

文章编号: 1000-0585(2002)01-0079-10

复杂性科学理论与区域空间演化模拟研究

薛 领, 杨开忠

(北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

摘要: 针对传统上两类模拟区域空间演化的模型策略, 着重讨论了它们的建模思想和手段, 在此基础上介绍了复杂性 (Complexity) 研究的重要成果——复杂适应系统 (CAS) 理论的基本概念以及 CAS 模型的思想, 探讨了区域作为复杂适应系统的一般特征, 并且通过一个城市空间演化的概念模型阐述了 CAS 模型的技术问题及其建模的独到之处。

关键词: 区域; CAS; 主体; 模型; 模拟

中图分类号: N941.4 **文献标识码:** A

1 前言

20 世纪 80 年代以来, 区域科学的研究正由静态的、均衡的范式逐渐向一种动态演化的范式转变, 开始应用复杂性科学 (Sciences of Complexity) 的理论和方法来研究和分析区域问题及其时空演化的内在规律, 内容涉及城市和区域系统内不同层次上的结构和功能以及在相应空间上的动态格局。开放系统、自组织、混沌和演化理论等一些新的模拟模型, 诸如空间系统的非线性微分方程、细胞自动机、分形、人工神经网络、多主体模型等等逐渐被城市和区域研究者认识和应用, 并且日益成为当代跨学科研究的热点和前沿。

采用模拟模型的方法研究城市和区域发展及其空间结构的演化具有悠久的历史。这一传统可以追溯到 Hagerstrand 对空间扩散过程的研究。70 年代产生了大量的空间模型, 其中的绝大多数本质上属于经验类的拟合。80 年代以来, 这方面的理论和建模有了长足的发展。例如, Allen 和 Sanglier 模拟了城市等级体系作为自组织系统的进化过程, 取得了很大的突破。Batty 根从据有限扩散集聚 (DLA) 过程模拟城市生态和城市扩张。Krugman 等人在积极倡导“新经济地理学”的同时也强调利用新的模型策略和计算机模拟研究空间问题的重要性。

本文不准备穷尽地勾勒复杂科学理论和方法在城市与区域研究中所取得的丰硕的富有创新的成果以及未来的发展趋势, 希望将目光集中在这些新理论和方法的本身, 探究各类模拟模型在城市和区域空间演化研究中的应用前景以及可能的途径, 着重讨论它们建模的思想和手段, 并在此基础上介绍作为复杂性科学研究的重要组成部分——复杂适应系统

收稿日期: 2001-09-28; 修订日期: 2001-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目区域复杂空间格局演化规律的研究 (49971027)

作者简介: 薛领 (1969-), 男, 辽宁省兴城人, 博士研究生。主要研究方向为区域经济与空间复杂性。

(Complex Adaptive System, CAS) 理论, 并且进一步阐述 CAS 模型的技术问题和建模思路的独到之处。

2 区域空间演化模拟研究中的两种策略

2.1 “自上而下”的模型策略

非线性和开放动态系统的研究成果为更好地理解城市和区域发展及其空间结构提供了一个变通的方法^[1]。非线性微分方程(组)在许多方面体现了城市和区域系统的空间动力学特性^[2], 同时大多数这样的模型最初基本上源于类比物理学、化学中的自组织现象^[3], 从而形成所谓社会(经济)物理学模型。60年代, Lowry 模型具有跨时代的意义, 后来的许多模型基本上都是该模型的动态扩展。以 Wilson 和 Allen 等人为代表的城市空间动力学模型进一步将城市和区域理论的许多研究成果, 诸如集聚经济理论、市场供求理论、人口增长理论、空间相互作用理论等等整合到统一的空间动力学框架中^[1,4]。这类模型能够表现城市之中各个经济主体(依赖于不同的参数和初始条件)的互作是如何自发地产生出城市和区域空间结构的多样性, 也有力地展示了由于非线性相互作用导致的城市和区域空间结构的突现(emergence)特性。Allen 等人的贡献在于清晰地建立了某些参数的临界值与城市空间结构之间的关系。80年代以后进一步产生了一些更为复杂的模型^[5~7], 这些模型关注城市增长的供给和需求, 甚至模拟不同的收入阶层不同的社会经济行为。近年来, 针对空间集聚和城市演化而构建的空间自组织模型, 注重考察决定集聚和扩散力量的相互作用, 所构建的模型基本上也属于上述类型, 而且更加关注宏观经济的微观机制^[8,9]。

总之, 非线性微分方程模型简洁、直观, 可以清晰表现确定性方程的内在随机性, 在一定程度上能够重复检验各种设定的条件。但是这样的模型自身也存在一些局限: 它们将空间距离视为各向同性, 忽略了地理差异, 在表现空间相互作用的多样性和协作方面勉为其难, 而且很难同时考虑两个或两个以上的城市和区域的空间尺度问题, 也不大可能利用定性的知识, 特别是表征在不断演化中产生的新的区域和城市的功能方面无能为力^[10], 也就是说, 新突现的空间结构和内在属性和已经存在的区域没有什么差别^[11]。

另外, 协同学中的主方程模型由于其将微观上个人的状态转移概率和描绘宏观结构的某些变量联系起来也引起了一些学者的兴趣^[12,13]。然而这类方程在处理上比较困难, 其实用性也值得探讨。在自组织理论中, Litka-Volterra 生态模型是合作与竞争的生动典型, 尤其是适者生存的法则和生存与资源的矛盾等重要问题在模型中能够很好地体现。Dendrinos 等人利用城市人口和人均收入来替代物种变量对 Litka-Volterra 模型进行了地理学意义的改造^[14]。Orishimo 以及 Zhang 等人利用该模型重现了前城市化、城市化、反城市化、再城市化等周期运动过程^[15,16]。还有的一些模型试图利用 Thom 的突变理论来分析和描绘区域和城市增长的不连续性^[17,18]。不过, 由于突变理论本身的限制, 仅仅几个变量和参数很难深刻地揭示城市和区域空间结构以及空间相互作用规律。

2.2 “自下而上”的模型策略

这类空间演化模型首先确定空间相互作用的局部规则(local rules), 然后观察和研究出现的宏观行为特征。细胞自动机(Cell Automata, CA)就是一种模拟城市和区域系统

比较有前景的框架^[19~21]。基于 CA 的研究近年来广泛成为利用复杂性科学理论分析城市和区域空间结构的理想切入点^[22~24]。CA 作为天然的空间离散动力学模型，在模拟过程中能够动态显示区域的空间演变过程，可视化程度高，灵活性和透明度也比较好，而且可以并行计算。更重要的是，CA 的特点体现了复杂性科学的一个重要观点：局部规则 (local rules) 导致系统全局变化 (global change)，即有序行为和自组织的出现。CA 的不同的局部规则能够“导演”出丰富的空间图景，有的甚至可以逼真地模拟区域和城市空间结构的演化^[25]。这些模型可以扩展到模拟真实的城市，不过并非致力于预测城市发展的精确形式，而在探究城市发展过程中不同形式的可能性方面更有价值^[1]。然而，整个区域宏观上复杂的空间结构仅仅决定于简单的局部规则未免令人怀疑，况且这些规则多半是经验性的。事实上，总体的、宏观的管制、规划及各项决策对区域的空间结构的形成的作用也不能忽视，因此，宏观规划与微观决策如何整合到统一的模型中成了对 CA 模型的一个挑战。

利用分形 (fractal) 理论研究城市和区域空间结构为我们提供了一种新的视野，其历史可追溯到本世纪初的城市统计分析^[26]，但最早直接运用分形几何思想考察城市位序—规模法则 (rank-size rule) 的正是分形理论的创始人^[27]。其它一些探讨还包括中心地等级体系的分形特征以及城镇规模分布的分形维度等等^[28,29]。分形增长在城市和区域空间动态演变中的应用不仅改变了以往地理空间的形态描绘方式，而且对进一步理解各种空间结构起源的内在机制方面也有所帮助^[30]。但是，分形理论主要用于计算复杂空间的分维，分维究竟能给我们提供多少更有价值的信息尚待进一步探讨，而且一个复杂系统的空间结构动态演化仅仅用分维来表述是不够的。

3 基于 CAS 的区域空间演化模拟模型的探讨

非线性微分方程 (组) 的动态模型将居住区、商业区及工业区机械地划分，空间中某一小子区域的人口密度、市场规模、就业数量、产品价格、运输费用等等社会经济指标基本上属于宏观变量。其策略就是通过各个变量和空间的动态关系来间接地反映空间结构的变化。这类连续动力学模型只考虑系统的宏观特征，并不处理在现实生活中微观经济主体经常遇到的诸如获取信息、选择、交易以及空间决策等过程。模型中所假设的经济人 (economic man) 掌握完全充分的信息 (perfect information)，以稳定的选择水平正确地进行决策，整个空间系统的交易费用为零，能够达到最优化资源配置。显然，以纯理性的假设为基础发展起来的区域空间演化模型与现实世界的事实还存在相当的差距，“纯理性”这样一个不现实的前提削弱了许多研究结论的有效性。

备受青睐的 CA 这类离散动力学模型强调了空间的微观相互作用，但企业、居民等等能动的“主体”在模型中似乎隔着一层面纱在起作用，空间上某个网格的状态 (土地开发、居住模式、商业发展等) 取决于邻域的状态和转化规则而不是居民、企业等等直接的社会经济行为。那么，为什么不直接考虑利用区域中大量微观能动的主体的局部决策和相互作用来模拟和表达区域宏观上的演化过程呢？宏观的变化对微观上的主体反馈和约束如何促进他们自身的适应性调整呢？这种微观和宏观不同尺度的关系问题逐渐成为当前区域空间复杂性研究所关注的焦点。

3.1 CAS与区域系统分析

近年来,许多学者从生命系统中受到启发,由纯粹的动力学框架向自然演化的概念转变,试图借鉴进化理论和生态学领域的知识来探索复杂系统的演化规律。90年代初Holland等人在多年研究的基础上,提出了关于CAS比较完整的理论^[31,32],并且用CAS的观点来概括诸如细胞、人脑、免疫系统、生态系统、蚂蚁群以及人类社会中的经济、政党、组织等等复杂系统的一般性特征。Holland将系统中的成员称为具有适应性的主体(adaptive agent),简称为主体。“适应性”的概念来自生命科学,主要指生物体在外部环境和条件变化的情况下,保持生物内部环境稳定和生理状态正常的性能的过程。Holland将“适应性”的范围扩大到把学习和相关的过程也包括进来。尽管不同的CAS具有不同的时间尺度,但“适应”可应用于所有的主体,也就是说主体能够与环境以及其它主体进行交流,在这种交流的过程中“学习”或“积累经验”,并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。主体的适应性是整个系统的演变或进化,包括新层次的产生,分化和多样性的出现,新聚合而成的、更大的主体的出现等等的基础和根本。对这样一种处于某种环境内的共同演化的系统来说,没有任何事情固定不变,而且在这样一个永远处于变化的CAS中讨论均衡并没有什么意义。CAS的本质就在于其进化过程中突现的永恒的新奇性。正是由于适应行为而导致的复杂性,阻碍了当今世界许多重大问题的解决^[33]。

从CAS的角度来看,区域系统的空间过程由大量分散的、不同的主体间并行地相互作用所决定。这些主体可能是居民、企业、政府、各类组织等等,甚至可以是城市或者区域本身,其中任何一个主体的行动都与其他一些主体的社会经济以及空间行为相关。城市和区域系统是一种复杂适应系统,空间演化则是由大量微观主体(居民、企业、各类组织等)及其相互之间的非线性互动互作在时间和空间不同尺度上持续累加引发的空间自组织过程。系统中各种能动的主体是最积极的因素,他们在微观上的相互作用持续地创造出地理的差异和空间的结构,而且这些主体能够在相互作用中不断积累经验,不断调整,共同进化。由这些不同的适应性主体共同产生的环境从整体上说也在不断地变化和适应,表现在旧的相互关系的消失和新的相互关系的产生——创新。在这样一个不断创新的环境中,空间演化也就不一定导致最优,而是一种动态均衡。

3.2 区域CAS模型的特点和建模过程

CAS理论表明,我们可以通过模拟异质性的个体决策者的社会经济以及空间行为来表达区域空间结构的总量特征,如人口的密度、规模,企业的空间集聚等等。因此,CAS模型不需要以一个或一组方程的形式来体现系统中的各种内生关系,而是采取多主体(multi-agent)的模型框架。CAS模型属于“自下而上”的微观模拟策略,关注的是系统中大量个体间的交互行为,这些行为可以是不同个体之间的直接关系,也可以是许多个体在共同环境下的间接关系。非线性方程(组)一般代表区域系统宏观变量(如人口、GDP等)之间的动态关系,所反映的社会、经济乃至空间关系虽然源于系统内部诸多个体间的一系列连锁互动行为所导致的,但是这些微观行为没有在这种建模方法中清晰地表现出来。当然,CAS在模型中单个主体的行为决策常常需要通过数学方程表达,而且可以根据空间局部信息(当地企业、居民、政府的直接作用)和全局信息(城市和区域的宏观社会经济变化信息作为反馈和约束)驱动。CAS模型抛弃了完美的经济人假设,主体可以使用某种学习算法来模拟主体的有限理性行为。某些非线性因素,诸如政策、法规的影响也可以显性地模拟出来。因此,CAS模型基于进化和适应行为,强调非均衡的发展路径,我们必须为个别的决策者建立微观行为模型,并且通过观察这些数量众多的微观主体

的相互作用来研究宏观上整个区域的空间演化过程。

在具体分析和表达区域空间系统时, CAS 模型展现出许多传统模型不可比拟的优势。首先, CAS 模型尽量模拟现实区域中的居民、企业等主体的实际行为, 因此模型更加直观也容易理解。其次, 由于模仿的是现实可见的社会经济行为, 在模型中直接表达各个主体的各种行为及其相互关系, 不必研究分析整个系统背后蕴藏的数学方程。第三, CAS 模型中的微观主体可以通过适应性的学习过程对于做出更好的行为决策, 以有限理性取代传统的完全理性来描述社会经济主体的行为决策。第四, CAS 模型既可以表达微观主体的行为变化, 而且这些主体的社会经济属性的集合就是整个区域系统宏观的可观察属性, 比如单个企业与企业的总量, 单个企业的产品价格与区域平均的产品价格等等。因此, 微观和宏观的相互关系可以通过这种模拟方法自下而上地体现出来。基于以上分析, 我们给出一个未考虑外部需求的一个简单的城市 CAS 空间模型的概念框架, 其中包括家庭、企业以及政府等主体。当然该模型仅仅是一个原型, 具有很大的扩展潜力 (图 1)。

在该模型中, 空间可以是 $n \times n$ 的 2 维网格, 所模拟的对象主要包括: 家庭、厂商和政府。这三类主体分别在劳动力市场和产品市场上发生雇用和买卖交易。在模型中, 劳动力来自家庭, 厂商根据库存与需求的状况决定其劳动力的需求, 同时政府也雇用少量的劳动力。在产品市场上, 所有厂商生产同样的产品, 消费者根据各个厂商产品的价格和到自己居住地的距离来选择某一个厂商, 购买量取决于家庭的规模。厂商将选择能够获取最大利润的地点进行生产, 而家庭则在生活成本 (购物成本 + 空间成本) 最低的地点选择居住。企业和家庭空间决策的时间尺度不同, 因此我们适当以相对长的时间段来模拟各个经济主体的微观区位活动在时间维的累积和在空间维的集聚过程。另外, 政府负责企业税收也为居民提供福利, 并且根据财政状况进行道路交通设施的投资建设。每一年将有一些新的居民和厂商迁移到该地区 (初始空间分布随机), 同时也有破产的居民和厂商从该地区消失。另外, 该地区某一点的土地价值的动态变化情况根据邻域内租赁者的经济状况以及交通状况决定。另外, 我们还可以利用 CA 来表达城市的空间增长过程。

总之, 我们可以通过观察区域系统微观层面的个体社会经济以及空间行为来分析宏观上空间结构的变化, 研究空间集聚或分散的内在规律。在 CAS 模型中, 主体具备不断获取各种可观察属性 (宏观和微观) 的行为, 宏观变量的演化过程能够从基于 CAS 的模型中突现出来。可以说, 传统的非线性方程是一种变量驱动的动力学方程, 而 CAS 模型则面向个体, 将个体的知识和相应的行为封装起来, 这一点与面向对象的软件设计思想比较类似。上述的 CAS 空间模型可以利用标准软件模拟平台开发实现。在目前国际上的几种支持软件中, 由人工生命的提出者 Longdon 领导研制的 SWARM 软件类库比较流行。这个标准的 GNU 软件模拟平台包括许多可重用的类以支持计算机模拟实验的进程控制、参数调整、数据分析以及图形显示。用户利用 SWARM 提供的类库构建相关领域的 CAS 模拟系统, 系统中的各个主体通过离散事件相互作用, 相应的调度机制保证了模拟过程中各个时间步骤依次得到执行, 并且支持按照随机的序列方式调用各种主体类的多个实例。作者目前正在利用 SWARM 从事城市空间演化模型的开发工作, 模型的详细内容和模拟结果将另外撰文表述。

3.3 关于主体 (agent) 的进一步讨论

一般而言, 主体代表一种真实的或抽象的实体 (entity), 它们即可以相互作用又可以与环境相互作用。众多主体可以在一个环境中共同生存, 每个主体都能够主动地、自治地活动, 它们的行为是自身感知、推理、决策以及和其它主体、环境互动互作的结果。通常一个主体需要具有能动性 (Activity)、自治性 (Autonomy)、相互作用 (interaction)、社

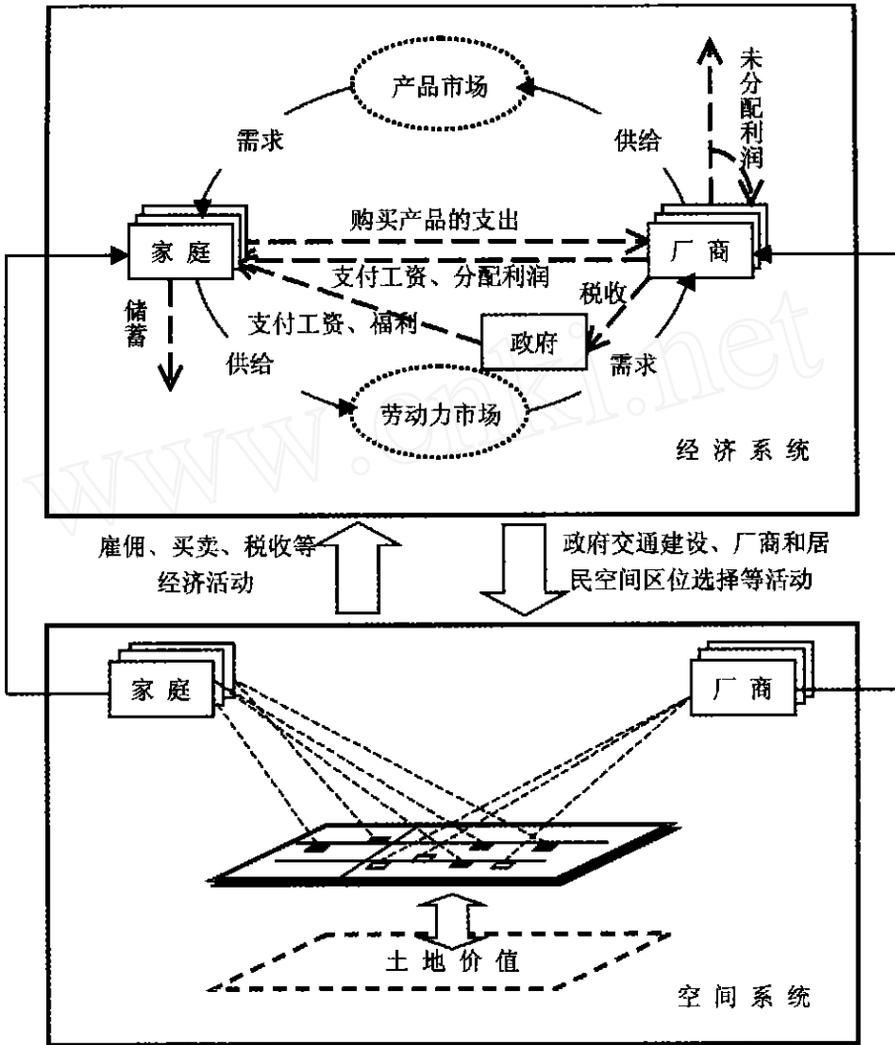


图 1 城市空间演化模型的概念框架

Fig. 1 A conceptual model of urban spatial evolution

会能力 (Social Ability)、响应性 (Responsiveness) 等特征^[34,35]。在分布式人工智能领域,相当一部分人对主体作出更加拟人的要求,如在前述概念基础上再加上信念、责任、承诺等精神状态方面的描述。

主体可以定义为从感知序列到动作序列的映射,大体可以分为三类:反应主体、认知主体和复合主体^[35]。基于主体的模型不仅在并程序序设计、计算机通信、网络管理与控制等方面有很高的应用价值,而且为研究城市和区域系统空间演化规律方面提供了新的模拟思想。从技术上说,主体建模的优势非常明显:

一、开放性:一方面,各个领域的知识都能够以规则的形式显示或隐式地表达在主体之中,实现各种专题模型。另一方面,模型还能够集成经济、社会、地理、生态等等多学科领域的知识,这样可以使我们在考察区域和城市发展过程时不仅仅将目光集中在经济维度,而能够更全面地理解和认识复杂系统的演化规律。

二、灵活性：主体中的规则（知识）可以灵活调整、增删，其知识表达可以是显性的（如产生式系统）也可以是隐性的（如神经网络），还可以利用 Holland 建立的基于遗传算法的分类器系统。Holland 等人利用分类器系统模拟了一些具有有限推理能力的经济主体，经过演化，这些主体都发展到能根据一个简单商品市场的动向采取行动的程度^[36]。

在模拟主体的学习机制和适应性方面，Holland 提出的分类器系统比较典型^[37]，其中的规则不是传统的规则集合，而是以遗传算法操纵的内部实体（图 2）。

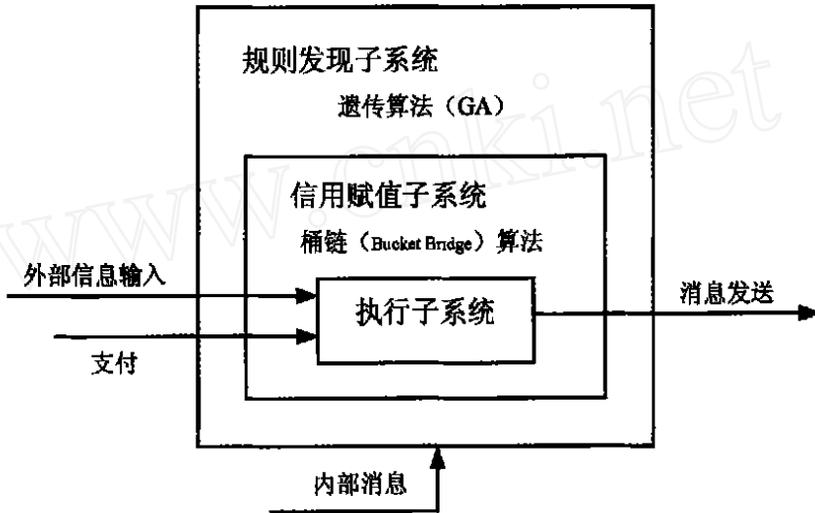


图 2 分类器结构图

Fig. 2 Structure of classifier system

分类器构建的步骤为：首先，建立执行系统（performance system）。该系统处在最底层，直接与环境交互。执行系统内部由一个探测器、一个产生式规则集合和一个反应器组成。探测器从环境中抽取信息，IF/ THEN 规则处理这些信息，而反应器则反作用于环境。执行系统是消息传递、高度标准、高度并行的，其中每一条规则叫做一个分类器。其次，确立信用赋值的机制（credit assignment）。系统必须评价各种规则的有效性，这种活动叫做信用赋值，其实质是根据分类器作用于环境的效果（成功或失败）对所有的分类器进行的排列或评价，有些特定算法专门用于实现这种机制，比如桶队算法（bucket brigade algorithm）。最后，提供规则发现的手段（rule discovery）。从系统现有的规则中即使选择最好的规则并不能保证主体对环境具有最佳的适应性。系统必须能产生新的规则以替代当前规则集中的较差者。规则的发现过程必须由系统不断积累的经验来指导。系统根据适应值，利用遗传算法选择、重组并取代那些用处不大的规则。整个过程就是一个不断提高个体适应环境的能力的过程。

4 结论

现代系统科学的发展同时也极大地促进了地理系统科学与地理信息科学的研究^[38]。空间是地理环境存在的一种状态，人可移动或行驶其中，并能以不同方式概念化、模型化

并进行量测的客观存在^[39]。在城市和区域的研究中,空间的演化可以解释为社会经济组织中具有适应性的主体的互动互作的结果,而不是依赖于一个自上而下的协调机制。主体可以是居民、企业、组织甚至是城市 and 区域本身,大量的主体在区域和城市这样的环境中相互依存、竞争、合作,并且可以不断学习、自我调整,他们的决策和行为持续地创造着城市和区域的空间差异。

CAS 模型直观、灵活、开放,能够表现不同尺度的宏观与微观关系问题,并且模型中的各种主体具有不断的学习不断调整的适应性。因此,继 90 年代风靡一时的 CA 之后,CAS 模型也许会成为未来区域空间演化研究的主流。当然,在区域科学领域,还没有学者发展出一般框架以产生、测算和分类各种可能的城市 and 区域的空间结构。对于应用复杂科学理论模拟城市的各种模型来说,其最大的挑战在于如何从独特的模拟实践中发现关于城市和区域空间演变的一般规律。

参考文献:

- [1] Allen P M. Cities and regions as evolutionary, complex systems. *Geographical Systems*, 1997, 4: 103 ~ 130.
- [2] Harris B, Wilson A G. Equilibrium values and dynamics of attractiveness terms in production-constrained spatial interaction models. *Environment and Planning A*, 1978, 10: 371 ~ 388.
- [3] Haag G, Weidlich W. A stochastic theory of interregional migration. *Geographical Analysis*, 1984, 16: 331 ~ 357.
- [4] Harris B, Wilson A G. Equilibrium values and dynamics of attractiveness terms in production-constrained spatial interaction models. *Environment and Planning A*, 1978, 10: 371 ~ 388.
- [5] Clarke M, Wilson A G. The dynamics of urban spatial structure: progress and problem. *Journal of Regional Science*, 1983, 23: 1 ~ 18.
- [6] Beaumont J R, Clarke M, Wilson A G. The dynamics of urban spatial structure: some exploratory results using difference equations and bifurcation theory. *Environment and Planning A*, 1981, 13: 1473 ~ 1483.
- [7] Camagni R, Diappi L, Leonardi G. Urban growth and decline in a hierarchical system: a supply-oriented dynamic approach. *Regional Science and Urban Economics*, 1986, 16: 145 ~ 160.
- [8] Krugman P. *The Self-organizing Economy*. New York: Blackwell Oxford, 1996.
- [9] Fujita M, Krugman P, Venables A J. *The spatial economy: cities, regions, and international trade*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1999.
- [10] Bura S etc. Multiagent systems and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 1996, 28: 161 ~ 178.
- [11] Benenson I. Multi-agent simulation of residential dynamics in the city. *Computer, Environment and Urban Systems*, 1998, 22: 25 ~ 42.
- [12] Haag G, Dendrinos D S. Toward a stochastic dynamical theory of location: a non-linear migration process. *Geographical Analysis*, 1983, 15: 269 ~ 286.
- [13] Dendrinos D S, Haag G. Toward a stochastic dynamical theory of location: empirical evidence. *Geographical Analysis*, 1984, 16: 287 ~ 300.
- [14] Dendrinos D S, Mullally H. *Urban evolution: studies in the mathematical ecology of cities*. Oxford: Oxford University Press, 1984.
- [15] Orishimo I. An approach to urban dynamics. *Geographical Analysis*, 1987, 3: 200 ~ 210.
- [16] Zhang W B. Stability versus instability in urban pattern formation. *Socio-Spatial Dynamics*, 1990, 1: 41 ~ 56.
- [17] Papageorgiou Y Y. On sudden urban growth. *Environment and Planning A*, 1980, 12: 1035 ~ 1050.
- [18] Mees A I. The review of cities in Medieval Europe: a application of catastrophe theory. *Regional Science and Urban Economics*, 1975, 5: 403 ~ 425.
- [19] Batty M, Xie Y. From cells to cities. *Environment and Planning B*, 1997, 21: 531 ~ 548.

- [20] Batty M. New ways of looking at cities. *Nature*, 1995, 377:574.
- [21] Couclelis H. Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics. *Environment and Planning A*, 1985, 17:585 ~ 596.
- [22] Couclelis H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. *Environment and Planning B*, 1997, 24:165 ~ 174.
- [23] White R, Engelen G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling. *Environment and Planning B*, 1997, 24:235 ~ 246.
- [24] 周成虎, 孙战利. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999.
- [25] Ward D P, Murray A T, Phinn S R. A stochastically constrained cellular model of urban growth. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24:539 ~ 558.
- [26] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 1993, 25:1175 ~ 1189.
- [27] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: Freeman, 1982.
- [28] Arlinghaus S L. The fractal theory of central place geometry. *Geographical Analysis*, 1989, 21:104 ~ 121.
- [29] 陈彦光, 等. 土地利用结构和形态的定量描述: 从信息熵到分数维. *地理研究*, 2001, 20(2):146 ~ 152.
- [30] Batty M, Longley P. *Fractal cities, a geometry of form and function*. London: Academic Press, 1994.
- [31] Holland J H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Cambridge Massachusetts: The MIT Press, 1992.
- [32] Holland J H. *Complex adaptive system*. Boston: Winter, 1992.
- [33] Holland J H. *Hidden order: how adaptation builds complexity*. Massachusetts: Addison-Wesley, 1995.
- [34] 冯珊, 唐超, 闵君, 等. 用于复杂系统建模与仿真的面向智能体技术. *管理科学学报*, 1999, 2(2):71 ~ 76.
- [35] 史忠植. *高级人工智能*. 北京: 科学出版社, 1998. 212 ~ 248.
- [36] Miller J H, Holland J H. Artificial adaptive agents in economic theory. *The American Economic Review*, 1991, 81:265 ~ 271.
- [37] Booker L B, Goldberg D E, Holland J H. Classifier system and genetic algorithms. *Artificial Intelligence*, 1989, 40:235 ~ 282.
- [38] 陈述彭, 等. 地理系统科学与地理信息科学. *地理研究*, 1996, 15(2):1 ~ 5.
- [39] 杨开忠, 沈体雁. 试论地理信息科学. *地理研究*, 1999, 18(3):260 ~ 266.

Sciences of complexity and studies of evolutionary simulation of regional spatial structure

XUE Ling, YANG Kai-zhong

(Dept. of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: During the last two decades, a lot of innovations have appeared in the field of urban and regional research. New paradigms and approaches such as dynamics of complex systems, self-organization, evolution theory, have been recognized for better understanding the evolutionary process of regional spatial structure. It can be seen as a cumulative and aggregated order which results from numerous locally made decisions. Therefore the basic force driving the evolution of regional system is inherently microscopic. Regional system is an evolving complex system which grows from simple to intricacy. Inspired by the concept of biology, regional system

also evolves into a complex , multiplex and vitality state by certain natural selection and adaptation. The understanding that the region is a complex adaptive system (CAS) means that microscopic simulation emphasizing the way in which locally made decisions and interaction between all kinds of local agents such as households and enterprises give rise to global patterns is highly appropriate.

The methodology of CAS model is a part of theory of CAS. The CAS such as urban and regional system is conceived as societies of autonomous agents who are able to act both on themselves and on their environments. The general behavior of the regional spatial evolution is produced by the combination of actions of the households and enterprises. The determinants of an agent 's behavior have a local character and there is no global constraint on the system 's evolution. These agents can adapt to other agents and environment continuously by learning from their own experience. The classifier system is a good learning algorithm for representation of the agent 's adaptation. Therefore , it is a good alternative way of simulating the evolutionary process of the regional spatial structure by modeling behaviors of these local active agents and their interactions. It is easy to build and understand the CAS model. The CAS model can overcome the limit of perfect rationality by introducing learning algorithm and integrate any qualitative or quantitative description of an agent , whose behavior may be very complicated. The flexible modeling method allows for a much more detailed representation of spatial interactions and of some local properties and also makes it possible to introduce new agents or new rules in the model without changing the other parts.

This paper basically reviews the simulating ideas and methodology aiming at two types of traditionally modeling strategy on the study of regional spatial evolution , in addition , primarily introduces the theory of complex adaptive system , one of the most important achievements of studies of complexity , and besides , discusses the general characteristics of the region as a complex adaptive system , expounds the technical problem of regional simulation based on the CAS and the original idea of the CAS model.

Key words : region ;CAS ;agent ;model ;simulation