性、行为，甚至目标。环境是代理人所处的空间，可以代表实在的地理空间，也可以代表虚拟的网络空间等。代理人之间、代理人与环境之间的交互可以非常复杂，可以随时间演化，包括在特定时间决定采用哪种交互的策略。交互伴随着信息交换，其结果是代理人和环境的状态得以更新，或采取进一步的行动。

例如，模拟由狼群、羊群、草地构成的多代理人系统（图 0-1），狼和羊就是代理人，草地就是环境。狼和羊在草地上随机地移动（代理人行为），相遇时，狼吃掉羊（代理人交互），获得能量（代理人属性），羊即死亡（代理人行为）；羊通过吃草（代理人-环境交互）获得能量；草可再生（环境行为），狼和羊亦可根据能量进行繁殖（代理人行为）。模拟这个多代理人环境即可动态地观察在特定参数设定下，这个虚拟生态系统的演化过程。

一个多代理人系统具有以下特性：①自主性，代理人是独立的个体（至少是部分独立的），拥有个体属性，能够自我感知、判断决策、采取行动；②局部性，代理人不具有全局视野，也不能获得所有的信息，通常只与其“邻近”的代理人或者环境交互，这里的邻近可以是空间上的接近，亦可以是联系上的紧密；③分散性，代理人各自行事，没有一个专门掌控全局的代理人；④涌现性（Emergence），系统的

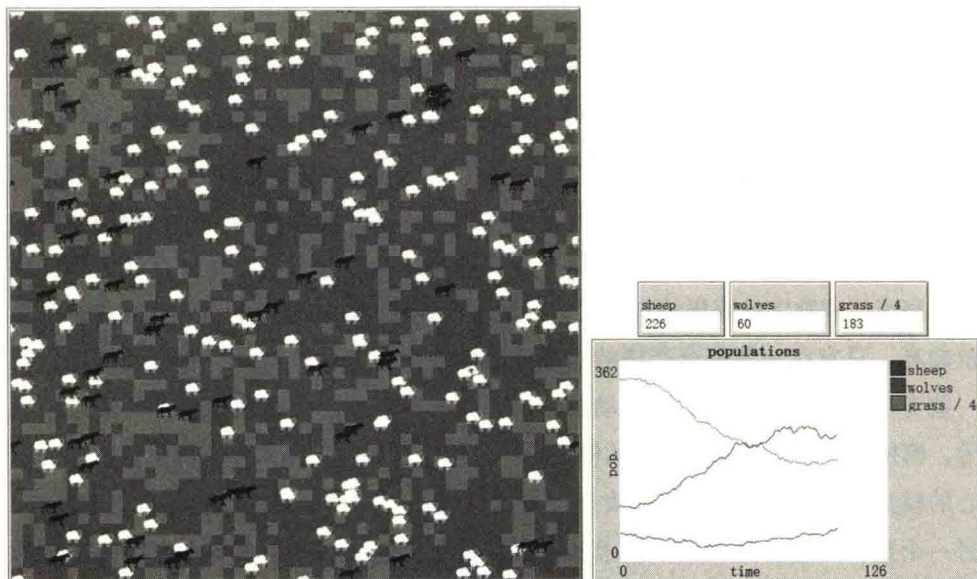


图 0-1 狼、羊、草地构成的多代理人系统

(来源：NetLogo 模型库)

整体属性、行为、结构经由代理人之间、代理人与环境之间的交互而显现，但代理人本身并不具备这样的整体属性、行为和结构，就如狼和羊的动态平衡并不是个体狼和羊的行为机制。涌现是复杂系统（Complex System）理论中的核心概念，因此，多代理人系统也是一种复杂系统。

多代理人系统的这种特性，使得多代理人模拟相比于基于方程的模拟（Equation-Based Simulation, EBS）具有一些显著的优势：① MAS 可以模拟异质性很高的群体，而 EBS 通常必须假定模拟对象的同质性；② MAS 不需要用户知道个体行为导致的全局结果是怎样的，只需要知道代理人及环境的行为规则，这些规则可以很简单，甚至仅仅来自于常识；而 EBS 要求用户对整体行为及其规律有很好地理解，通常需要较高的数学概括、推演和表达能力；③有趣的是，正因为 MAS 的规则简单明确，用户可以设定很多不同的规则，建立复杂的动态系统；而 EBS 因为方程模型在形式、可解性等方面的限制，不得不对模型加以假定、简化而导致更多失真；④ MAS 可以方便地纳入各种形式随机过程，而 EBS 模型往往是决定性的，或者推导随机过程的结果，但只能限于几种便于积分的概率分布；⑤通过 MAS，可以同时考察系统整体的行为以及单个代理人的行为。不过 MAS 的一个相对劣势就是运算量较大，模拟成千上万的代理人行为来考察涌现的集合现象的计算成本，远高于求解一个微分方程。另一个缺点就是需要掌握的模型参数可能较多，验证模型可靠性的要求更高；而 EBS 模型更加简洁，因为假定或忽略了一些中间的过程。总的来说，多代理人模拟更加适用于解决具有高度异质性的复杂问题。

### 0.3 多代理人模拟是如何发展的

多代理人模拟的理念出现在 1940 年代后期,但由于需要密集的计算,直到 1990 年代才开始普及。

多代理人模拟的历史可以追溯到冯·诺依曼机器(The Von Neumann Machine),该机器遵循精确的详细说明来制作自己的副本。诺依曼的朋友斯坦尼斯瓦夫·乌拉姆(Stanislaw Ulam)建议将机器构建在图纸上,作为网格上的单元格集合;诺依曼基于此创造出了第一个后来被称为元胞自动机(Cellular Automata, CA)的设备。数学家约翰·康威(John Conway)在此基础上构建了著名的“生命游戏”(Game of Life),它在一个二维棋盘形式的虚拟世界中以极其简单的规则运行。托马斯·谢林(Thomas Schelling)的隔离模型是最早的多代理人概念模型之一,出现在 1971 年的“分离动态模型”论文中(Schelling, 1971)。虽然谢林最初使用硬币和图纸而不是计算机作为模拟的工具,但该模型包含了自主的代理人在共享环境中交互并产生集合、涌现结果的基本概念。

在 1980 年代初,罗伯特·阿克塞罗德(Robert Axelrod)主办了“囚徒困境”战略比赛,以代理人的方式进行交互并决出胜者,后续在政治学领域开发了从民族中心主义到文化传播的许多其他多代理人模型。1980 年代后期,克雷格·雷诺兹(Craig Reynolds)对鸟群的研究是早期具有社会学意义的生物学多代理人模型的典型。他试图模拟现实的生物,也就是克里斯托弗·兰顿(Christopher Langton)提出的人工生命(Artificial Life)概念。

从 1990 年代开始,多代理人模拟进入快速发展时期。随着 1990 年 StarLogo、1990 年代中期的 Swarm 和 NetLogo、2000 年的 RePast 和 AnyLogic、2007 年的 GAMA,以及一些定制代码的出现,多代理人建模软件越来越丰富,应用范围越来越广泛。

多代理人模拟在社会科学领域的发展尤为显著,被用于模拟和探索社会现象的作用,如季节性迁移、污染、有性生殖、战斗、疾病乃至文化传播,探讨社会网络 and 文化的协同演化。也是在 1990 年代,奈杰尔·吉尔伯特(Nigel Gilbert)出版了第一本社会模拟教科书(Gilbert and Troitzsch, 1999)和人工社会与社会模拟期刊(JASSS)。此外,还有综合自适应系统建模期刊(CASM)收录任何领域的多代理人模拟研究。

在生物学领域中,多代理人模拟已广泛应用于分析流行病的传播和生物武器的威胁、人口、植被、文明演变分析、人体组织形态、炎症和免疫系统的模拟等;还被用于开发临床决策支持系统,如乳腺癌等;在早期临床研究中用于建立药理学系统,以及用于分子水平的生物系统研究。

在计算机科学领域，多代理人模拟被应用于模拟信息传递、社交网络传播以及无线传感器网络等。在金融危机中，多代理人模拟成为经济分析的工具，模拟极其复杂的金融环境中的不稳定经济体，构建基于微观基础的市场模型。多代理人模拟亦被用以解决各种业务和技术问题，包括组织行为和认知建模、团队合作模拟、供应链物流优化、消费者行为模型、人力管理和投资组合管理以及交通拥堵分析。

## 0.4 多代理人模拟对城市规划有什么用

城市规划是人类为了在城市的发展中维持公共生活的空间秩序而作的未来空间安排（吴志强，李德华，2010）。对照模拟的概念，城市规划的本质就是模拟，因为未来只有通过模型来表现，这模型就是规划方案，形式包括用地规划图纸、建筑模型、人口测算公式、交通仿真系统等；而规划师反复对规划方案的优化过程就是对模型的实验过程。

城市又是一个高度异质的复杂系统，大量具有不同属性、习惯、需求、偏好的居民在城市中生活，人与人之间、人与空间之间时刻发生着大量的交互（图 0-2），为此规划需要在城市空间中合理安排居住、工业、公共服务、交通、基础设施，尽可能地满足居民的需求，提高其生活品质。经过长期的实践和研究积累，城市规划在总体上以及各个系统之内，形成了规划原则、规范、标准、原理来指导规划实践，保证规划方案满足基本的需求，不出现大的问题。但对实现更加精准的目标，对规

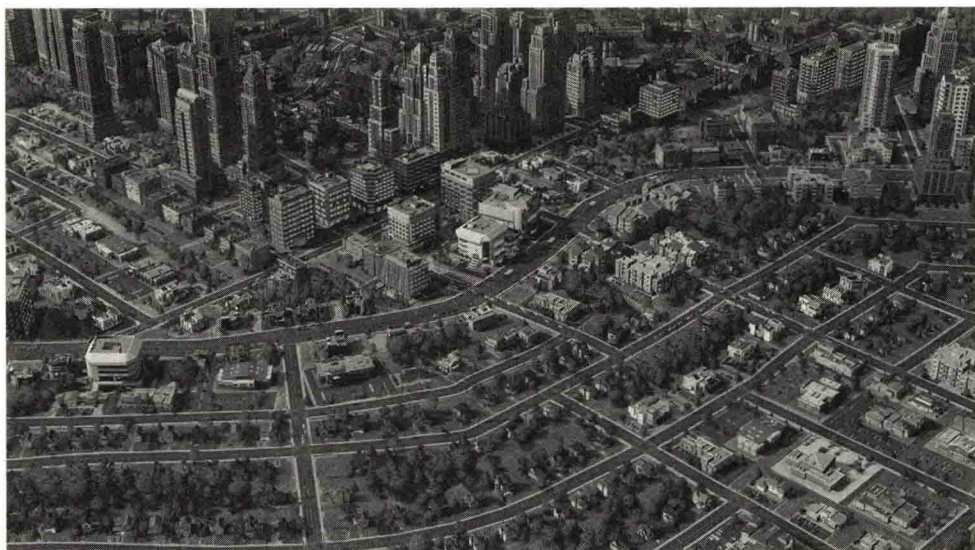


图 0-2 “模拟城市”（SimCity）游戏模拟了城市中的复杂交互

（来源：simcity.com）

划效果的估计达到特定个人或人群，对不同系统规划形成的叠合效应进行预估，对不同空间层次规划效果的同时考察，对以上方面动态效果进行预判，一般的规划方法就难以做到，而这正是多代理人模拟的强项，并且往往通过自下而上的视角。

多代理人模拟在城市规划与研究中被广泛应用于模拟各类城市元素，例如人、土地、建筑、车辆，通过模拟来研究城市发展中社会经济活动的动态特征，对规划设计进行评估优化。多代理人模拟可以较高的精度模拟城市土地利用变化，用来研究城市空间布局特征和规律（周淑丽等，2014；刘润姣等，2016）；也可以应用于城市内部子系统的模拟，如通过模拟商业中心和消费者的互动推演零售业中心体系的演化（朱玮，王德，2011；朱玮等，2014）。优化城市整体层面的居住空间布局以及居住区内部建筑布局也可以通过多代理人模拟实现，对应方法包括模拟居民对居住空间的区位选择决策过程，以及模拟居住区建筑对日照的影响（刘慧杰，吉国华，2009；刘小平等，2010）。城市交通规划运用多代理人模拟可以模拟车辆和行人动态及互动、交叉口车流、交通拥堵等各类复杂状况，以评估交通规划方案或优化交通体系（余沛等，2010；刘小鼎等，2011；罗来平等，2015）。此外，多代理人模拟还被用于规划大人流空间，如商业区和展区，通过模拟个人时空轨迹来评估和优化规划方案（朱玮等，2009；王德等，2015）。

## 0.5 本章小结

模拟是城市规划的本质，城市又是一个高度异质的复杂系统，这些特质与多代理人模拟擅长解决高度异质性复杂问题的特点自然契合。将多代理人模拟应用于城市规划，能够使得对规划问题的解决更加精准、更多层次、更多维度、更动态化、更以人为本。

本书分为上下两篇。上篇集中讲授多代理人模拟软件 NetLogo 的程序编写原理和技巧。NetLogo 是一个开源、灵活性高、适用性广、操作简单易学的多代理人模拟环境，对空间和行为的模拟尤为方便，它也继承了多代理人模拟直观、机制简单的特性，不要求用户具有非常好的数学知识和技能，只需要具有对模拟对象的常识和系统的思维。本书针对城市规划的需求，组织了相应的内容进行介绍。第 1 章通过一个多代理人模型案例，使读者对多代理人模拟方法和 NetLogo 建立感性认识；第 2 章系统性地讲述 NetLogo 模型开发的概念和方法论，建立必要的基础；第 3 章讲述模拟空间环境的基础方法，以及如何模拟活动代理人与环境的交互；第 4 章讲述更高级的网络空间模拟方法，以及 NetLogo 如何与地理信息系统（GIS）对接；第 5 章讲述用参数空间功能来研究模型机制的方法，以及如何用系统动力学模块来模拟集合过程。

下篇例举应用 NetLogo 多代理人模拟的城市和规划研究，通过分析研究的思路、讲解模拟方法的重点，启发读者，加深对活用多代理人模拟技术的体会。第 6 章以中心地理论的验证为例，展示多代理人模拟如何作为验证理论的工具；第 7 章以上海南京东路消费者行为模拟为例，展示多代理人模拟如何作为验证模型的工具；第 8 章以模拟预测上海市商业中心体系为例，展示多代理人模拟如何作为规划情景预估的工具；第 9 章以青岛世园会参观行为模拟为例，展示多代理人模拟如何作为规划设计的辅助工具。

需要提醒的是，本书并不能替代 NetLogo 操作手册，而是专注于介绍城市规划应用视角下 NetLogo 模型设计的基础知识和技能。读者仍需要经常参考 NetLogo 用户手册来熟悉更多和更深入的程序语法和编程规则。好在 NetLogo 语言不复杂，常用的命令和语法比较集中，所以要编写出好的多代理人模型主要还靠使用者经常地练习并学习他人的模型，熟能生巧。

最后，对本书中经常出现的一些特定表达样式的含义进行说明：

*首次出现的关键概念*，用斜体加粗表达。

■ 此图标表示需要读者完成的任务。

■ 此图标表示程序的代码以及相应的注释或结果。

## 0.6 练习

(1) 根据你的学习、研究、实践经历，你认为城市规划、城市研究中的哪些问题，相对于其他方法，更适合用多代理人模拟的方法来解决？图 0-3 提供了往年的学生模拟作业视频以供参考。

(2) 多代理人模拟方法在解决这些问题上的相对优势和劣势有哪些？

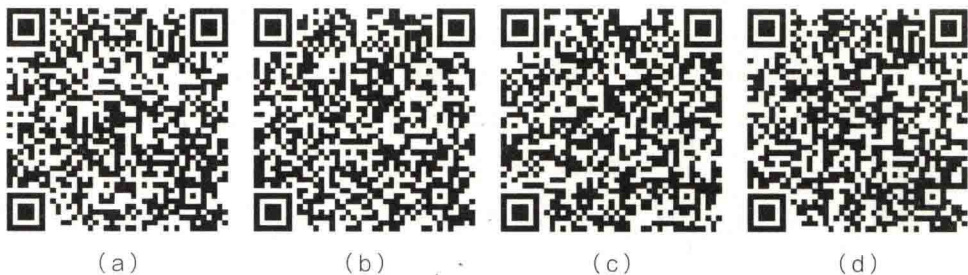


图 0-3 学生模拟作业视频（微信稿）

(a) 2016 年 (1); (b) 2016 年 (2); (c) 2017 年 (1); (d) 2017 年 (2)

多代理人模拟：  
原理及城市规划应用



上篇

# NetLogo 模型开发原理

