

国外应用城市模型发展回顾与 新型空间政策模型综述

万 励 金 鹰

Review on Applied Urban Modeling and New Trends of Urban Spatial Policy Models

WAN Li, JIN Ying

Abstract: Cities can be regarded as complex and hierarchical systems. Urban model is the mathematical abstraction of urban changes and various related spatial phenomena. As a quantitative tool, urban modeling is dependent on many-mathematical, physical or economic principles shared with other disciplines. Therefore, urban modeling also provides an inclusive framework for multi-disciplinary collaboration in urban studies. In terms of urban planning practice, applied urban models can simulate the economic, environmental and social impacts of planning policies at various geographic scales. In particular, strategic scenario analyses for policies aiming at large geographic scales can help decision makers to anticipate impacts of the proposed policy changes comprehensively and therefore mitigate potential planning risks. This paper categorizes the mainstream applied urban models according to their behavioral assumptions. The modeling trajectory and new trends in integrated urban modeling are also introduced.

Keywords: urban models; urban planning; quantitative research; policy evaluation; urban system

提 要 城市模型(urban model)是对城市空间现象与过程的抽象数学表达,具有多系统、多学科协同分析、精细化评估的特点。文章对国外城市模型的基本原理、主要类型,发展轨迹及最新应用进行了综述性的介绍。城市模型作为一种科学的量化研究方法,为城市规划研究的多学科配合提供了良好的技术平台,有助于城市规划研究者从城市系统的高度对复杂城市现象和过程进行量化分析与模拟;在城市规划实践领域,城市模型可以对规划政策的社会、经济、环境影响进行综合性量化评价,帮助决策者在政策实施之前对政策的多预期情景进行分析比较,从而规避政策的潜在风险,在决策层面实现政策优化。通过借鉴国外新型城市模型的发展经验并尝试建立符合国情的应用模型体系,将有力促进我国城市规划向科学化、系统化和精细化的变革。

关键词 城市模型;城市规划;量化研究;规划政策评估;城市系统

中图分类号 TU984

文献标识码 A

文章编号 1000-3363(2014)01-0081-11

作者简介

万 励,剑桥大学建筑系博士生,
lw423@cam.ac.uk

金 鹰,博士,剑桥大学马丁中心副主任、建筑系讲师,欧盟交通协会应用技术委员会委员、伦敦城市研究院院士、世界银行顾问

1 城市模型的基本原理及特点

模型(model)是对现实进行理论抽象的产物。模型不仅是对现实系统结构的一种静态复制,还能够模拟现实系统的运行机制,对各种外部或内部的信息做出反应,因而可以在一定程度内替代现实系统,用于系统的反应模拟和预测。模型的存在形式可以是具有一定形态特征的空间模型,也可以是广义的抽象模型。广义模型常常运用数学、物理或统计学的原理和方法,将现实对象或系统的结构和运行机制抽象为变量和函数。这类广义模型以严谨、精确的数学或逻辑语言描述了被观察对象或系统的构成与运行,是对现实的高度抽象,符合自然科学对于精确性、简洁性和普适性的要求。笔者所涉及的城市模型主要属于广义的抽象模型。

1.1 城市模型的基本原理

城市模型虽然在基础理论与建模方法上各有异同,但总体来说是一组以经济学、地理学、社会学和概率统计为理论支撑的函数公式。在系统论的指导下,城市模型将城市理解为一个由多子系统构成的复杂层次系统(complex hierarchy),每个子系统的运行均以数学函数的方式加以抽象化的表达。城市模型中的行为函数有多种建立方式,但总体上可以区分为经济学方法与数理统计学方法两大类。经济学方

法常以经典的一般均衡理论^① (general equilibrium) 作为确立行为函数的理论依据, 该理论通过设立宏观且相互关联的行为假设来描述个体共性的选择行为。与经济学方法不同, 数理统计学方法具有相对灵活的函数确定方法。该方法一般依赖于建模者的主观经验、运用相关性与回归分析来确定函数变量的选择及参数估值。由于缺乏严格的经济学基础, 数理统计模型一般不能直接模拟市场价格。

在行为函数确定之后, 城市模型在用于实际的模拟和预测之前, 需要依照城市历史数据进行模型校调 (model calibration)。虽然行为函数的确定有着不同的方法, 但模型校调的原理和方法基本类似: 建模者会从城市历史数据中选择一个相对稳定^②的历史年, 将该历史年的城市数据作为初始输入; 利用历史年的数据输入, 对预先选定且数据已知的基准年进行“预测”, 通过校调模型参数, 最终使模型的基准年预测结果与已知值达到建模者预设的拟合精度。在理想的情况下, 上述的模型校调过程在数据可以支持的前提下, 应该尽可能多次进行。但在实际的建模工作中, 模型的校调次数往往受到数据量的严格限制, 这种由于数据限制带来的模型校调困难在城市模型研究中广泛存在。

在经过校调以后, 城市模型进入到预测模式, 以已知的基准年数据作为初始输入, 对选定的未来年进行预测。为使模型可以更加精确地模拟城市系统的发展, 国外主流城市模型往往采用递归 (recursive) 的方式 (Simmonds, Waddell, 等, 2011), 即将整个预测年限划分为若干时间间隔, 在每一个时间间隔处, 依托外部模型或外部假设对城市系统的外部条件进行更新。这些外部条件包括宏观社会及经济政策的变化以及偶发事件。在没有外部模型的情况下, 建模者可以通过设定外部假设对宏观指标进行更新。外部假设常常反映城市发展或特定政策的期望值。设置时间间隔并在间隔之间对模型边界条件 (boundary conditions) 进行更新的目的在于有些城市政策对城市系统的影响需要较长时间的

表1 城市政策影响的不同反馈速率

Tab.1 Different response speed of urban policies

反馈速率	政策类型	受影响对象	反馈期(年)	持续期(年)	可逆程度
非常缓慢	交通基础设施建设	交通网络	5-10	>100	几乎不可逆
	土地用途变更	土地开发市场	5-10	>100	几乎不可逆
缓慢	工业区建设	工业市场	3-5	50-100	非常低
	居住区建设	住宅市场	2-3	60-80	低
中等	经济形势变化	就业/商业市场	2-5	10-20	可逆
	人口特征变化	人口/家庭结构	0-70	0-70	部分可逆
快速	商业区位迁移	商业市场	<1	5-10	可逆
	居住区位迁移	居住市场	<1	5-10	可逆
非常快速	商品/服务需求变化	货运物流市场	<1	<5	可逆
	机动性变化	个人出行选择	<1	<1	可逆

资料来源: Wegener, Gnad, 等, 1986。

反馈期才能得以显现 (表1)。对于反馈期较长的规划策略, 有必要在多个模拟周期之间对市场的宏观指标进行更新, 以便反映政策影响的延迟效应 (inertia effects)。

城市模型对于未来的预测力来源于基于城市历史数据的模型校调; 在对于时间的描述上, 现有的城市模型以各种不同的方式力求实现一定程度的时间动态性^③ (temporal dynamics), 实现时间动态性对于描述规划政策的延迟及积累效应具有重要的意义。

1.2 城市模型的特点

城市模型作为一种系统的城市量化研究工具, 具有如下几大特征: ①多系统协同分析; ②多学科理论支持; ③精细化评估。多系统协同分析是指城市模型的模拟对象一般不局限于某一个特定的城市子系统, 而强调各个城市子系统对于城市空间结构和个体行为的综合影响, 特别是城市土地系统和交通系统。国内学者对于城市土地与交通系统相互影响的关注和研究起步较早 (赵童, 2000; 王缉宪, 2001; 朱玮和王德, 2003; 毛蒋兴和闫小培, 2004; 韦亚平, 赵民等, 2008; 潘海啸, 2010; 钱寒峰, 杨涛等, 2010; 潘海啸, 2013), 但在具体的规划研究和实践中运用多系统协同分析的案例较少。城市土地系统是城市经济活动的发生地, 用地的分布与聚集程度从根本上决定了城市的交通需求; 而交通系统则通过施加空间运输成本的方式, 对各种经济活动的选址产生影响。因此, 在研究多子系统共同参与的复杂

城市问题时有必要充分考虑两系统之间的相互影响。多系统协同分析是城市模型与传统城市研究方法的重要区别。

多学科理论支持。城市模型作为一种强调城市多子系统协同作用的综合研究方法, 广泛吸纳了相关学科的基础理论, 为模拟和预测个体的选择行为、解释经济活动与城市空间结构的相互关系、评估政策的社会经济影响提供可靠的理论依据。多学科理论支持是实现城市模型多系统协同分析的必要条件, 也是对于城市系统固有复杂性的理性回应。

精细化评估。城市模型作为一种科学的量化研究方法, 能够在传统规定性研究的基础上进一步提高城市规划研究的准确度和精细度。例如以计量经济学为内核的空间均衡模型 (spatial equilibrium model) 能够模拟市场均衡条件下城市各空间区域内、各产业生产要素的市场价格 (包括劳动力价格、土地价格、楼面房租等)、收入分配比例和生产消费总量 (包括一般商品和服务、住房等)。依据特定的研究目的, 城市模型还可以针对特定的市场和经济活动类型, 例如房地产开发市场和政府税收行为, 进行定制化的精细模拟。

2 国外城市模型的发展轨迹与应用

2.1 城市模型的两大基本类型

由于城市模型本身所具有的多系统、跨学科特点, 多种模型理论和建模方法的相互融合成为模型发展的大趋势。这种模型之间的相互融合给模型分

类带了一定的困难。在下文中，基于国外现有的模型综述文献，笔者按照模型中是否存在宏观的行为假设，将主流的城市模型区分为两大类：宏观模拟（macro-simulation）与微观模拟（micro-simulation）模型。宏观模拟模型一般采用自上而下的方式，强调选择行为的同质性（homogeneity），即通过宏观的行为假设模拟个体层面的选择行为。早期的宏观模拟模型一般以空间交互理论（spatial interaction）作为行为模式假设，其中包括经典的重力模型³（gravity model）和熵最大化理论⁵（entropy maximization）。随着微观经济学的介入和随机效用理论⁶的提出，基于效用的空间离散选择逐步成为模拟个体选择行为的主流方法。宏观模拟模型通过设定全局的行为假设，规避了在个体层面设定复杂行为函数所带来的校调和计算困难，减少了模型对行为数据的依赖和对计算能力的要求，有利于研究者从宏观角度揭示选择行为的内在原因和规律。

相对于宏观模拟模型，微观模拟一般采用自下而上的方式，强调个体行为的自治性（autonomy）和动态性⁷（dynamics），认为个体依据不同的社会、经济、环境条件具有不同的行为决策方式。这种以个体为主体的建模思路有利于模拟个体行为的自治性和动态性，但其行为模拟的精度很大程度上依赖于个体选择规则的制定与校调。早期的微观模型因为缺乏足够的行为数据和有效的计算工具，建模者常依据经验、运用概

率统计的方法主观制定行为规则。虽然，这种主观制定行为规则的方法可以在固定的边界条件下达到与现实较高的拟合度，但当城市模型的边界条件发生变化时，基于静态边界条件的描述性模型对于行为选择的预测能力大大减弱。随着计算机和网络技术的发展，新兴的数据收集、处理方法和不断提升的计算能力让城市大数据⁸（big data）成为可能，这为深入挖掘个体行为的差异性和解释其内在因果关系创造了新的契机。

对于这两类城市模型的优劣讨论，贯穿整个城市模型界的发展。虽然宏观模型在大空间尺度城市规划政策的评估，特别是经济效应评估上具有优势，但受限于严格的宏观行为假设和市场条件假设，难以实现高空间精度的行为模拟。微观城市模型由于其相对灵活的模型框架，配合大数据的支持，特别适用于在小尺度或单一市场中以较高精度模拟个体的行为选择。综上所述，宏观模拟和微观模拟在方法论的角度，并非两种相互冲突的建模方法，相反，它们适用于不同的城市系统类型和层次，可以相互补充、相互支撑，共同构建城市系统模拟的模型体系，为不同空间尺度、不同政策类型的规划决策提供定制化的模型评估支持。

2.2 国外城市模型研究的发展轨迹

在前述的城市宏观和微观模拟模型分类之下，依据模型的建模方法和特征，还可以将现有的城市模型体系细分

为多个小类（图1）。基于现有的城市模型综述⁹，结合图1的城市模型分类，笔者将国外城市模型的发展总结为三个阶段：空间交互模型和“城市土地与交通交互模型（LUTI）”的出现，空间经济学的发展和空间均衡模型，微观模型的发展和大数据时代的到来。

2.2.1 第一阶段：空间交互模型和“城市土地与交通交互模型（LUTI）”的出现

在城市模型研究早期（1950-1970年代），大部分的研究都集中于空间交互模型。空间交互理论以经典物理学为理论基础，将空间中两物体之间的交互可能性或交互强度，描述为由物体属性和物体之间空间阻力构成的函数。早期城市模型对于空间交互理论的关注，主要有两个原因：一方面，受限于有限的城市数据来源和计算处理能力，难以在个体层面实现自下而上的行为模拟，因而采用自上而下的宏观行为假设成为了描述个体行为选择的理性替代；另一方面，受到基础自然科学普适性观点的影响，越来越多的自然科学理论开始被引入社会科学领域用于描述和解释复杂的社会现象，因此以重力模型和熵最大理论为代表的空间交互模型成为早期城市模型研究的主流。经典的空间交互模型包括：Lowry城市土地模型¹⁰（Lowry, 1964）和阿隆索地租模型¹¹（Muth, 1961; Alonso, 1964; Mills, 1967）。

伴随着空间交互理论的兴起，在城市规划研究领域，学者们开始关注城市

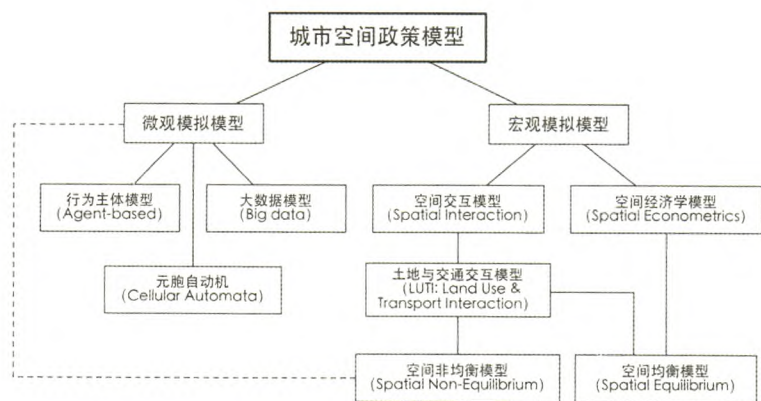


图1 城市空间政策模型分类

Fig.1 Classification of urban spatial policy models

资料来源：作者自绘。

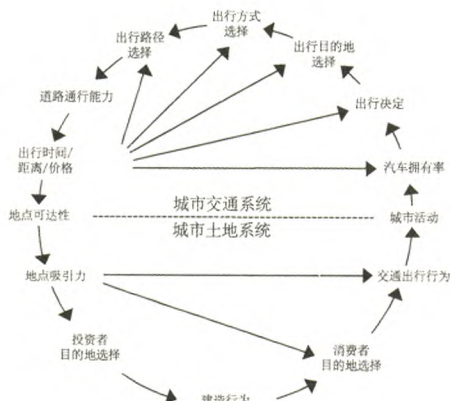


图2 城市交通与土地系统的相互作用¹²

Fig.2 Interaction between urban land use and transport system

资料来源：作者自绘。

土地与交通这两大系统之间的相互作用(图2)。城市土地和交通系统的相互作用可以概括为:城市土地系统通过设定土地用途的形式,对各种城市活动的空间发生场所做出限定;由城市活动产生的出行需求必须通过城市交通系统来实现;城市交通系统的分布与承载能力决定了城市土地的空间可达性;这种以出行时间/距离/价格衡量的空间可达性,影响了人们的出行选择,进而对土地用途的分布产生影响。为了描述和解释城市土地和交通系统之间的相互作用,学者们提出了一种新的城市模型类型,即土地与交通交互(LUTI)模型。虽然,早期的LUTI模型普遍采用空间交互理论作为其理论基础,但随着其他学科理论的介入,LUTI模型逐渐变为一种典型的城市模型框架,在后续模型研究中被广泛应用。Lowry模型自从1980年代被引入国内城市规划研究界以来,经历数十年的发展(孙晓光和庄一民,1984;梁进社和楚波,2005;周彬学,戴特奇等,2013),成为国内LUTI模型的典型代表。

2.2.2 第二阶段:空间经济学的发展和空间均衡模型

以空间交互理论为基础的城市模型的理论缺陷在于其所模拟的行为选择缺乏可靠的行为理论基础(Lee Jr, 1973; Batty, 1979)。例如在空间重力模型中,消费者常被假设为优先选择交通成本低、商业营业额高或“吸引力(attractiveness)”高的购物地点。这种行为模拟方法,一方面由于没有解释个体行为选择的内在原因而只是关注于外在结果,因而难以模拟选择行为之间的相互影响,例如收入、居住地与消费选择之间的相互联系;另一方面,空间交互模型的精确性很大程度取决于关键模型参数的正确取值,例如距离衰减参数^③。理论上说,这类模型参数的校调需要通过实证的方式从现实中收集个体的行为选择数据,但在早期城市模型研究中,数据收集和处理技术的限制使得参数校调大多依赖于建模者的长期经验积累。

与此同时,在经济学领域基于计量经济学的市场行为研究和空间经济学(Isard, 1951; Isard, 1960)的兴起,为从

宏观角度理解经济行为规律、解释经济活动的空间分布提供了新的理论依据和分析工具。因此,空间经济学与LUTI模型框架的结合成为这一阶段城市模型发展的标志,这一新的城市模型类型被称为城市空间均衡模型。在空间均衡模型中,城市空间常被划分为若干个区域单元(model zones),每个区域单元都有其地理或行政区划相一致的人口、就业、产业、土地、房地产市场等信息。空间均衡模型的重要特征是对产业之间、区域单元之间的资本流、货物流和人流进行同时模拟(Jin 和 Echenique, 2012)。具体来说(图3),在生产消费市场中,消费者向生产者提供资本和劳动力,同时以红利和工资的形式获得收入;生产者所提供的商品和服务,一部分作为最终商品和服务销售给消费者;另一部分则作为中间生产要素返回至生产者,用于其他产品的生产;在房地产市场中,一方面由生产消费场所驱动的商业地产和居住需求,需要由政府或开发商的房地产开发行为来提供;而房地产开发行为又受到土地供给政策的影响;另一方面,基于LUTI框架,生产消费市场中所需的人流与货流交换需要依赖交通路网来实现。通过将人流、货流转换为现实路网中的交通流,所得到的运输成本信息会重新返回生产消费市场,进而影响生产者和消费者的空间区位选择。

当生产消费市场、房地产市场、土

地市场和交通市场中的供给与需求均达到平衡时,市场达到均衡状态。依据古典经济学理论,市场均衡状态时经济活动效率最高,并且基于价格的市场供需关系调整会不断将市场引向均衡状态。因此,空间均衡模型通过模拟各类规划政策对市场主要供需关系和价格的影响,比较政策实施前后的市场均衡状态,实现对规划政策社会经济影响的综合评估。

早期的空间均衡模型大多为空间投入产出模型(spatial input-output model^④,依照国民经济分析中常用的投入产出表,在最终需求已知的条件下,对产业间的经济交换进行空间区位预测。而作为空间投入产出模型的扩展,可计算的空间均衡模型(spatial CGE model^⑤对城市市场的供需关系和价格均采用内生(endogenous)的模拟方式,因此SCGE模型通过转化规划政策对市场价格和供需关系的影响,可以更加准确地模拟整个城市市场的运行,也是现今城市模型界对城市经济市场具有最高拟合度的模型类型。

由于空间均衡模型具有与主流经济学分析相统一的理论构架,加上长达数十年的发展与应用,现已成为欧美发达国家在规划政策评估领域应用最广泛的模型类型(Wegener 和 Fürst, 2004; Batty, 2007; Simmonds, Waddell 等, 2011; Batty, 2012)。空间均衡模型尤其适合评估大空间尺度规划政策的社会经

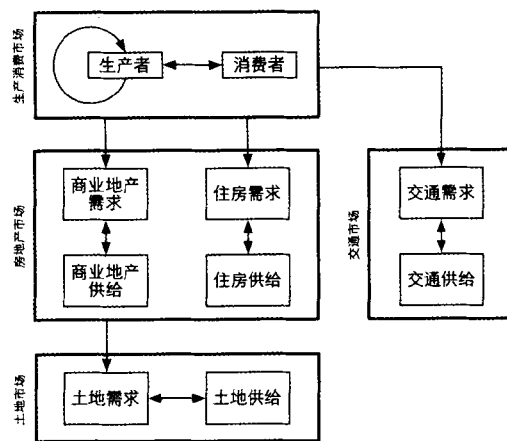


图3 空间均衡模型的典型市场结构
Fig.3 Typical structure of spatial equilibrium models
资料来源:作者自绘。

济影响(Jin和Echenique, 2012), 例如评估大型交通基础设施对于区域经济聚集效应的影响、城市边界扩张与旧城更新项目的社会经济性评价等。著名的空间均衡模型包括: 属于空间投入产出模型的MEPLAN模型(Echenique, Flowerdew, 等, 1990; Echenique, 2004; Jin, Echenique等, 2013), 以及以MEPLAN为原型的TRANUS模型(de la Barra, 1989; de la Barra, 1998)和PECAS模型(Hunt, Abraham, 2005); 属于SCGE模型的RELU-TRAN模型(Anas, Liu, 2007; Anas, Hiramatsu, 2012)和RSE模型(Jin, Echenique, 等, 2013)。国外空间均衡模型的实际案例研究可参见Echenique、Flowerdew等(1990); Jin和Williams(2002); Anas和Hiramatsu(2012); Echenique, Hargreaves等(2012)。

2.2.3 第三阶段: 微观模型的发展和大数据时代的到来

国外新型城市空间模型的发展主要表现在从第二阶段空间均衡模型向第三阶段的转化与结合。微观模型通常将城市理解为一个由层次性选择行为而产生的即时现象(emergent phenomena)的集合(Batty, 2008; Batty, 2012); 个体在城市系统的各个层级所作出的行为选择, 自下而上地决定了城市的系统特征。为捕捉这种个体行为的复杂性, 微观模型普遍具有较高的空间精度和明确的内生时间轴: 高空间精度有助于描述个体状态变化与周边环境条件的互动, 而明确的时间轴则允许个体行为受到历史或未来的影响。图1所列的微观模拟模型类型包括: 元胞自动机(cellular automata), 行为主体模型(agent-based models), 大数据模型(big data), 以及同时具有宏观、微观模拟特点的空间非均衡模型(spatial non-equilibrium models)。

元胞自动机在城市规划研究中主要用于模拟城市土地开发的时空演变。元胞自动机一般将城市区划分为多个二维的方形网格, 每一个方形(即元胞)在空间中不可移动, 但是可以根据周边元胞的状态而改变自身的状态。在此基础上, 约束性元胞自动机还会对元胞的状

态改变附加若干全局约束条件, 例如元胞距离最近交通节点的距离、周边服务设施的数量等等。元胞自动机在国外的最新发展包括元胞矢量化, 即以与地块形状相适应的多边形取代传统的方形网格, 以及与其他微观模型的结合。在国内, 元胞自动机在城市规划和地理学领域的研究起步较早, 并且已经积累了一定的实际应用经验(黎夏, 叶嘉安, 1999, 2002, 2005; 龙瀛, 等, 2009), 主要研究课题包括城市形态学研究、城市发展边界预测等; 国外元胞自动机的研究综述可见Batty(1997, 2007)。

行为主体模型的最大特点在于将个体作为行为选择模拟的主体。与前述的宏观模拟相比, 行为主体模型依据现实中的行为数据, 运用概率统计学方法挖掘个体属性与行为选择之间的关联函数, 从而实现对个体未来行为的模拟。行为主体模型虽然在定义上与元胞自动机有类似之处, 但其显著区别在于元胞自动机中的“主体”是不可移动的城市地块, 而行为主体模型中的主体通常是一个个具有不同属性的人, 因而是一种更为抽象和广义的建模方法。行为主体模型的主要数据来源是街区、城市、乃至国家级别的人口、经济、交通普查数据, 利用数据合成技术(population synthesis), 可以从具有一定采样率的小样本数据中合成具有全样本数量的样本数据库(龙瀛, 沈振江等, 2011)。这一类具有大数据特征的城市人口数据库的建立, 为行为主体模型的发展和应用提供了必要的技术支持。国外行为主体模型研究的综述文献可见Parker(2002)和Heppenstall、Crooks等(2012)。

另一类在定义上较为模糊的微观城市模型是空间非均衡模型。此类模型继承了传统LUTI模型的框架, 以城市土地和交通系统为主要对象, 但是在行为选择模拟上广泛采用自下而上的微观模拟方法, 具有一定的行为主体模型的特征。与空间均衡模型相比, 空间非均衡模型因为取消了自上而下的行为假设, 可以灵活地模拟个体行为的自治性和时间动态性; 但由于缺乏经济学所提供的行为理论, 空间非均衡模型难以准确模

拟由市场价格驱动的复杂经济行为(例如生产/消费选择中的替代效应)和大空间尺度的经济聚集效应。不过空间非均衡模型经由多年的理论建设和发展, 已成为城市模型领域的一个重要分支, 特别是在大数据和高空间精度的可视化技术支持下, 越来越多的应用于具体的城市案例中。代表性的空间非均衡模型包括: IRPUD模型(Wegener, 1998), DELTA模型(Simmonds, 1999)和UrbanSIM模型(Waddell, Borning等, 2003)。

随着信息和网络技术的不断提高, 城市规划研究的大数据时代已经悄然到来。利用城市中不断产生的海量数据, 例如公交卡数据、交通监测数据、手机定位数据、社交网络数据, 城市研究者们可以更加直接从现实数据中挖掘个体行为特征。大数据模型虽然在文中被暂归为微观模型的一种, 但关于大数据与传统城市模型研究的关系及其意义在城市模型研究界尚无定论。部分学者认为大数据可以为深入挖掘行为规律、验证传统城市模型中的行为理论提供有力的数据支撑; 而有的学者提出“数据即模型”, 认为大数据时代下传统的城市模型理论研究已经丧失了其存在价值, 呼吁模型研究重心的转移。依照城市模型界权威Michael Wegener(2013)教授的观点, 考虑到大数据模型作为新兴的模型类型, 与传统城市模型尚处在完全不同的发展阶段, 因而还不能确定其对于传统模型的取代作用。与此同时, 宏观模型与微观模型的理论边界日渐模糊, 微观模型对于空间行为的精细化、动态化模拟与宏观模型成熟的应用框架相互融合, 逐渐构成一个综合的城市模型体系。可以预见, 未来的城市模型研究将逐步走向定制化、综合化和应用化: 针对具体的城市问题, 依据所涉及的城市子系统种类和层级, 选择合适的建模理论和方法, 对相关的规划政策的编制与决策提供综合性的评估。

值得指出的是国外城市模型的发展也经历了数次高潮与低谷。例如国外城市模型界先驱Douglas Lee于1973年撰写的“大规模城市模型的安魂曲^⑧”一文对1980年代之前的城市模型研究进行了

系统性的总结，并对以早期LUTI模型为代表的大规模城市模型的科学性和应用性提出了批评。Lee在该文中提出早期大规模城市模型由于对城市系统复杂性的盲目追求，忽略了模拟广度和精度的平衡；加之城市数据、建模成本和计算能力的限制，难以促进规划理论研究和行业实践。虽然，该文对早期城市模型的研究作出了消极的评价，但以Michael Batty, Michael Wegener 和 MacialEchenique 等为代表的国外城市模型学者通过此后30多年的城市模型研究和应用实践证明，应用城市模型在城市研究与实践领域仍然具有重要意义。1994年，Lee再次撰文“大规模城市模型回顾”，对“安魂曲”后20年的城市模型发展进行了回顾。如果说“安眠曲”一文是对上文所述第一阶段的概括，那么20年后的回顾则是对第二阶段的总结。在这篇20年回顾的著作中，Lee将对大规模城市模型的质疑总结为三大方面：黑箱(black box)效应，模糊的应用领域以及对自上而下规划体制的依赖。在Lee“回顾”一文将近20年后的今天，国外新型城市模型的发展在如下几个方面做出了积极的回应：①新型城市模型以城市大数据为背景，尊重城市发展过程中的延迟效应及不确定性，不断优化模型的内生结构和边界条件，通过建立应用模型体系而非单一模型的方式，既利于规划政策以外生变量的形式输入模型，也降低了单一模型的复杂程度；②国外主流的大规模城市模型以规划政策评估作为主要应用目标，普遍采用针对特定政策类型和目标定制模型的方法，不再盲目追求单一模型对所有城市子系统的覆盖；③结合国外规划权限不断地地方化的政策背景，新型应用模型着重评估规划政策在城市与区域尺度的经济、环境效应，以动态的方式模拟政策效应的反馈时限，不断提高模型的透明度和可对比程度。在下一章节中笔者将以案例分析的方式介绍国外新型城市模型在城市规划研究和实践中的应用。

发展，已经逐渐建立了一套成熟的基于城市模型的城市政策评估程序，并应用于诸多实际的城市规划项目中。现以笔者所在的英国剑桥大学建筑学院和马丁中心的ReVISIONS®项目为案例，介绍城市模型在城市规划政策研究中的应用。ReVISIONS项目以英国东南部地区为案例区域，尝试建立一套整合的城市模型体系，涵盖城市经济、土地、建筑、能源、交通、环境（空气质量、水资源、固体废弃物）等子系统、通过预测人类活动与城市空间、基础设施之间的供需关系，对城市空间规划和基础设施规划的可持续性进行评价和优化。图4介绍了ReVISIONS项目中建立的整合性模型

框架。图4中部的灰色区域为城市经济、社会生活所涉及的基础产品和服务，左侧为由城市环境、能源、交通技术子模型驱动的供给模拟模型，右侧为由城市空间区位选择模型驱动的需求模拟模型。整个模型体系一方面以宏观经济、进出口、公共投资政策的初始输入，将不同类型的空间规划及基础设施策略作为政策参数，利用基于投入产出分析的空间均衡模型对城市经济、社会活动的空间区位进行预测，同时估算对城市产品和服务的需求；另一方面，技术选择模型结合城市的区域环境属性，以技术策略作为政策参数，预测城市基础产品

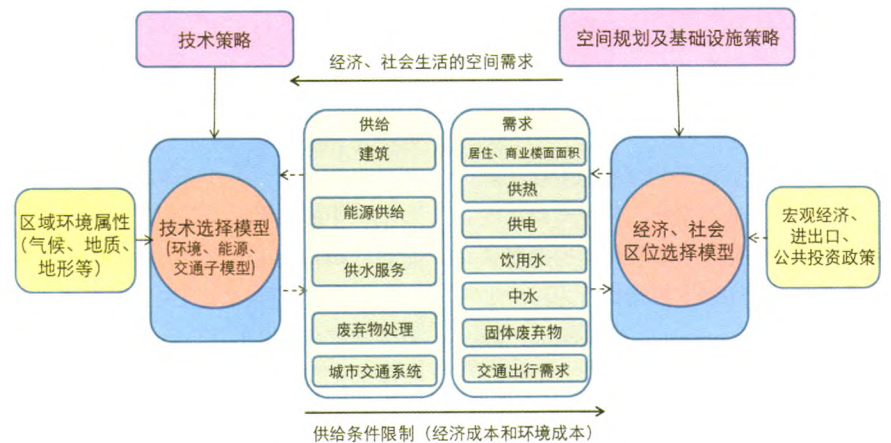


图4 ReVISIONS项目中的城市模型整合框架^①
 Fig.4 Integrated framework of urban models in ReVISIONS Project
 资料来源: ECHENIQUE, HARGREAVES, 2012.

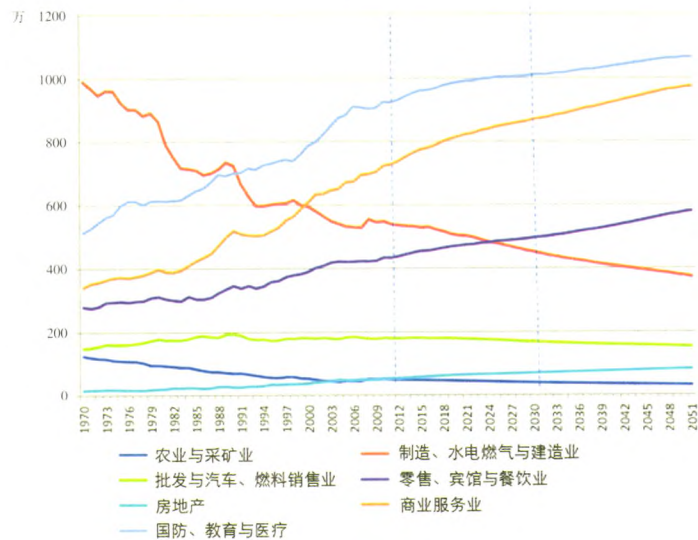


图5 基准情景各产业就业岗位数量预测
 Fig.5 Industrial employment in baseline scenario
 资料来源: 作者自绘.

2.3 新型城市模型典型应用案例介绍
 国外的城市模型研究经过数十年的

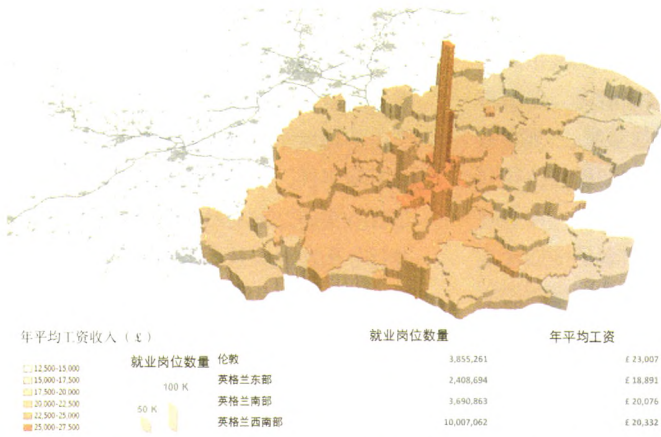


图6 2012年各产业就业岗位及工资收入空间分布
Fig.6 Industrial employment and average income in 2012
资料来源: 作者自绘。

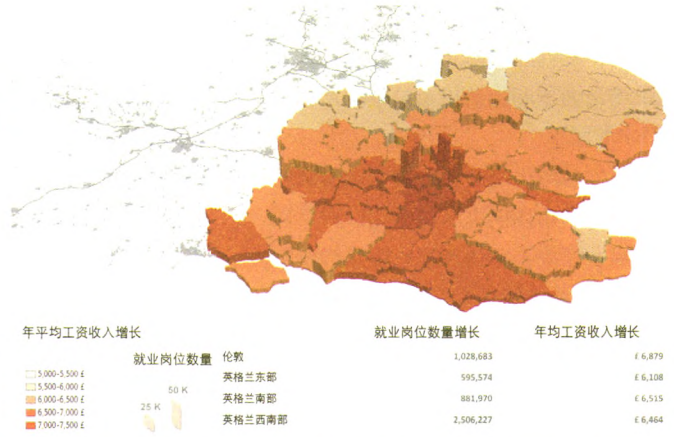


图7 基准情景2030年各产业就业与工资收入增长的空间分布预测
Fig.7 Industrial employment and average income increase in baseline scenario 2030
资料来源: 作者自绘。

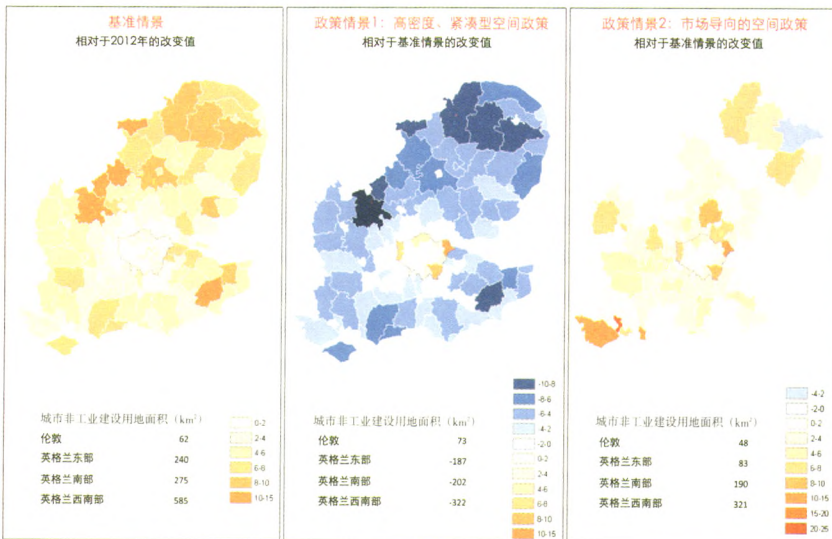


图8 城市空间政策情景比较——城市非工业建设用地面积
Fig.8 Scenario comparison —— domestic urban land area
资料来源: 作者自绘。

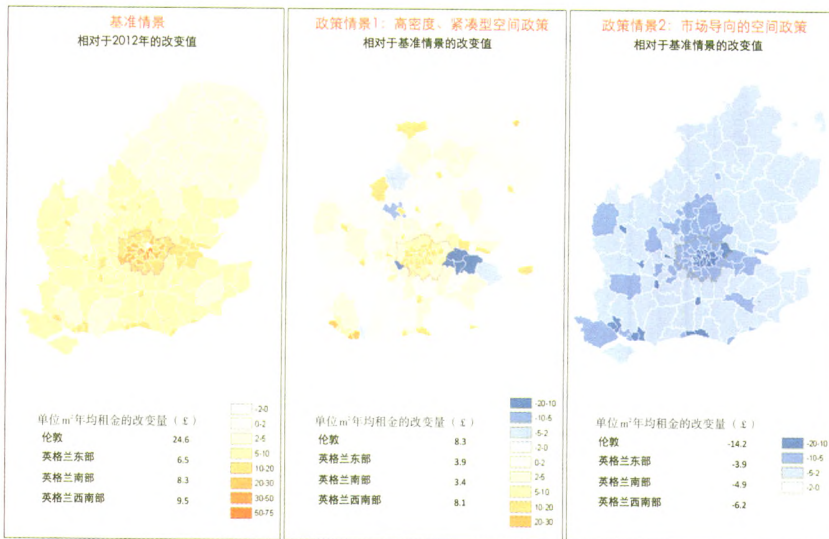


图9 城市空间政策情景比较——非工业用地单位面积年均租金改变值
Fig.9 Scenario comparison —— domestic urban land rent change
资料来源: 作者自绘。

和服务的供给能力。供给限制条件以经济成本和环境成本的形式反馈至区位选择模型, 进而指导城市空间规划和基础设施策略的制定。考虑到空间政策作为城市规划研究的主体, 本节下文主要介绍空间区位选择模型在城市经济、社会活动需求模拟中的应用, 即图4所示模型框架中的右侧部分。

在ReVISIONS项目中, 按照英国郡 (shire) 级别的行政区划, 整个案例区域被划分为若干个模型区域单元 (zone)。在市场划分上, 参照国民经济投入产出表的划分方法, 将城市市场划分为7个产业类型: 农业与采矿业, 制造、水电燃气与建筑业, 批发与汽车、燃料销售业, 房地产, 国防、教育与医疗, 零售、宾馆与餐饮业, 商业服务业。城市空间均衡模型以宏观GDP预测作为输入, 以国民经济投入产出表所揭示的城市生产模式为依据, 对上述7个城市产业在2012-2030年的发展及空间分布进行预测。模型以所有产业、政策均维持现有模式作为基准情景 (baseline scenario), 通过调整政策参数, 预测不同城市规划策略影响下的政策情景。ReVISIONS项目基准情景的部分预测结果见图5-7。

在完成基准情景的预测后, ReVISIONS项目对另外两种城市规划策略分别进行了模拟评估, 即高密度、紧凑型的空间策略 (以提高现有城市开发密度的方式限制城市建设用地的扩张) 和完全以市场为导向的空间策略 (无行

政干预)。在这两种不同城市空间策略的作用下,案例区域在2030年城市非工业建设用地面积和土地租金的模拟结果参见图8和图9。

在模拟城市经济、社会活动需求的同时,技术选择模型从供给端,对不同的环境、能源、交通技术策略进行模拟评价。典型的技术策略包括新能源发电、热电连供(CHP)、地源/水源热泵、电动汽车等。相较于宏观的城市活动需求模拟,技术选择模型需要考虑区域特有的空间、环境属性,因此常具有较为精细的空间模拟精度(例如城市组团尺度)。由技术选择模型生成的可持续性指标,例如碳排放、能源消耗总量、空气污染物及固体废弃物总量、城市洪水风险等级等,将作为参照指标指导城市空间与基础设施规划。由于ReVISIONS项目尚处于项目总结阶段,因此对项目的最终结论在此不展开谈论。

ReVISIONS项目所体现的以宏观空间均衡模型为核心、整合微观环境、能源、交通模拟的规划政策评价方法,是国外新型城市模型应用的典型代表。这类以应用模型体系取代传统单一大规模城市模型的方法,具有如下特点:①以经济均衡模型为核心的城市模型体系为各种政策评价指标提供的统一的经济学年度量,利于将区域政策评估与上位规划和宏观政策相衔接;②将需要较高空间精度的微观模拟,例如能耗、污染模拟等,从宏观模型中剥离出来,既能简化主体模型的复杂程度,又能提高微观模型对特定系统的模拟精度;③通过建立具有信息反馈机制的模型框架,不同学科的研究者能够在统一的数据平台上对规划政策的综合效应作出量化评估,有助于缓解模型的边界效应。

3 在中国应用城市模型的意义和挑战

3.1 城市模型在规划研究与实践中的意义

传统的城市量化研究方法大多属于实证研究,通过观察或案例调研获得数据,然后提出并验证理论假设。由于实

证研究强调数据与结论的直接对应关系,因而在研究单一、具体的城市问题时,具有较强的因果解释能力。但城市本身作为一个复杂的层次系统,观察者通过传统实证方法得到的证据往往受到观察层级和观察者立场的影响,许多被观察到的现象及问题中嵌套了多层次系统的相互作用。参照国外城市规划研究的发展轨迹,这种以城市数据为基础的系统量化分析取代以往单一城市系统的定性分析、以城市模型体系取代单一模型的规划研究方法变革,是我国城市规划研究发展的必然趋势。

值得强调的是,考虑到城市系统本身的复杂性和规划政策制定所涉及的复杂决策环境,城市总体规划的行为本质并非一个完全理性寻求最优解的过程。在面对复杂城市问题时,决策者通过连续的有限比较(successive limited comparisons)方法来做出有限理性的选择(Simon, 1957)。面对城市规划在行为学上非完全理性的定义,城市规划的科学性曾引发国内众多学者的讨论(石楠, 2003; 邹德慈, 2003; 邹兵, 2005)。在无法实现完全信息和完全理性的条件下,城市规划的科学性在于规避城市发展的潜在风险,提高城市对于不确定的社会经济环境的适应能力。城市模型作为对城市系统的抽象模拟,其有限的模型边界尚不足以提供规划政策的

“最优解”,但却可以通过预测政策的潜在风险告诉决策者不做什么。面对国内强烈的城市发展和土地需求矛盾、日益严重的环境污染以及各种社会经济的不确定性,城市模型可以帮助决策者在政策实施之前对政策的多种预期情景进行分析比较,从而规避政策的潜在风险,在决策层面实现政策优化。

3.2 城市模型与现有规划编制体系的整合

考虑到国内规划政策制定所涉及的复杂决策环境,如何找寻城市模型与现有规划编制体系的接合点成为模型应用所面临的一大挑战。图10描述了国内主要规划编制类型所涵盖的时间跨度和信息密度:城市发展战略规划从宏观的社会经济发展、区域关系及环境资源特点的角度,以较长的时间跨度制定城市的空间发展战略,是保证后续总体规划和控制性规划合理性的前提;而总体规划和控制性规划随着政策时间跨度的不断缩减,所反映的规划信息密度也在不断增加,其中控制性规划或近期规划从当前可确定的目标和需求出发,制定具有现实操作性的实施规划,完成由规划向现实的转变。

从城市模型应用的角度来说,理想的模型应该既能预测的精细(信息密度高),又能预测的长远(时间跨度

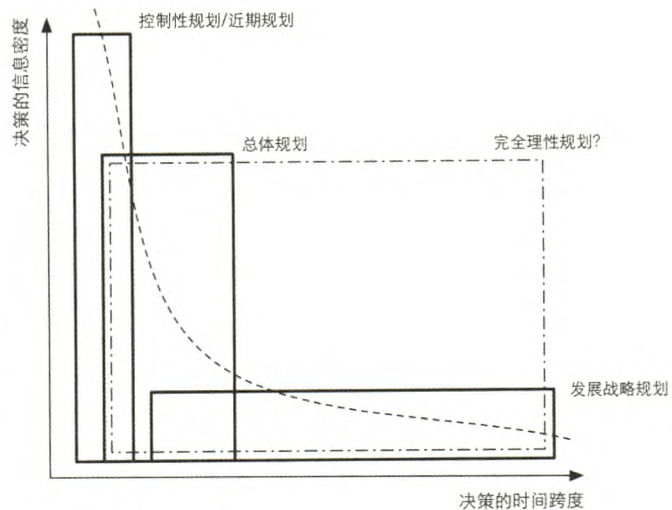


图10 不同规划编制类型所包含的时间跨度和信息密度²⁰⁾
Fig.10 Time span and information density of different urban planning types
资料来源:作者自绘。

长), 以实现完全理性的城市规划决策; 但在规划实践中, 这种理想的规划模式并不具备可操作性。考虑到国内规划编制和城市数据的实际情况, 城市模型现阶段可能的应用方式是首先逐步建立适用于模型量化研究的城市数据库, 在城市发展战略规划阶段, 对大空间尺度规划战略的社会、经济、环境影响进行预评估, 以规避潜在的发展战略偏差和风险, 保证后续规划的合理性; 随着大数据模型的进一步发展和成熟, 高精度的城市微观模型可以为城市控制性规划或近期规划的编制提供直接的信息支持, 最终实现城市模型体系对规划全过程、全类型的决策辅助。

4 结语

城市模型作为一种城市量化研究方法, 历经数十年的发展, 在国外城市规划研究和实践领域具有广泛的应用。在研究领域, 城市模型为理解城市的系统结构和各子系统的运行机制提供了有效的理论和技术支持, 有助于城市研究者深入挖掘各系统层级的城市活动与城市空间结构之间的紧密关联, 拓展传统城市空间研究的内涵; 在实践领域, 城市模型被广泛应用于规划政策的社会、经济、环境影响评估, 其中以经济学为核心理论的空间均衡模型经过数十年的研究与应用, 现已成为国外规划政策模型的代表。

在中国城市发展向集约化、定量化和科学化方向转变的宏观背景下, 城市模型具有广阔的研究和应用前景。虽然城市模型在国内的应用受到数据、体系制度和介绍推广等诸多挑战, 但已经有越来越多的国内学者开始尝试城市模型的中国化研究。例如正在进行的、由中国清华大学、美国麻省理工大学与英国剑桥大学联合主持的“低碳城市(Low Carbon City)”研究项目, 希望借鉴国外成熟的城市模型研究体系, 以中国京津冀城市圈为案例, 建立符合国内政策环境与市场特征的大尺度城市空间政策模型。其主要研究方向包括: ①交通基础设施(例如新建机场、城际高

铁)对区域经生产力的影响; ②城市能源、资源、环境政策对城市市场的影响; ③北京保障性住房选址研究; ④城市周边土地产权置换方式研究。该科研项目以SCGE类型的空间均衡模型为主要技术工具(Jin, Echenique, 等, 2013), 将依据现有的统计普查数据建立与模型相匹配的城市数据库; 针对国内具体的政策编制方法与土地开发模式, 建立定制化的行为模型, 并对模型关键参数进行校调, 以期建立一套基于城市模型的政策量化评估方法。

注释

- ① 一般均衡理论(Walras and Jaffé, 1954)认为在完全市场竞争的条件下, 存在一个整体均衡状态或一套均衡价格, 使得所有消费者/生产者实现效用/利润最大化, 同时所有市场实现供需平衡和市场出清, 详参见Varian (1992, 2010)。
- ② 相对稳定是指所选择的历史年中没有发生诸如严重自然灾害或大范围经济危机等偶发性事件。选择相对稳定的历史年数据进行模型校调, 可以使模型的运行更加接近正常状态下的市场运行。
- ③ 严格的时间动态性要求模型内嵌的时间轴完全连续(详参见 Beaumont et al. 1981和Allen et al. 1986), 但由于实现完全连续的时间轴会给大尺度城市模型带来巨大的计算困难, 因而在应用型城市模型领域尚无实现严格时间动态性的模型。事实上, 城市模型的时间表达精度应该取决于具体的建模目的, 例如对于微观的实时交通模型, 可能需要达到分秒级的时间精度以实现实时路况的模拟, 而对于宏观的土地政策模型, 常选择相关土地政策的修编年限为时间精度。
- ④ 空间交互模型中的重力理论来源于经典力学中的万有引力定律, 假设空间中两点的交互强度(例如从居住地到某购物地的可能性)与两点的吸引程度(例如该购物地的商品交易总额)呈正比, 而与两点之间的距离(物理距离或是折算为价格的经济学距离)呈反比(详见Hansen, 1959)。
- ⑤ 熵最大化理论, 认为在所有已知条件下, 个体行为选择的概率分布应该满足熵最大化的假设(详见Wilson, 1969, 1970)。
- ⑥ 随机效用理论(Domencich and McFadden, 1975)将个体对于某项选择的偏爱区分为可观察效用和以一定概率分布的不可观察效用。基于随机效用理论的离散选择模型是量化模拟个体选择行为的经典方法, 其主要发明者McFadden教授由此获得2000年诺贝尔经济学奖。
- ⑦ 动态性强调行为选择的时间维度, 认为

行为选择会受到过往经验和未来预期的影响。经济学中的投机行为是行为动态性的典型表现。

- ⑧ 大数据尚无准确的学术定义, 但泛指超越传统信息收集、储存、分析和手段的巨量数据。
- ⑨ 较为经典的国外城市模型研究综述, 请参见Lee (1973, 1994), Allen (1997), Wilson (1998), Couclelis (2000), Waddell等(2002), Wegener (2004), Hunt等(2005), Batty (2009, 2012), Iacono等(2008), Haase和Schwarz (2009)。
- ⑩ I. S. Lowry于1964年为美国匹兹堡地区建立的城市土地模型是第一个具有操作性和应用性的城市空间交互模型。Lowry模型按照经济学原理将城市经济活动的参与者划分为基础就业、零售业和家庭消费者, 依据人口基数和土地面积总额对经济活动的总量进行估算, 然后运用重力模型模拟经济活动的空间分布。这个经典的模型框架在后续的城市模型研究中被不断发展延续。
- ⑪ 阿隆索地租模型以von Thunen (1783-1850)的单一中心农业模型为基础, 将单一类型的农业活动扩展为多类型的土地类型, 通过描绘完全竞争假设下的城市土地竞价曲线, 模拟了在单中心、均质空间条件下, 各种城市土地类型在空间中的分布模式。阿隆索模型是后续以城市经济学为内核的城市模型的原型。
- ⑫ 改编自Wegener, Gnad等(1986)。
- ⑬ 在重力模型中, 距离衰减参数(transport friction parameter)常用于表征行为选择对于空间运输成本的敏感性。距离衰减参数越大, 表明出行选择对交通成本的提高越敏感。
- ⑭ 投入产出模型是通过编制投入产出表建立数学模型, 投入产出表来源于一个经济系统各部门生产和消耗的实际统计资料, 它同时描述了特定时间区间内各部门之间的投入与产出协调关系, 反映了产品供应与需求的平衡关系, 详参见Leontief (1987)。
- ⑮ 可计算的一般均衡(CGE)模型是Arrow和Debreu (1954)基于对市场均衡存在的证明而建立的一套计算市场均衡状态的数学建模方法。CGE模型是对投入产出模型的扩展, 可以精确地模拟市场价格和由价格变化导致的替代效应。
- ⑯ Lee Jr, D. B. (1973). "Requiem for large-scale models." *Journal of the American Institute of Planners*[J]. 39(3): 163-178.
- ⑰ Lee, D. B. (1994). "Retrospective on large-scale urban models." *Journal of the American Planning Association*[J]. 60(1): 35-40.
- ⑱ ReVISIONS项目(Regional Visions of Integrated Sustainable Infrastructure Optimised for Neighbourhoods)由英国工程与自然科学研究理事会(EPSC)资助(2008-2012), 项目负责人为剑桥大学建筑学院的MacialEchenique教授, 其研究

团队由剑桥大学、利兹大学、纽卡斯尔大学等七所英国大学联合组成。项目网站：<http://www.regionalvisions.ac.uk/>。

- ① 本节中其他 ReVISIONS 项目的图片资料均来自于 Echenique 和 Hargreaves (2012)。
- ② 改编自 Lee (1994)。

参考文献 (References)

[1] ALLEN P M. Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity[M]. Routledge, 1997.

[2] ALLEN P M, ENGELEN G, SANGLIER M. Self-organizing systems and the "laws of socio-economic geography"[J]. *European Journal of Operational Research*, 1986 25(1): 127-140.

[3] ALLEN T. Hierarchy: perspectives for ecological complexity[M]//ALLEN T, THOMAS B. Starr. Chicago: University of Chicago Press, 1982.

[4] ALONSO W. Location and land use: toward a general theory of land rent[M]. Harvard Univary Press, 1964, 46(6): 855-873.

[5] ANAS A, HIRAMATSU T. The effect of the price of gasoline on the urban economy: From route choice to general equilibrium[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012.

[6] ANAS A, HIRAMATSU T. Relu-Tran: Applications and challenges[J]. Unpublished working paper, 2012.

[7] ANAS A, LIU Y. A regional economy, land use, and transportation model (Relu-Tran?): formulation, algorithm design, and testing[J]. *Journal of Regional Science*, 2007, 47(3): 415-455.

[8] BATTY M. Progress, success, and failure in urban modelling[J]. *Environment and Planning A*, 1979, 11(8): 863-878.

[9] BATTY M. Cellular automata and urban form: a primer[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1997, 63(2): 266-274.

[10] BATTY M. Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals[M]. The MIT press, 2007.

[11] BATTY M. Cities as complex systems: scaling, interactions, networks, dynamics and urban morphologies[J]. UCL working paper series, 2008, 131: 1041-1071.

[12] BATTY M. Urban modeling. *International Encyclopedia of Human Geography*, Elsevier, Oxford [M]. Elsevier, Oxford, 2009.

[13] BATTY M. A generic framework for computational spatial modelling[M]//Agent-based models of geographical systems, Springer, 2012: 19-50.

[14] BEAUMONT J R, CLARKE M, WILSON A G. The dynamics of urban spatial structure: some exploratory results using difference equations and bifurcation theory[J]. *Environment and Planning A*, 1981, 13(12): 1473-1483.

[15] COUCLELIS H. Modelling frameworks, paradigms, and approaches[M]// CLARKE K C, PARKS B E, CRANES M P. *Geographic information systems and environmental modeling*. New York: Longman & Co, 2000.

[16] DE LA BARRA T. Integrated land use and transport modelling. *Decision chains and hierarchies* [M]. Decision chains and hierarchies, 1989.

[17] DE LA BARRA T. The mathematical and algorithmic structure of TRANUS[R]. Unpublished paper available at <http://www.modelistica.com>, 1998.

[18] ECHENIQUE M. Econometric models of land use and transportation[M]. Elsevier, Oxford, 2004.

[19] ECHENIQUE M, HARGREAVES A. Presentation of project overview[G]. Epsrc Revisions Final Conference, London, 2012.

[20] ECHENIQUE M H, FLOWERDEW A D, HUNT J D, MAYO T R, et al. The meplan models of bilbao, leeds and dortmund[J]. *Transport Reviews*, 1990, 10(4): 309-322.

[21] ECHENIQUE M H, HARGREAVES A J, MITCHELL G, et al. Growing cities sustainably: does urban form really matter[J]?. *Journal of the American Planning Association*, 2012, 78(2): 121-137.

[22] HAASE D, SCHWARZ N. Simulation models on human-nature interactions in urban landscapes: a review including spatial economics, system dynamics, cellular automata and agentbased approaches[J]. *Living Reviews in Landscape Research*, 2009, 3(2): 1-45.

[23] HANSEN W G. How accessibility shapes land use[J]. *Journal of the American Institute of Planners*, 1959, 25(2): 73-76.

[24] HEPPENSTALL A J, CROOKS A T, SEE L M. Agent-based models of geographical systems [M]. Springer, 2012.

[25] HUNT J D, ABRAHAM J E. Design and implementation of PECAS: A generalised system for allocating economic production, exchange and consumption quantities[M]. Elsevier, Oxford, 2005.

[26] HUNT J D, KRIGER D S, MILLER E. Current operational urban land - use - transport modelling frameworks: A review[J]. *Transport Reviews*, 2005 25(3): 329-376.

[27] IACONO M, LEVINSON D, EL-GENEIDY A. Models of transportation and land use change: a guide to the territory[J]. *Journal of Planning Literature*, 2008, 22(4): 323-340.

[28] ISARD W. Interregional and regional input-output analysis: a model of a space-economy[J]. *The review of Economics and Statistics*, 1951, 33(4): 318-328.

[29] ISARD W. *Methods of regional analysis: an introduction to regional science*[R], 1960.

[30] JIN Y, ECHENIQUE M. Employment location modelling within an integrated land use and transport framework: taking cue from policy perspectives[M]//Employment Location in Cities and Regions. Springer, 2012: 133-158.

[31] JIN Y, ECHENIQUE M, HARGREAVES A. A spatial recursive equilibrium model that incorporates the dynamics of large scale land use development and restructuring[J]. *Environment and Planning B*, 2013, 40(6): 1027-1050.

[32] Jin, Y., I. Williams. A new land use and transport interaction model for London and its surrounding regions[G]. *Proceedings of The Aeteuropean Transport Conference*, Homerton College, Cambridge, Uk-Cd rom, 2002-09.

[33] LEE D B. Retrospective on large-scale urban models[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, 60(1): 35-40.

[34] LEE Jr, D. B. *Requiem for large-scale models*[J].

Journal of the American Institute of Planners, 1973, 39(3): 163-178.

[35] LOWRY I S. A model of metropolis[R]. US Defence Documentation Centre, 1964.

[36] MACKETT R L. Leeds Integrated Land-Use Transport Model (LILT)[R], 1983.

[37] MACKETT R L, LILT and MEPLAN: a comparative analysis of land - use and transport policies for Leeds[J]. *Transport Reviews*, 1991, 11(2): 131-154.

[38] MILLS E S. An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area[J]. *The American Economic Review*, 1967, 57(2): 197-210.

[39] MUTH R F. The spatial structure of the housing market[J]. *Papers in Regional Science*, 1961, 7 (1): 207-220.

[40] PARKER D C. Agent-based models of land-use and land-cover change[M]. LUCC, 2002.

[41] SIMMONDS D. The design of the DELTA land-use modelling package[J]. *Environment and Planning B*, 1999, 26: 665-684.

[42] SIMMONDS D C P, WADDELL M W. Equilibrium v. dynamics in urban modelling[C]. Paper presented at the Symposium on Applied Urban Modelling (AUM 2011) "Innovation in Urban Modelling" at the University of Cambridge, 2011.

[43] SIMON H. *Models of man: social and rational-mathematical essays on rational human behavior in a social setting*[M]. Wiley, 1957.

[44] VARIAN H R. *Microeconomic analysis*[M]. New York: Norton 1992.

[45] VARIAN H R, ARBOR A. *Intermediate microeconomics: a modern approach*[M]. Norton, 2010.

[46] WADDELL P. Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2002 68(3): 297-314.

[47] WADDELL P, BORNING A, NOTH M, et al. Microsimulation of urban development and location choices: design and implementation of urbanSim[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2003 3(1): 43-67.

[48] WALRAS L, JAFFÉ W. *Elements of pure economics; or, the theory of social wealth*[R]. American Economic Association and the Royal Economic Society, 1954.

[49] WEGENER M. The IRPUD model[R/OL]. Dortmund. Online available at http://www.raumplanung.uni-dortmund.de/irpud/pro/mod/mod_e.htm, 1998.

[50] WEGENER M, FÜRST F. Land-use transport interaction: state of the art[R]. Available at SSRN 1434678, 2004.

[51] WEGENER M, GNAD F, VANNAHME M. The time scale of urban change[M]. IRPUD, 1986.

[52] WILSON A. The use of the concept of entropy in system modelling[J]. *Operational Research Quarterly*, 1970, 21(2): 247-265.

[53] Wilson, A. G. The use of entropy maximising models, in the theory of trip distribution, mode split and route split[J]. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1969, 3(1): 108-126.

[54] Wilson, A. G. Land-use/transport interaction models: Past and future[J]. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1998, 32(1): 3-26.

[55] 周彬学, 戴特奇, 梁进社, 张华. 基于 Lowry 模型的北京市城市空间结构模拟[J]. *地理学报*, 2013, 68(4): 491-505. (ZHOU

- Binxue, DAI Teqi, LIANG Jinshe, ZHANG Hua. Lowry-model simulation of Beijing urban spatial structure[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(4): 491-505.
- [56] 孙晓光, 庄一民. 介绍两个城市数学模型[J]. 城市规划, 1984(1): 29-34. (SUN Xiaoguang, ZHUANG Yimin. Introduction of two urban quantitative models[J]. City Planning Review, 1984(1): 29-34.)
- [57] 朱玮, 王德. 大尺度城市模型与城市规划[J]. 城市规划, 2003(5): 47-54. (ZHU Wei, WANG De. Large scale urban models and urban planning[J]. City Planning Review, 2003(5): 47-54.)
- [58] 梁进社, 楚波. 北京的城市扩展和空间依存发展[J]. 城市规划, 2005(6): 9-14. (LIANG Jinshe, CHU Bo. Beijing urban expansion and spatial-dependent development[J]. City Planning Review, 2005(6): 9-14.)
- [59] 毛蒋兴, 闫小培. 国外城市交通系统与土地利用互动关系研究[J]. 城市规划, 2004(7): 64-69. (MAO Jiangxing, YAN Xiaopei. International review on the interaction of urban transport and land use system[J]. City Planning Review, 2004(7): 64-69.)
- [60] 潘海啸. 面向低碳的城市空间结构——城市交通与土地使用的新模式[J]. 城市发展研究, 2010(1): 40-45. (PAN Haixiao. Towards low-carbon urban spatial structure — new mode for urban transport and land use[J]. Urban Studies, 2010(1): 40-45.)
- [61] 潘海啸. 美国城市建设中交通与土地使用规划新策略的启示[J]. 城市交通, 2013(1): 1-3. (PAN Haixiao. New planning strategy of American transportation and land use integration[J]. Urban Transport of China, 2013(1): 1-3.)
- [62] 王绎究. 国外城市土地利用与交通一体规划的方法与实践[J]. 国外城市规划, 2001(1): 6-9. (WANG Jiyuan. Foreign planning method and application of urban land use and transport integration[J]. Urban Planning Overseas, 2001(1): 6-9.)
- [63] 石楠. 城市规划科学性源于科学的规划实践[J]. 城市规划, 2003(2): 82. (SHI Nan. Scientific urban planning practice[J]. City Planning Review, 2003(2): 82.)
- [64] 赵童. 国外城市土地使用—交通系统一体化模型[J]. 经济地理, 2000(6): 79-83. (ZHAO Tong. Foreign urban land-use and transport integrated models[J]. Economic Geography, 2000(6): 79-83.)
- [65] 邹兵. 关于城市规划学科性质的认识及其发展方向的思考[J]. 城市规划学刊, 2005(1): 28-30. (ZOU Bin. Thoughts on the science of urban planning and the future development[J]. Urban Planning Forum, 2005(1): 28-30.)
- [66] 邹德慈. 论城市规划的科学性与科学的城市规划[J]. 城市规划, 2003(2): 77-79. (ZOU Deci. The science of urban planning and scientific urban practices[J]. City Planning Review, 2003(2): 77-79.)
- [67] 钱寒峰, 杨涛, 杨明. 城市交通规划与土地利用规划的互动[J]. 城市问题, 2010(11): 21-25. (QIAN Hanfeng, YANG Tao, YANG Ming. Interaction between urban transport and land use planning[J]. Urban Problems, 2010(11): 21-25.)
- [68] 韦亚平, 赵民, 汪劲柏. 紧凑城市发展与土地利用绩效的测度——“屠能-阿隆索”模型的扩展与应用[J]. 城市规划学刊, 2008(3): 32-40. (WEI Yaping, ZHAO Min, WANG Jinbai. Measuring compact land use development — extension of Thunen-Alonso models[J]. Urban Planning Forum, 2008(3): 32-40.)
- [69] 黎夏, 叶嘉安. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟[J]. 地理学报, 1999(4): 289-298. (LI Xia, YE Jiaan. Simulation of sustainable urban development with constraint CA model[J]. Acta Geographica Sinica, 1999(4): 289-298.)
- [70] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机 CA 及真实和优化的城市模拟[J]. 地理学报, 2002(2): 159-166. (LI Xia, YE Jiaan. Urban simulation with neural network based CA model[J]. Acta Geographica Sinica, 2002(2): 159-166.)
- [71] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. 地理研究, 2005(1): 19-27. (LI Xia, YE Jiaan. Simulation of complex urban land use with neural network based CA model[J]. Geographical Research, 2005(1): 19-27.)
- [72] 龙瀛, 沈振江, 毛其智. 城市系统微观模拟中的个体数据获取新方法[J]. 地理学报, 2011(3): 416-426. (LONG Ying, SHEN Zhenjiang, MAO Qizhi. New method for retrieving individual data in urban micro simulation[J]. Acta Geographica Sinica, 2011(3): 416-426.)
- [73] 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性 CA 制定城市增长边界[J]. 地理学报, 2009(8): 999-1008. (LONG Ying, HAN Haoying, MAO Qizhi. Defining urban growth boundary with constraint CA model[J]. Acta Geographica Sinica, 2009(8): 999-1008.)

收稿: 2013-10

修回: 2013-12