

引用格式:赵鹏军,万婕.城市交通与土地利用一体化模型的核心算法进展及技术创新[J].地球信息科学学报,2020,22(4):792-804. [Zhao P J, Wan J. The development and innovation of the core algorithm of the integrated model of urban transport and land use[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(4):792-804.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190628

城市交通与土地利用一体化模型的核心算法 进展及技术创新

赵鹏军, 万 婕

北京大学城市与环境学院城市规划与交通研究中心, 北京 100871

The Development and Innovation of the Core Algorithm of the Integrated Model of Urban Transport and Land Use

ZHAO Pengjun*, WAN Jie

The Centre for Urban Planning and Transport Studies, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The coordinated development of urban transport and land use is of great practical significance to optimize urban spatial structure, reduce traffic congestion, and improve transport level. The integration of land use and transport systems is important for smart growth and sustainable development of cities. The integrated model of urban transport and land use is a key scientific support to analyze and simulate the interaction between urban transport and land use. Over the years, scholars in different countries have developed operational models that can be used for urban spatial policy formulation. However, the core algorithm of these models still need to be further improved. In this paper, the theoretical characteristics of existing mainstream models were analyzed. Based on the theoretical basis and the core algorithms, the advantages and disadvantages of six models were discussed, including spatial interaction model, urban economics and mathematical planning model, spatial input-output model, discrete choice model, micro-simulation model, and cellular automata model. A new comprehensive equilibrium model was proposed to overcome the shortcomings of the existing models. On the one hand, endogenous variable processing and dynamic feedback of the key algorithms need to be improved. On the other hand, the existing models do not fully consider the impacts of exogenous variables such as technological innovation, urban management, and urban planning policies. Therefore, new thinking was put forward for the core algorithm incorporating three key variables: Accessibility, land use characteristics, and travel cost. The equilibrium model adopts land use intensity and diversity to represent land use characteristics, and uses the improved algorithm of accessibility that takes into account the repulsive force caused by housing price and the opportunity scale of land use characteristics. In the generalized travel cost, attributes at the individual level and characteristics at the urban environment level are considered comprehensively. New

收稿日期:2019-10-25;修回日期:2019-11-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(41925003);英国研究理事会全球挑战基金项目(R48843)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41925003; Global Challenges Research Fund of the Research Councils United Kingdom, No.R48843.]

作者简介:赵鹏军(1975—),男,陕西延安人,教授,博士生导师,主要从事交通与空间规划研究。

E-mail: pengjun.zhao@pku.edu.cn

algorithms were also proposed for the three modules of the integrated model, which include the residence and employment location decision module that considers incremental discrete selection process, the land supply and real estate development module that subdivides real estate types and dynamically feeds back land development results to urban land use evolution, and the comprehensive transport model that adopts improved impedance function, dynamic travel cost, and car ownership. It has important theoretical value for quantitative simulation of urban spatial evolution, prediction of trip distribution, and evaluation of urban management and planning policies. At the same time, it is of practical significance to develop the integrated model of urban transport and land use in China, so as to optimize the distribution of population and trip demand, and ease urban traffic congestion.

Key words: urban transport; land use; integrated model; algorithm features; key variable innovation; location choice; real estate development; model simulation

***Corresponding author:** ZHAO Pengjun, E-mail: pengjun.zhao@pku.edu.cn

摘要:交通与土地利用的协调发展是缓解城市交通拥堵、提升交通水平的关键。城市交通与土地利用一体化模型则是分析和模拟城市交通与土地利用相互作用过程的重要科学支撑。多年来不同国家学者已研发出一些操作模型,并用于城市空间政策的制定研究,但这些模型的核心算法仍需进一步升级完善。本文首先梳理了当前已有主流模型的理论特征,解析了这些模型的核心算法发展及其优缺点;然后针对关键算法的不足,提出新的综合均衡模型,就区位可达性、用地混合度与强度、出行成本3个关键变量的核心算法展开讨论;最后,进一步形成模型各子模块的算法创新,包括考虑增量离散选择过程的居住与就业区位决策模块、细分房地产类型并将土地开发结果动态反馈至城市用地演变的房地产开发模块、采用改进的阻抗函数、小汽车拥有情况和动态出行成本的交通综合模型。本文对于量化分析模拟城市复杂系统、研发我国城市交通与土地利用一体化模型具有一定的参考价值。

关键词:城市交通;土地利用;一体化模型;算法特征;关键变量创新;区位决策;房地产开发;模型模拟

1 引言

20世纪90年代以来,中国主要大城市中的交通拥堵、环境污染、土地利用集约水平低等“城市病”问题日益凸显,深刻影响着中国城市可持续发展。造成这些问题的重要原因之一是城市交通与土地利用的不协调,如职住不平衡、土地开发过程中公共服务交通可达性低等。促进城市土地利用与交通系统的协调发展,对于提升我国城镇化的可持续性至关重要^[1]。

国外相关研究表明,合理的土地利用结构和布局可以优化调整交通出行需求结构^[2-3],交通基础设施的布局 and 交通需求的时空分布又会反作用于土地利用,直接影响土地价格^[4],从而进一步作用于城市用地。促进土地利用和交通系统的协调发展,实现土地利用与交通系统的一体化发展,对从根源上优化城市空间结构、解决城市交通问题以及实现可持续发展具有重要的现实意义,被认为是城市精明增长与可持续发展的重要手段。

城市交通与土地利用一体化模型是分析和模拟城市交通与土地利用交互过程的重要科学技术支撑。自Lowry模型首次探索土地利用与城市交

通的互馈过程以来,伴随着随机效用理论、离散选择模型、空间经济学、GIS技术等理论和方法的形成发展,城市交通—土地利用一体化模型不断发展^[5]。城市交通—土地利用一体化模型在大城市的交通设施布局 and 空间规划决策中是重要的技术工具,已应用于伦敦(MEPLAN模型)、东京(LILT模型)、芝加哥(METROSIM模型)等城市。

中国城市空间和交通系统在快速城镇化、现代化和机动化的背景下,表现出较大的发展不确定性,需要更加科学的城市模拟与规划预测评估技术。尤其是互联网技术、交通新技术和生活方式变化等迅猛发展,为城市交通和土地利用的模拟预测提出了新的挑战。面对日益复杂的城市空间和交通问题,如何更好地探索分析和预测工具以揭示城市空间演变机制,系统地思考其内在本质以提高土地利用与交通规划策略的科学性,便成为了城市经济学、交通经济学、城市规划管理等相关领域关注的重点。

针对上述问题,本文将从城市交通与土地利用相互作用的理论基础、机制因素、一体化模型构架和核心算法等方面,对已有的城市交通与土地利用一体化模型进行回顾,对其关键技术问题与算法优

缺点进行探讨,进而提出城市交通与土地利用一体化模型的综合均衡模型及对各自模块及关键变量算法创新的思考。本研究对于量化模拟城市空间变化过程、评价城市空间政策、预测城市空间演变具有重要理论价值,对优化人口和交通出行需求分布和缓解城市交通拥堵,具有一定的现实意义。

2 城市交通与土地利用相互作用的理论解释

城市交通与土地利用的理论关系经历了长期的发展过程。早期古典经济学派区位理论、芝加哥学派土地利用模式理论、城市空间经济学理论等为城市交通与土地利用的相互作用关系奠定了理论基础^[6]。区位理论学者基于经济学原则将交通系统作为影响市场区和土地区位优势的重要因素,发展出凡·杜能(Von Thunen)的农业区位论、韦伯(Webber)的工业区位论和克里斯泰勒(W. Christaller)的市场区位论等经典地理学理论,以用地的可达性为纽带集中探讨了交通系统与城市居住、就业、商业、其他服务等社会经济功能之间的相互关系。芝加哥学派形成的同心圆模式理论、扇形模式理论和多核心模式理论等强调交通出行活动对城市空间结构的作用。城市空间经济学理论则以经济学理性人假设为前提,解释城市土地价格、居住及就业决策和交通可达性之间的关系。

城市交通与土地利用之间存在循环反馈关系(图1),一方面城市土地利用是交通出行需求产生的根源,也是城市交通系统空间布局的基础,在一定程度上塑造了交通结构并对交通网络设施容量和服务水平提出新的要求。另一方面,交通系统对土地利用和城市发展具有引导作用,通过改变可达性重塑城市人口与经济活动分布,刺激新的土地开发,并再次开始土地利用与交通系统相互影响的循环,直至趋于平衡。

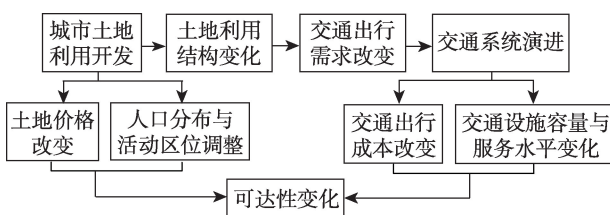


图1 城市交通与土地利用的互动反馈关系

Fig. 1 Interactive feedback relationship between urban transport and land use

国内外已有大量实证研究从不同方面探讨了城市交通与土地利用的互动反馈关系。一方面,就城市交通对土地利用的影响而言,多位学者研究发现城市道路网络设施水平提升能够促进城市增长^[7],提高土地租金与房地产价格,并与高土地开发强度、高用地混合度和高紧凑度等空间形态测度显著正向相关^[2,8]。以道路交通拥堵水平或交通出行成本衡量的城市交通状况则是区位可达性^[9]和土地利用结构^[10]的重要影响因素。另一方面,从土地利用对城市交通的作用来看,城市空间结构与职住平衡关系对于居民出行方向、距离和交通流的分布具有显著影响^[11]。高密度、高职住平衡度以及紧凑的城市空间形态增加了居民出行的可达性^[12],从而对居民交通出行距离和出行方式产生显著作用^[13]。在布局上注重居住、工作、休闲、娱乐等不同功能之间的联系与匹配的土地混合利用方式有助于减少居民的出行距离和时间,并降低机动车出行可能性,促进非机动车和公共交通出行比例的提升^[14]。

3 一体化模型的算法特征

根据一体化模型的理论依据和核心算法,现有的模型可归纳为6类(表1):空间相互作用模型、城市经济学与数学规划模型、空间投入产出模型、随机效用选择模型、微观仿真模型、元胞自动机模型等。

3.1 空间相互作用模型

此类模型的核心算法思想来源于经典引力模型(式(1))。

$$F_{ij} = kM_i M_j f(c_{ij}) \quad (1)$$

式中: F_{ij} 是城市内 i 和 j 两地点之间以引力衡量的空间相互作用次数; k 是常数; M_i 和 M_j 分别是地点 i 和 j 的活动水平; $f(c_{ij})$ 为交通阻抗函数。以广泛应用的ITLUP模型为例^[37],主体包括居住分配模型DRAM和就业分配模型EMPAL两部分,前者基于区位吸引力和可达性分配家庭数量及人口分布(式(2)),后者依据前一时点各研究单元就业量和区位吸引力分配就业数量(式(3))。

$$E_{j,t}^R = \lambda^R \left[\sum_i P_{i,t-1} A_{i,t-1}^R W_{j,t-1}^R f^R(c_{ij,t}) \right] + (1 - \lambda^R) E_{j,t-1}^R \quad (2)$$

$$N_{i,t}^n = \sum_j \left(\sum_R a_{R_e} E_{j,t}^R \right) \left[\frac{W_{i,t}^n f^n(c_{ij,t})}{\sum_i W_{i,t}^n f^n(c_{ij,t})} \right] \quad (3)$$

表1 代表性城市土地利用与交通一体化模型总结

Tab. 1 Summary of representative integrated models of urban transport and land use

类别	模型	关键变量和核心算法原则	优势	缺点
空间相互作用模型	TOMM模型 ^[15]	考虑城市空间相互作用与不同收入组别居民的空间分配	形式简单,易于获取数据来定量表达城市土地利用间的相互作用,进行模型校准	基于统计学模型,缺乏经济学理论解释,积极模型难以描述个体离散行为选择
	熵最大化模型 ^[16]	衡量不同区位的可达性和吸引力指标的空间相互作用关系		
	ITLUP模型 ^[17]	第一个土地、人口就业与交通的集成系统,应用广泛		
	PLUM模型 ^[18]	基于空间相互作用的城市活动分布模型		
	LILT模型 ^[19]	基于统计模型的人口、就业、用地预测与交通流分配		
城市经济学与数学规划模型	Simulacra模型 ^[20]	城市用地的时间动态模拟过程	模型目标明确,能有效优化城市用地布局和交通发展方案	模型约束条件简单,难以综合衡量土地与交通系统的复杂作用过程
	TOPAZ模型 ^[21]	以最低的出行、公共服务、建筑等基础条件确定城市土地利用模式的最优方案(出行成本)		
	Oppenheim模型 ^[22]	综合区位选址成本和交通出行成本之和的最小化目标函数(出行成本)		
空间投入产出模型	MUSSA模型 ^[23]	地租理论框架下的土地和住房市场,形成不同类别家庭的住房区位决策与交通出行选择	从经济学理论考虑空间投入产出关系,从而模拟城市土地利用变化	考虑集聚行为,无法描述个体行为与决策过程
	PECAS模型 ^[24]	利用区域经济学模型对地块层面土地开发的微观模拟		
	MEPLAN模型 ^[25]	考虑空间投入产出关系产生的交通出行作为经济互动的派生需求(生产与消费、交通成本)		
随机效用选择模型	TRANUS模型 ^[26]	基于人、物流动的城市活动空间分布于相互作用,形成交通出行产生与路径选择的复杂联合模型(广义出行成本)	考虑微观个体理性人假定的决策过程	对于输入数据的要求较高
	DELTA模型 ^[27]	考虑城市人口结构与社会经济属性转变的模拟(出行可达性)		
微观仿真模型	METROSIM模型 ^[28]	在离散、非平稳的房地产市场动态均衡中的投资者和消费者的概率离散选择	能够更有效地描述城市土地利用与交通系统中决策个体的微观行为	输入数据的要 求较高,处理难度较大
	Urbansim模型 ^[5]	地块层面考虑人口转变和土地利用的综合模型(用地结构、出行成本)		
	ILUTE模型 ^[29]	包括土地利用、区位选择、汽车拥有权、基于活动的出行模型的城市系统		
	Ramblas模型 ^[30]	微观人口模拟(用地结构)		
	MASTER模型 ^[31]	以家庭为分析单元,考虑城市人口数量增长与结构转变		
	IRPUD模型 ^[32]	模拟城市活动区位选择和迁移决策(经济、人口、用地结构)		
元胞自动机和多智能体模型	ILUMASS模型 ^[33]	集成微观模型和环境评估的扩展模型(用地结构、人口流动性)	更加精确地描述城市复杂系统中的土地利用演变过程	仍需提升综合考虑人口、社会经济、政策环境对系统的影响
	SLEUTH模型 ^[34]	使用预先定义增长规则在空间上嵌套循环的城市用地网格的元胞自动机模型		
	DEUM模型 ^[35]	模拟城市土地利用演变过程		
	CLUE-S模型 ^[36]	基于系统论综合分析城市土地利用变化与社会经济、物理等驱动过程		

式中: $E_{j,t}^R$ 是 t 时段区域 j 中第 R 类行业的就业总量; $P_{i,t-1}$ 、 $A_{i,t-1}^R$ 分别是 $(t-1)$ 时段区域 i 内的居住家庭数量和平衡参数; $W_{j,t-1}^R$ 、 $E_{j,t-1}^R$ 分别是 $(t-1)$ 时段区域 j 的第 R 类出行吸引量和第 R 类行业就业数量; $E_{j,t}^R$ 为 t 时段区域 j 第 R 类行业的就业数量; $f^R(c_{ij,t})$ 、 $f^n(c_{ij,t})$ 分别是 t 时段内第 R 类出行者、第 n 类收入水平居民从区域 i 到 j 的出行成本函数; λ^R 为经验参数; $N_{i,t}^n$ 是 t 时段区域 i 内第 n 类收入水平的居住家庭数量; a_R 是第 R 类行业就业数量与第 n 类收入水平家庭的区域相关系数; $W_{i,t}^n$ 是区域 i 的出行吸引量。即土地利用初次分配结果形成交通出行活动分布,进一步影响空间分配和土地利用,从而修正区位可达性^[38]。以可达性、区位吸引力作为

在居住分配、就业分配和交通需求预测模型之间互相反馈的关键变量。

从核心算法来看,基于空间相互作用的模型具有综合性、灵活性和形式简单等优势,其劣势主要体现在:①基于宏观行为假设的集计模型难以对微观个体行为进行模拟;②基于统计模型的居住与就业分配量模拟在政策情境分析方面具有一定局限性,无法反映市场机制下政策或基础设施变化对土地开发市场的动态影响;③作为静态模型缺乏土地利用和交通系统之间的动态反馈与系统联系,仅以考虑人口、就业、面积等的吸引力指标衡量各分区地理特征对交通系统的作用结果^[39]。

3.2 城市经济学与数学规划模型

基于城市经济学竞租理论的模型以决策者竞

拍过程所形成的土地市场供需均衡条件考虑土地利用与交通系统之间的关系^[40]。此类模型以这一原理作为城市用地空间布局与居住和活动区位选择的算法思路,即构建行为主体包含有交通成本和城市活动系统成本的目标函数 $F(x)$,并在一系列约束条件 $g_j(x)$ 及其临界值 b_j 下对收益最大化或成本最小化求解数学规划模型^[41](式(4))。

$$\min F(x), \text{ s.t. } g_j(x) \geq b_j (j=1, 2, \dots, J) \quad (4)$$

具有代表性的POLIS模型、TOPAZ模型等均与城市经济活动空间分布有关的通勤、购物等目的出行成本作为关键变量^[21]。数学规划模型目标明确,有助于明确城市内各区域人口与经济活动的最优分布。但作为集计模型在描述城市微观个体决策过程方面仍存在一定的局限性,且在固定的出行成本下无法有效表征城市土地利用与交通系统的不断相互反馈与调节过程。针对这一缺陷,有学者纳入对内生区位成本的研究,如Oppenheim模型综合区域选址成本和交通出行成本之和的最小化目标函数^[22],从而在出行需求分析中考虑了土地利用与交通系统之间的相互作用。

3.3 空间投入产出模型

空间投入产出模型基于经济学的投入—产出关系对城市活动的空间布局和区域之间的人流、物流进行预测。基本思路为假定投入产出系数对价格和收入具有弹性,通过随机效用将活动空间需求分配到城市空间,从而由生产和消费产生对交通的需求,直接生成交通流分布。

首先,基于城市空间内多区域投入产出,建立随机效用模型(式(5))。

$$X_{ij}^{mn} = Y_i^m a^{mn} \min(K_j^n + C_{ij}^n + e_j^n) \quad (5)$$

式中: X_{ij}^{mn} 为 i 区域 m 部门的需求单位从 j 区域的生产者购买产品的数量; Y_i^m 为最终需求量,假定所有地区和部门都有可能生产出满足这种需求的产品; a^{mn} 为计算满足区域 i 部门 m 所需商品 n 的数量的技术系数; K_j^n 是 j 生产产品 n 的成本; C_{ij}^n 是运输到 i 的交通成本; e_j^n 是 j 处 n 生产的生产者剩余。

然后,将个体集计,形成包含随机元素的总体决策效用函数 $-\beta^n V_{ij}^n$,构成多项式 logit 模型(式(6))。

$$X_{ij}^{mn} = Y_i^m a^{mn} \frac{\exp(-\beta^n V_{ij}^n)}{\sum_j \exp(-\beta^n V_{ij}^n)} \quad (6)$$

由此将生产和消费表征的城市活动转化为交通运输需求,得到交通流分布。相较其他模型的交通系统,这一算法思路不仅建立在人口与用地分布基础上,同时可基于交通基础设施和政策环境对土地利用市场的影响反馈,从而增强了模型模拟并评估社会经济、交通要素和城市规划政策情境的能力。

3.4 随机效用选择模型

随机效用模型基于微观经济学从决策者效用最大化的角度来处理交通和土地利用之间的关系。将交通出行作为实现城市活动的派生需求^[42],其产生的时间成本、货币成本、心理成本等共同组成了出行活动的负效用,个体在可供选择的选项中作出效用最大化的理性决策,构建基本多项式 logit 模型(式(7)),广泛应用于出行方式决策模拟。

$$P_k = \frac{\exp[V_k(X_k)]}{\sum_k \exp[V_k(X_k)]} \quad (7)$$

式中: P_k 为个体选择选项 k 的概率; $V_k(X_k)$ 为选项 k 可测属性 X_k 表征的可观测效用函数。在此基础上发展出了考虑不同居民组别出行成本敏感性差异的嵌套 logit 模型等多种形式^[43]。

3.5 微观仿真模型

不同于传统自上而下的宏观集计模型,微观仿真模型以每一个决策者独有的属性特征捕捉交通与土地系统之间的相互作用关系^[44]。其算法思路为对预先设定的概率分布随机数和特定个体的属性或出行特征之间建立联系,再通过对所有个体出行决策的模拟,得到一定空间范围内的集计结果。

3.6 元胞自动机和多智能体模型

元胞自动机模型通过模拟微观物体行为对城市空间的宏观演化规律进行仿真。模型包含4个要素:元胞、状态、领域和转换规则,领域的元胞通过一定行为转换规则影响中心元胞的下一个状态,从而形成整体的不断演化。但单一的元胞自动机模型多用于城市用地变化模拟,无法综合衡量城市人口转变、经济增长、交通流分布的过程^[45]。因此结合多智能体模型,纳入智能体、空间环境和相互作用原则等要素^[46],从而在分析土地利用动态变化与城市要素的相互作用中显现出更强的开放性和灵活性。

4 对一体化模型核心算法的创新思考

4.1 模型结构和关键变量算法创新

城市系统具有开放性和复杂性特征,交通是城市中的“社会—技术—空间”多元系统^[47]。这一客观规律表明城市交通与土地利用一体化模型设计算法中,需要综合考虑更多的因素,处理好内生变量和外生变量之间的互馈作用关系^[48]。但总体来看,既有模型一方面在外生变量方面考虑不够全面,特别是对技术革新、城市规划与交通管理、土地开发等政策因素考虑不足;另一方面则在土地利用、区位可达性、交通出行成本等关键变量的算法、内生化处理与模型动态反馈^[49]上有待完善。

针对上述2个方面问题,本文提出新的思考:

(1)对模型结构和关键变量的创新

本文提出综合均衡的城市交通与土地利用一体化模型(图2),主要包括3个模块:居住与就业地区位决策、土地供应与房地产开发、交通综合模型模块。从自然结构和社会规律来看,一体化模型阐释的是城市土地利用和交通系统之间的相互作用^[39],因此这一理论在中国不同城市的应用不应当存在特殊性。而不同之处一方面在于不同城市的人口与就业规模和结构、道路交通设施、城市空间布局等特征。故算法各子模块初始条件尽可能涵盖具有显著作用关系的所有变量,初始变量对应参

数的标定与设置在实际应用中产生差异;另一方面在于模型实际应用所面向的不同政策评估、规划论证等功能问题,因而模型算法设计中包括技术革新、城市规划与交通管理政策等其他外生条件^[50],从而增强了在不同外部情境下模拟城市系统演变过程的开放能力。同时,在内生变量上,本模型将用地混合度和强度、区位可达性、出行成本作为连接各子模块间相互关系的关键内生变量,使得居民的居住与就业区位决策、开发商房地产供应决策以及政府部门交通供给决策与居民出行选择决策之间相互作用,弥补了既有静态模型中交通系统对土地利用反馈作用不足的问题。

(2)对关键内生变量的算法创新

① 土地利用特征方面,包括用地类型、混合度与土地开发强度变量的创新。大量实证研究表明用地混合度与土地开发强度显著影响交通出行的频率^[3]、距离^[14]、时间^[51]、方式选择^[52]等特征。但已有模型往往只考虑不同土地利用类型,对用地混合度和开发强度没有单独计算。本文将用地混合度和强度作为综合模型的内生变量,既是居民居住与就业区位选择、交通出行决策的影响因素,又是土地供应与房地产开发结果的输出变量,从而形成在子模块之间的反馈联系。土地开发强度反映土地利用程度和承载密度的高低^[53],模型采用政府调控和规划管理的主要指标建筑面积和容积率来表征。

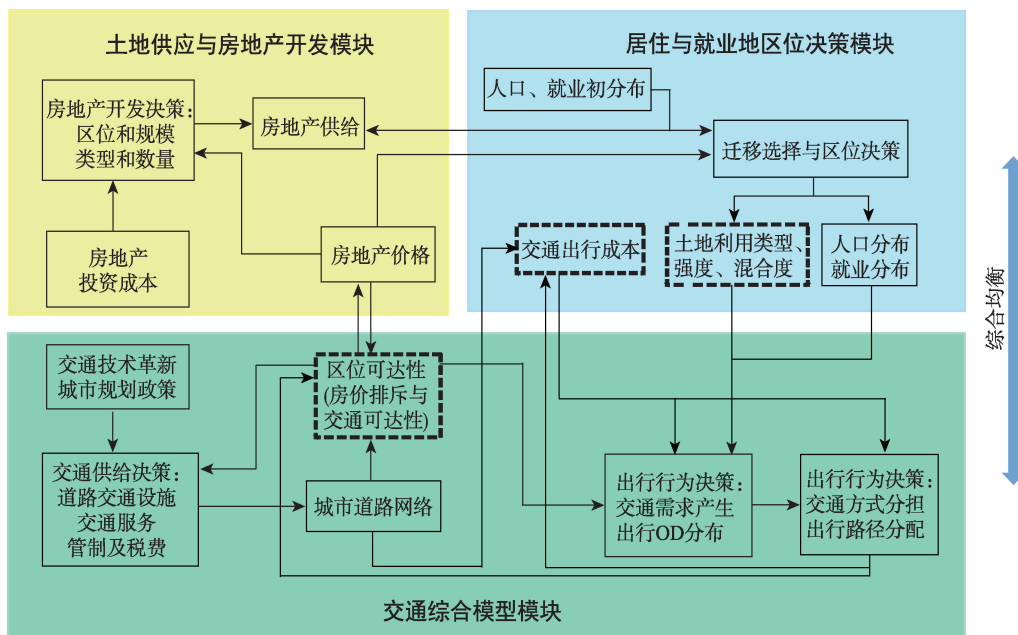


图2 城市土地利用与交通一体化的综合均衡模型框架

Fig. 2 The comprehensive equilibrium model framework for integrating urban land use and transport

考虑可开发用地(居住用地、商业服务设施用地、工业用地);规划控制用地(农业用地、其他非建设用地、教育科研用地);服务配套用地(公共管理与公共服务、物流仓储、城市公共设施、绿地广场、道路交通用地)3大类别中不同性质城市用地的强度对职住选择与交通出行的影响,并与房地产开发模块中用地的发展演变形成互动反馈关系。 t 时段内区域 i 的第 v 类性质用地的建筑面积 $FA'_{i,v}$ 与容积率 $FAR'_{i,v}$ 之间存在关系(式(8))。

$$FAR'_{i,v} = \frac{FA'_{i,v}}{LA'_{i,v}} \quad (8)$$

式中: $LA'_{i,v}$ 是为该区域内第 v 类用地的占地面积。用地混合度以土地利用结构的熵指数形式测度^[54-55], t 时段内区域 i 的用地混合度 LUM'_i 为:

$$LUM'_i = -\frac{\sum_{v=1}^N p'_{i,v} \ln p'_{i,v}}{\ln N} \quad (9)$$

式中: N 为区域 i 内的用地类型数目; $p'_{i,v}$ 为 t 时段交通小区 i 内 v 类型用地面积在总用地中的比例。

② 可达性算法的创新。区位可达性衡量两地理单元之间联系和交通往来的便捷程度,在土地利用与交通的互动作用中发挥着核心作用^[56]。即某一特定地理单元的区位可达性可理解为其他所有地理单元与其联系来往的难易程度。可达性 A_i 的基本计算公式为:

$$A_i = \sum_j \frac{D_j}{d_{ij}} \quad (10)$$

式中: d_{ij} 代表空间距离、时间距离或其他阻隔; D_j 表征目的地的潜在机会规模大小。已有基于可达

性的一体化模型对 D_j 的计算以人口规模、就业规模为主,如LILT模型、IRPUD模型等(表2)。这类计算方法普遍存在缺陷,即对于交通流产生的本质规律反映不确切。土地利用及其承载的生产与生活活动在地理空间上的分离是产生交通流的根源^[57],土地利用的类型、强度、多样性和空间分离程度等对交通出行产生具有重要影响^[58]。同时,高房价对于居住区位选择和企业选址也具有一定的斥力^[59],高房价会降低某一区位对于部分居民和企业的使用潜力,即存在对区位可达性的负效应^[60-61]。因此,本文考虑住房价格引致的排斥力,对基于土地利用特征决定的交通可达性进行修正,得到改进的区位可达性算法(式(16))。

$$A_i = \sum_j \frac{D_j}{d_{ij}} \left(\frac{P'_i}{\bar{P}'} \right)^\gamma \quad (16)$$

式中: P'_i 为 t 时段 i 区域内的住房价格; \bar{P}' 为 t 时段城市住房平均价格水平; D_j 通过区域 j 内各类型用地的建筑面积 $FA'_{j,v}$ 与该类用地的出行吸引权重 μ'_v 乘积之和(基于用地出行吸引率法标定得到)测度,以考虑权重的各类型用地开发强度作为交通可达性潜在机会的衡量指标(式(17)), γ 为经验参数。

$$D_j = \sum_v \mu'_v \cdot FA'_{j,v} \quad (17)$$

以北京市为研究对象,以2010年和2015年分别为基准年和预测年构建城市交通与土地利用一体化模型,控制其他处理不变,分别采用仅考虑用地特征的可达性传统算法和包括用地特征与房价的可达性创新算法,基于交通四阶段模型进行出行发生、吸引与分布模拟,并将预测结果与北京市交

表2 既有城市交通与土地利用一体化模型与综合均衡模型中的可达性算法方法

Tab. 2 Accessibility measurement methods of existing integrated models and the comprehensive equilibrium model

模型	可达性测度公式	公式编号	变量与参数说明
已有模型的可达性计算	LILT模型 $A_i = \sum_j \frac{E_j}{d_{ij}}$	(11)	E_j 为区域 i 内的居住人口数量; d_{ij} 为区域 i 和 j 之间的距离
	MUSSA模型 $A_i = \frac{1}{\mu} \ln \left[\sum_k \exp(U_k) \right]$	(12)	U_k 为经济活动产生的效用; μ 为参数
	BLUTI模型 $A_i = \sum_j \ln \left(\frac{E_j}{\sum_k C \times Per} \right)$	(13)	E_j 为区域 j 内的就业人口数量; C 为第 k 类交通方式的出行成本; Per 为此类交通方式的出行比例
	IRPUD模型 $A_i = \sum_j D_j \exp(-\beta c_{ij})$	(14)	c_{ij} 为区域 i 和 j 之间的出行成本; β 为参数; D_j 为土地价格对经济活动的吸引力
综合均衡模型内的可达性算法	$A_i = \sum_j \frac{\sum_v \mu'_v \cdot FA'_{j,v}}{d_{ij}} \left(\frac{P'_i}{\bar{P}'} \right)^\gamma$	(15)	μ'_v 为 v 类型用地的出行吸引率; $FA'_{j,v}$ 为区域 j 内 v 类型用地的建筑面积; P'_i 为 t 时段区域 i 内的住房价格; \bar{P}' 为 t 时段城市住房平均价格水平; d_{ij} 为区域 i 和 j 之间的距离; γ 为参数

通委发布的2015年全市居民出行调查数据结果进行对比(图3)。结果表明,传统可达性算法得到的出行分布模拟偏差有5314组(占比47.59%)的相对百分误差在20%以内,均衡综合模型可达性算法得到的居民出行分布有6987组(占比62.57%)的误差低于20%,后者的模拟效果显著好于前一算法。

③ 交通出行成本算法的创新。出行成本作为城市交通系统与土地利用相互作用的纽带,表征为交通出行成本的最小化目标^[62]。出行成本不仅作为交通出行模块中决定居民出行生成、分布、方式与路径选择的重要输入变量,还会改变居民居住与就业地区位的决策和决策部门交通规划管理方案制定,进而作用于土地开发与城市人口分布,最终影响整个城市交通系统与土地利用系统。模型使用广义出行成本(式(18))以综合考虑影响交通出行的个体层面属性与城市物质环境层面的道路设施条件、交通拥堵水平等^[63-64],改进的出行成本包括时间成本^[64]、货币成本(道路收费、燃油费、公共交通票价等)^[65]、出行舒适度^[66]3个方面。

$$f(c_{ij})_{k,m}^t = \frac{Tc_{ij,k,m}^t + T_{ex,ij,k,m}^t}{VOT_i^t} + Mc_{ij,k,m}^t + u_{ij,k,m}^t \quad (18)$$

式中: $f(c_{ij})_{k,m}^t$ 、 $Tc_{ij,k,m}^t$ 、 $T_{ex,ij,k,m}^t$ 、 $Mc_{ij,k,m}^t$ 、 $u_{ij,k,m}^t$ 分别为从区域*i*至*j*,选择第*k*种交通方式,第*m*条路径的广义出行成本、时间成本、拥堵带来的额外时间成本、货币成本和心理负效用; VOT_i^t 为该区域出行居民的单位时间价值,取决于居民收入水平。

4.2 子模块的核心算法创新

4.2.1 居住与就业地区位决策模块

本模块创新提出增量离散选择模型算法以模

拟城市居民的居住与就业地区位决策过程。居住与就业地区位决策模块算法是城市交通与土地利用一体化模型的关键问题之一,且居住地和就业地选择之间相互作用,二者存在内生关系^[67]。但是,当前模型在考虑新增人口的区位选择时往往将其模型的外生变量,对于新增人口的空间布局采用外部分配和各自增长预测的方法。本文作者将城市人口经济的动态增长过程内生,模型算法采用概率离散选择模型,对新增和搬迁的家庭进行区位分配。居住区位决策模型基本算法公式为:

$$H_{t+1}^i = \Delta H_{t+1} \cdot \frac{H_t^i FA_{t+1}^i \exp(V_{t+1}^i)}{\sum_i [H_t^i FA_{t+1}^i \exp(V_{t+1}^i)]} \quad (19)$$

式中: H_{t+1}^i 为(*t*+1)时段内选择居住地为区域*i*的家庭数量; ΔH_{t+1} 是(*t*+1)时段新增和搬迁家庭的总数, H_t^i 是*t*时段区域*i*的家庭总数; FA_{t+1}^i 是(*t*+1)时段*i*区域可用的住房面积; V_{t+1}^i 为(*t*+1)时段居住在某地的区位效用变量,是设定的一组影响因素的函数。初始要素变量设定包括交通小区*i*在*t*时段的房地产价格 P_t^i ^[68]、区位可达性 A_t^i ^[69]、道路交通水平 RT_t^i ^[70]、就业数量 E_t^i ^[71]、用地混合度 LUM_t^i ^[72](式(20)),待实际应用分析中进行变量显著性检验与参数 β_m ($m=0, 1, \dots, 5$) 的标定。

$$V_{t+1}^i = \beta_0 + \beta_1 P_t^i + \beta_2 A_t^i + \beta_3 RT_t^i + \beta_4 E_t^i + \beta_5 LUM_t^i \quad (20)$$

就业地区位决策与居住地区位决策相互影响^[70]。在就业区位选择模型的效用函数初始变量中,用居住家庭数量替换就业数量来反映两决策间的影响过程,也在一定程度上构成了算法的收敛性基础。

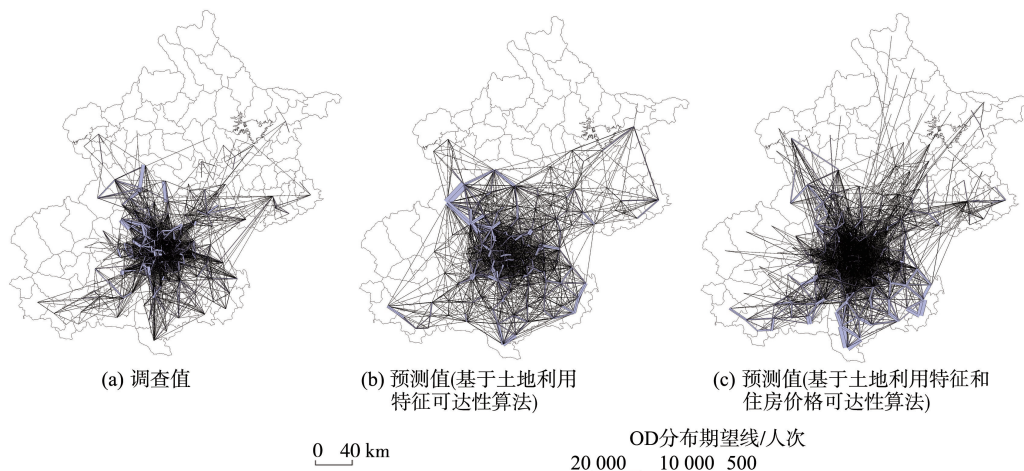


图3 2015年北京市全日居民分街道出行分布调查与预测

Fig. 3 Survey and forecast of the travel distribution of Beijing residents in 2015

4.2.2 土地供应与房地产开发模块

本模块的创新主要体现在对不同用地类型的房价细化及其对用地变化的反馈算法。已有模型虽然考虑了房价对于用地需求和人口布局的影响,但没有将居住、商业、工业等不同功能用地的房地产价格分别考虑,也忽视了不同类型用地房价对于不同人群的区位选择影响,本文对此进行了创新。基于城市经济学基本供需理论, t 时段内区域 i 内第 v 类房地产的使用成本 $C_{i,v}^t$ 为房价 $P_{i,v}^t$ 、实际贷款利率 δ 、房屋折旧率 r 和预期房价增长率(使用前期价格变动 $\Delta P_{i,v}^{t-n}$ 来反映预期增长)的函数(式(21))。

$$C_{i,v}^t = (P_{i,v}^t - \Delta P_{i,v}^{t-n}) \times (r + \delta) \quad (21)$$

房地产需求规模 $D_{i,v}^t$ 的初始影响因素包括区域内的人口数量 R_i^t 、就业岗位数量 E_i^t 、区位可达性 A_i^t 、用地混合度 LUM_i^t 、道路交通水平 RT_i^t 、居民收入 y_i^t 、房地产使用成本^[73-74](式(22)),结合应用城市数据与研究问题确定变量结构及参数。

$$D_{i,v}^t = H(\gamma_0 + \gamma_1 R_i^t + \gamma_2 E_i^t + \gamma_3 A_i^t + \gamma_4 LUM_i^t + \gamma_5 RT_i^t + \gamma_6 y_i^t + \gamma_7 C_{i,v}^t) \quad (22)$$

假定满足市场出清的均衡条件,故有房地产市场需求与现有存量相等,经数学变换得到房地产价格模型(式(23)-(24))。

$$Q_{i,v}^t = D_{i,v}^t = H[\gamma_0 + \gamma_1 R_i^t + \gamma_2 E_i^t + \gamma_3 A_i^t + \gamma_4 LUM_i^t + \gamma_5 RT_i^t + \gamma_6 y_i^t + \gamma_7 (P_{i,v}^t - \Delta P_{i,v}^{t-n}) \times (r + \delta)] \quad (23)$$

$$P_{i,v}^t = \frac{1}{\gamma_7 \times (r + \delta)} \cdot \left[\frac{Q_{i,v}^t}{H} - (\gamma_0 + \gamma_1 R_i^t + \gamma_2 E_i^t + \gamma_3 A_i^t + \gamma_4 LUM_i^t + \gamma_5 RT_i^t + \gamma_6 y_i^t) \right] + \Delta P_{i,v}^{t-n} \quad (24)$$

计算出的房地产价格在每年进行更新并在下一年的居住地区位决策模块中作为输入变量以进行模型的迭代过程。对于商业用房和工业用房,大多为承租方在一定时期内对物业的使用权支付一定的租金,以租赁价格现金流量的折现值作为价格,使得住房、商业用房、工业用房价格模型具有一致性。对于开发商利润最大化选择的概率服从多项式logit模型,在 t 时段内,得到房地产开发商在区域 i 提供第 v 类房地产(住宅、商业用房或工业用房)的概率公式(式(25))。

$$p_{s,i,v}^t = \frac{\exp(U_{i,v}^t)}{\sum_v \exp(U_{i,v}^t)} \quad (25)$$

效用函数 $U_{i,v}^t$ 是房地产价格与土地获取成本、建造成本的差值。据此得到各区域内居住用地、商业服务设施用地、工业用地面积变化量(式(26))。

$$\Delta L A_{i,v}^t = p_{s,i,v}^t \cdot \Delta L S^t \quad (26)$$

并基于新增土地开发的总量控制指标相应增加各区域内可开发用地的土地供应量,同时调整服务配套用地的面积。

4.2.3 交通综合模型模块

交通综合模型模块的创新主要体现在3个方面:阻抗函数的算法创新、小汽车拥有要素的内生化处理、交通流输出结果反馈至出行成本。

(1)已有模型通常采用交通“四阶段法”,对交通需求OD分布使用重力模型进行模拟过程中,阻抗函数的有效测度是关键^[75]。当前已有一体化模型在设计阻抗函数算法时,往往只考虑出行起迄点间的直线空间距离,很少考虑基于道路网络静态结构的实际空间距离和基于交通动态拥堵情况的实际时间距离^[5,26]。针对这些问题,本综合均衡模型对阻抗函数的算法进行了改进,并采用Gamma函数形式以避免常用幂函数或负指数函数形式引致的短距离出行比重偏高问题^[76], t 时段内区域 i 与 j 间的阻抗函数 $f(C_{ij}^t)$ 为:

$$f(C_{ij}^t) = \alpha (c_{ij}^t)^\sigma \cdot e^{-\tau c_{ij}^t} \quad (27)$$

$$c_{ij}^t = t_{ij} + \tau c_{ij}^t \quad (28)$$

式中: c_{ij}^t 为区域 i 与 j 间出行的平均实际时间成本; t_{ij} 为区域 i 与 j 之间考虑道路网络距离的出行时间; τc_{ij}^t 为区域 i 与 j 间的交通拥堵带来的额外时间成本; α, σ, τ 为经验参数。

(2)小汽车拥有水平对于居民出行方式选择具有显著影响^[77]。但是,当前诸多模型往往将其作为外生的居民社会经济属性,而忽视了城市道路设施与公共交通服务水平^[78]对小汽车拥有水平的部分替代作用和出行距离等要素的影响^[13,79]。另外,对一些居民来说拥有小汽车是“被迫”行为(Forced Car Ownership)而非生活方式的选择行为^[80],如城市蔓延导致的公共设施可达性低、公交服务不足等,在一定程度上迫使中低收入者不得不购买小汽车以满足基本的出行需求。本文提出的综合均衡模型将小汽车拥有水平作为内生变量,纳入居民社会经济属性、出行需求和外部环境特征3个方面要素^[81],构建小汽车拥有概率特征的二项logit模型(式(29)-(30))。

$$P_{Co} = \frac{\exp(U_{Co})}{1 + \exp(U_{Co})} \quad (29)$$

$$U_{Co} = \alpha_0 + \alpha_1 I + \alpha_2 C + \alpha_3 PR + \alpha_4 D_c \quad (30)$$

式中: I 为居民收入; C 为家庭是否有孩子; PR 为公共交通服务水平和道路网络特征指数; D_c 为通勤出行距离。

(3)在模型中还对交通流的输出结果进行创新,除了作为常规性的出行成本输入之外,还将其作为可达性的输入变量,交通流所输出的交通拥堵水平作为内生输入变量,反馈至可达性与广义出行成本公式,进而对房价产生影响,影响用地类型和人口集聚分布。这种算法增强了城市交通与土地利用一体化模型对交通影响土地利用的真实动态过程的表现能力。

5 结论

城市土地利用与交通系统之间存在循环反馈关系。促进二者的协调发展,对从根源上优化城市空间结构、解决“城市病”,实现城市可持续发展具有重要的现实意义。城市交通与土地利用一体化模型则是分析和模拟土地利用与交通系统相互作用过程的科学技术支撑。目前国内学者对此的有关研究多数仍处于理论分析和局部变量关系描述阶段,很少综合研究考虑两系统的动态一体化过程。西方国家学者基于不同理论基础研发出一些具有特定适用性的一体化操作模型。

本文基于对城市土地利用与交通一体化互动机理的分析,依据模型理论基础与核心算法特征对6类已有主流模型的算法特征及其优缺点进行了讨论,包括空间相互作用模型、城市经济学与数学规划模型、空间投入产出模型、随机效用选择模型、微观仿真模型、元胞自动机模型。针对既有模型一方面没有全面考虑城市管理与规划政策等外生情景要素,另一方面模型算法的内生变量处理及其动态反馈仍有待完善的问题,提出新的城市交通与土地利用综合均衡模型,并就土地利用特征、区位可达性和出行成本3个方面关键内生变量的算法创新提出新的思考。综合均衡模型以土地开发强度和用地混合度表征土地利用特征,并采用考虑住房价格引致的排斥力和土地利用特征机会规模的可达性改进算法,广义出行成本则综合考虑反映了个体层面属性与城市环境层面特征的时间成本、货币成本和心理效用。在此基础上将一体化模型的3个子模

块关联起来,包括考虑增量离散选择过程的居住与就业区位决策模块;细分房地产类型并将土地开发结果动态反馈至城市用地演变的房地产开发模块;采用改进的阻抗函数、小汽车拥有情况和动态出行成本的交通综合模型。本研究对于量化模拟城市空间演变过程、预测交通出行分布、评价城市管理与规划政策具有重要理论价值。同时,对研发我国城市交通与土地利用一体化模型,优化人口和交通出行需求分布和缓解城市交通拥堵,具有一定的现实意义。

参考文献(References):

- [1] Niu F Q, Wang F, Chen M X. Modelling urban spatial impacts of land-use/ transport policies[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019,29(2):197-212.
- [2] Cervero R, Chang D K. Bus rapid transit impacts on land uses and land values in Seoul, Korea[J]. *Transport Policy*, 2011,18(1):102-116.
- [3] Zhang M Z, Zhao P J. The impact of land-use mix on residents' travel energy consumption: New evidence from Beijing[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017,57:224-236.
- [4] He D, Jin F J. An analysis of the spatio-temporal impacts of major infrastructure on real estate prices: Take Beijing Metro Line 4 as an Example[J]. *Journal of Beijing Union University*, 2013,24(7):1171-1180.
- [5] Waddell P. UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2002,68(3):297-314.
- [6] 金相郁. 20世纪区位理论的五个发展阶段及其评述[J]. *经济地理*, 2004,24(3):294-298,317. [Jin X Y. Survey and evaluation of location theory in 20 century by five development stage[J]. *Economic Geography*, 2004,24(3): 294-298,317.
- [7] Matsunaka R, Oba T, Dai N, et al. International comparison of the relationship between urban structure and the service level of urban public transportation: A comprehensive analysis in local cities in Japan, France and Germany [J]. *Transport Policy*, 2013,30(3):26-39.
- [8] Cervero R, Landis J. Twenty years of the bay area rapid transit system: Land use and development impacts[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1997,31(4):309-333.
- [9] El-Geneidy A, Levinson D, Diab E, et al. The cost of equity: Assessing transit accessibility and social disparity using total travel cost[J]. *Transportation Research Part A:*

- Policy and Practice, 2016,91(1):302-316.
- [10] Yang Y, Auchincloss A H, Rodriguez D A, et al. Modeling spatial segregation and travel cost influences on utilitarian walking: Towards policy intervention[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015,51:59-69.
- [11] Coevering P V D, Schwanen T. Re-evaluating the impact of urban form on travel patterns in Europe and North-America[J]. *Transport Policy*, 2006,13(3):229-239.
- [12] Lee Y, Washington S, Frank L D. Examination of relationships between urban form, household activities, and time allocation in the Atlanta Metropolitan Region[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2009,43(4):360-373.
- [13] Zhao P J, Zhang Y X. Travel behaviour and life course: Examining changes in car use after residential relocation in Beijing[J]. *Journal of Transport Geography*, 2018,73:41-53.
- [14] Zhao P J, Lu B, Roo G D. The impact of urban growth on commuting patterns in a restructuring city: Evidence from Beijing[J]. *Papers in Regional Science*, 2011,90(4):735-754.
- [15] Crecine J P. A dynamic model of urban structure[R]. RAND Corporation, Santa Monica, California, United States, 1968.
- [16] Wilson A G. A statistical theory of spatial distribution models[J]. *Transportation Research*, 1967,1(3):253-269.
- [17] Putman S H. Preliminary results from an integrated transportation and land use models package[J]. *Transportation*, 1974,3(3):193-224.
- [18] Goldner W, Meredith J R, Rosenthal S R, et al. Projective land use model - PLUM, volume I - plan making with a computer model, volume II - theory and application, volume III - computer systems guide[R]. Berkeley, United States, 1972.
- [19] 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.
- [20] Batty M, Hudson Smith A. Urban simulacra: London[J]. *Architectural Design*, 2010,75(6):42-47.
- [21] Dickey J W, Najafi F T. Regional land use schemes generated by TOPAZ[J]. *Regional Studies the Journal of the Regional Studies Association*, 1973,7(4):373-386.
- [22] Oppenheim N. Dynamic model of urban retail location and shopping travel[J]. *Transportation Research Record*, 1986:1-8.
- [23] Martínez F J. Access: The transport-land use economic link[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1995,29(6):457-470.
- [24] Zhong M, Hunt J D, Abraham J E. Design and development of a statewide land use transport model for Alberta [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2007,7(1):79-89.
- [25] Echenique M H, Simmonds D C, Starr C M. A MEPLAN model of Cambridgeshire - transportation planning methods, proceedings of Seminar C held at the PTRC summer annual meeting[C]. Publication of PTRC Education and Research Services Limited, England, 1987.
- [26] Johnston R A, Barra T D L. Comprehensive regional modeling for long-range planning: Linking integrated urban models and geographic information systems[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001,34(2):125-136.
- [27] Simmonds D. The objectives and design of a new land-use modelling package: DELTA. In: Clarke G, Madden M (eds.) *Regional Science in Business*[M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001:160-188.
- [28] Anas A, Arnott R J. Dynamic housing market equilibrium with taste heterogeneity, idiosyncratic perfect foresight, and stock conversions[J]. *Journal of Housing Economics*, 1991,1(1):2-32.
- [29] Miller E J, Hunt J D, Abraham J E, et al. Microsimulating urban systems[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2004,28(1-2):9-44.
- [30] Arentze T, Timmermans H, Veldhuisen J. The residential choice module in the albatross and rambblas model systems [M]. In: Pagliara F, Preston J, Simmonds D (eds.) *Residential Location Choice. Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [31] Mackett R L. Master model (micro-analytical simulation of transport, employment and residence) [R]. Transport and Road Research Laboratory, Wokingham, Berkshire, United Kingdom, 1990.
- [32] Wegener M. Employment and labour in urban markets in the IRPUD model. In: Pagliara F, Bok M D (eds.), *Employment Location in Cities and Regions: Models and Applications*[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [33] Beuck U, Nagel K, Rieser M, et al. Preliminary results of a multiagent traffic simulation for Berlin[J]. *Advances in Complex Systems*, 2007,10(supp02):289-307.
- [34] Silva E A, Clarke K C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2002,26(6):525-552.
- [35] Siddhartha, Shakyia, John, et al. Optimization by estimation of distribution with DEUM framework based on Markov random fields[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2007,4(3):262-272.
- [36] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling

- the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S Model[J]. *Environmental Management*, 2002,30(3):391-405.
- [37] Hunt J D, Kriger D S, Miller E J. Current operational urban land use-transport modelling frameworks: A review [J]. *Transport Reviews*, 2005,25(3):329-376.
- [38] 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.
- [39] Timmermans H J P. The saga of integrated land use-transport modeling: How many more dreams before we wake up?[C]. 10th International Conference on Travel Behaviour Research. Lucerne, Switzerland, 2003.
- [40] Alonso W. Location and land use: Toward a general theory of land rent[J]. *Economic Geography*, 1964,42(3):11-26.
- [41] Moekel R, Spiekermann K, Schürmann C, et al. Microsimulation of land use[J]. *International Journal of Urban Sciences*, 2003,7(1):14-31.
- [42] Mokhtarian P L, Salomon I. How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001,35(8):695-719.
- [43] Eliasson J, Mattsson L G. A model for integrated analysis of household location and travel choices[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2000,34(5):375-394.
- [44] Salvini P, Miller E J. ILUTE: An operational prototype of a comprehensive microsimulation model of urban systems [J]. *Networks and Spatial Economics*, 2005,5(2):217-234.
- [45] Aljoufie M, Zuidgeest M, Brussel M, et al. A cellular automata-based land use and transport interaction model applied to Jeddah, Saudi Arabia[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013,112(112):89-99.
- [46] Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003,93(2):314-337.
- [47] Makse H A, Havlin S, Stanley H E. Modelling urban growth patterns[J]. *Nature*, 1995,377(6550):608-612.
- [48] Wegener M. The future of mobility in cities: Challenges for urban modelling[J]. *Transport Policy*, 2013,29(3):275-282.
- [49] 吴健生,李博,黄秀兰.小城市居民出行行为时空动态及驱动机制研究[J].*地球信息科学学报*,2017,19(2):176-184. [Wu J S, Li B, Huang X L. Spatio-temporal dynamics and driving mechanisms of resident trip in small cities[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017,19(2):176-184.]
- [50] 曹劲舟,涂伟,李清泉,等.基于大规模手机定位数据的群体活动时空特征分析[J].*地球信息科学学报*,2017,19(4):467-474. [Cao J Z, Tu W, Li Q Q, et al. Spatio-temporal analysis of aggregated human activities based on massive mobile phone tracking data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017,19(4):467-474.]
- [51] Zhao P J. The impact of the built environment on individual workers' commuting behavior in Beijing[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2013,7(5):389-415.
- [52] Zhao P J. Sustainable urban expansion and transportation in a growing megacity: Consequences of urban sprawl for mobility on the urban fringe of Beijing[J]. *Habitat International*, 2010,34(2):236-243.
- [53] Salvati L, Munafò M, Morelli V G, et al. Low-density settlements and land use changes in a Mediterranean urban region[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012,105(1-2):43-52.
- [54] Frank L D, Andresen M A, Schmid T L. Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2004,27(2):87-96.
- [55] 陈彦光,刘明华.城市土地利用结构的熵值定律[J].*人文地理*,2001,16(4):25-29. [Chen Y G, Liu M H. The basic laws of the shannon entropy values of urban land-use composition[J]. *Human Geography*, 2001,16(4):25-29.]
- [56] Geurs K T, Wee B V. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions [J]. *Journal of Transport Geography*, 2004,12(2):127-140.
- [57] Boarnet M, Crane R. The influence of land use on travel behavior: specification and estimation strategies[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008,35(9):823-845.
- [58] Zhao P J, Li S X. Suburbanization, land use of TOD and lifestyle mobility in the suburbs: An examination of passengers' choice to live, shop and entertain in the metro station areas of Beijing[J]. *Journal of Transport and Land Use*, 2018,11(1):195-215.
- [59] Kim J, Pagliara F, Preston J. The intention to move and residential location choice behaviour[J]. *Urban Studies*, 2005,42(9):1621-1636.
- [60] Smersh G T, Smith M T. Accessibility changes and urban house price appreciation: A constrained optimization approach to determining distance effects[J]. *Journal of Housing Economics*, 2000,9(3):187-196.
- [61] Hoogendoorn S, Gemeren J V, Verstraten P, et al. House prices and accessibility: Evidence from a natural experiment in transport infrastructure[R]. CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis, Netherlands,2016.
- [62] Florian M, Nguyen S. A combined trip distribution modal split and trip assignment model[J]. *Transportation Research*, 1978,12(4):241-246.
- [63] Feng Y Q, Leng J Q, Xie Z Y, et al. Route choice model

- considering generalized travel cost based on game theory[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013,1815:681-703.
- [64] Chowdhury S, Ceder A, Chwalger B. The effects of travel time and cost savings on commuters' decision to travel on public transport routes involving transfers[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015,43:151-159.
- [65] Hess S, Orr S, Sheldon R. Consistency and fungibility of monetary valuations in transport: An empirical analysis of framing and mental accounting effects[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012,46(10): 1507-1516.
- [66] Leng J Q, Zhai J, Li Q W, et al. Construction of road network vulnerability evaluation index based on general travel cost[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017,493:421-429.
- [67] Ibeas ángel, Cordera R, dell'Olio Luigi, et al. Modelling the spatial interactions between workplace and residential location[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2013,49(1):110-122.
- [68] Vega A, Reynolds-Feighan A. A methodological framework for the study of residential location and travel-to-work mode choice under central and suburban employment destination patterns[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2009,43(4):401-419.
- [69] Wu W J, Zhang W Z, Dong G P. Determinant of residential location choice in a transitional housing market: Evidence based on micro survey from Beijing[J]. *Habitat International*, 2013,39(Complete):16-24.
- [70] Schirmer P, Van Eggermond M, Axhausen K. The role of location in residential location choice models: A review of literature[J]. *The Journal of Transport and Land Use*, 2014,7(2):3-21.
- [71] Li X, Shao C F, Yang L Y. Simultaneous estimation of residential, workplace location and travel mode choice based on Nested Logit model[C]. 2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2010.
- [72] Zhuge C X, Shao C F, Gao J, et al. Agent-based joint model of residential location choice and real estate price for land use and transport model[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016,57:93-105.
- [73] Li S X. The impact of metro services on housing prices: A case study from Beijing[J]. *Transportation*, 2017(5):1-27.
- [74] 尹上岗,李在军,宋伟轩,等.基于地理探测器的南京市住宅租金空间分异格局及驱动因素研究[J].*地球信息科学学报*,2018(8):1139-1149. [Yin S G, Li Z J, Song W X, et al. Spatial differentiation and influence factors of residential rent in Nanjing based on geographical detector[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(8): 1139-1149.]
- [75] Mozolin M, Thill J C, Usery E L. Trip distribution forecasting with multilayer perceptron neural networks: A critical evaluation[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2000,34(1):53-73.
- [76] Giles D E A, Hampton P. Interval estimation in the calibration of certain trip distribution models[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1981,15(3):203-219.
- [77] Golob T F. The causal influences of income and car ownership on trip generation by mode[J]. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1989,23(2):141-162.
- [78] Li S X, Zhao P J. Exploring car ownership and car use in neighborhoods near metro stations in Beijing: Does the neighborhood built environment matter?[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 56:1-17.
- [79] Clark B, Chatterjee K, Melia S. Changes in level of household car ownership: The role of life events and spatial context[J]. *Transportation*, 2016,43(4):565-599.
- [80] Curl A, Clark J, Kearns A. Household car adoption and financial distress in deprived urban communities: A case of forced car ownership?[J]. *Transport Policy*, 2018,65:61-71.
- [81] Ding C, Wang Y P, Tang T Q, et al. Joint analysis of the spatial impacts of built environment on car ownership and travel mode choice[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018,60:28-40.