

融合离散选择与主体建模的生活圈时空智能体仿真：理论模型构建与研究框架

Spatiotemporal Agent-based Simulation of Residential Areas Integrating Discrete Choice and Multi-Agent Modeling: Theoretical Model Construction and Research Framework

车冠琼 仇保兴 王倚天 兰旭

CHE Guanqiong, QIU Baoxing, WANG Yitian, LAN Xu

关键词 时空行为模拟；混合Logit模型；多主体模型；生活圈；人本规划

Keywords: spatiotemporal behavior simulation; mixed Logit model; agent-based model; residential area; human-centered planning

提 要 生活圈的服务效能取决于对居民异质性活动与设施布局互动机制的把握。当前研究趋势已从静态空间转向动态时空活动、微观个体企划、行为决策仿真，但仍面临个体偏好量化表达不足、决策维度系统性欠缺等问题，异质性个体与空间的互动及自下而上的涌现机制有待进一步明晰。因此，以时间地理学的企划—活动系统为理论原型，提出融合混合Logit模型与主体建模的集成框架，阐释“具有动态及静态双重属性的居民及空间智能体设置——反映个体偏好异质性的决策机制设计与参数估计——融合计划、执行、反馈的ABM仿真”三阶段模型构建与运行框架，从而将居民偏好异质性统计分布嵌入智能体仿真模型，在理论建模与实践验证之间构建反馈闭环。提出“生活圈服务效能多维动态评估、人与生活圈互动机制归因分析、基于活动模拟的生活圈空间多义性塑造与场景构建、生活圈发展情景预测与干预评估”四大应用场景，为解析生活圈人地互动的复杂性与异质性提供可计算模型，支撑人本化、精准化更新治理。

Abstract: The effectiveness of residential area planning depends on a deep understanding of the complex interactions between residents' heterogeneous activities and the built environment. Current research is shifting from static spatial analysis toward dynamic spatiotemporal activity modeling, micro-level individual behavior representation, and individual activity decision-making simulation. However, modeling individual activity decisions still faces challenges in quantifying personal preferences and systematically evaluating decision influencing factors. In addition, the heterogeneous interactions and bottom-up mechanisms between individuals and space remain insufficiently explored. Drawing on the planning-activity system framework of time geography as a theoretical foundation, this study proposes a hybrid simulation framework integrating the mixed Logit model (MLM) with agent-based modeling (ABM). It outlines a three-stage model construction framework: 1) agent configuration with dual static-dynamic attributes; 2) decision mechanisms reflecting individual preference heterogeneity and parameter estimation; 3) ABM simulation integrating planning, execution, and feedback. Four application scenarios are proposed: multidimensional dynamic evaluation of activity space effectiveness, analysis of interaction mechanism and attribution between individuals and their activity spaces, shaping and scene construction of spatial polysemy based on activity simulation, and scenario simulation and intervention evaluation for activity space development. This framework provides a computable approach for understanding the complexity and heterogeneity of human-land interactions within activity spaces, while also offering scientific decision-making tools for human-centered and precision-oriented urban renewal and governance.

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202602003
文章编号 1000-3363(2026)02-0018-08

作者简介

车冠琼，天津城建大学建筑学院讲师，cgq2022@tcu.edu.cn

仇保兴，国际欧亚科学院院士，住房和城乡建设部原副部长，教授

王倚天，天津大学建筑设计规划研究总院有限公司高级工程师

兰旭，天津城建大学建筑学院副教授，通信作者，lanxu@tcu.edu.cn

随着新型城镇化战略的深入推进，城市空间结构与社会生活形态发生深刻重构，社会空间的多元性、动态性、复杂性增强^[1-3]。传统以静态物质空间为核心的规划研究范式难以有效解析居民的多元需求、动态行为及其与空间环境的复杂互动。而多尺度时空约束下的人地互动过程与决策机制研究则是理解城市社会空间复杂性与时空嵌套性的关键，也是响应国家新型城镇化“以人为本”核心战略的必然要求^[4-5]。在此背景下，生活圈作为承载和衔接居民多元活动，并持续进行物质、信息与情感交换的活性场域，不仅是人地互动的微观载体，更是连接个体、社会、空间的关键中介，成为解析人地互动机理、落实人民城市理念的关键切入点^[6-7]。其中的人地互动体现出高度的过程性——体现为活动路径的连续演化与时空决策的序列依赖，以及深刻的复杂性——源于个体异质性、社会网络、空间环境与制度文化等多维因素的共同作用^[8-9]。然而既有研究多基于“被固化”在行政区划或普查单元的静态数据，或“被均质化”于群体中的截面数据，虽然提供了多个时间切片上的状态快照，但是难以有效捕捉差异性个体在时空约束下的活动过程及其与建成环境的动态互动机制^[4]。这一理论方法的局限直接导致了规划实践中生活圈配置与居民真实活动需求之间的脱节，难以支撑“以人为本”的高质量空间治理。

因此，本研究聚焦于生活圈研究中的核心问题：理论上如何突破静态快照式分析的局限，精准解析个体活动序列与空间决策的动态关联及涌现规律；实践中如何构建能够模拟真实人地互动的工具，为生活圈设施配置与空间优化提供精细化、动态化的决策支持。对此，本文融合时间地理学中强调活动主观意愿与客观条件双重制约、活动序列与空间选择动态关联的“企划”概念与人工智能技术驱动的智能体建模方法，提出构建“时间—空间—活动”三位一体的生活圈时空智能体仿真模型^[10-12]。模型以具有异质性特征的居民智能体为核心，以离散选择模型刻画其“空间评估—选择—移动”的决策过程，通过情境推演揭示居民个体在多重约束下与生活空间的互动机制，从而为生活圈研究提供自

下而上、动态响应个体行为的分析范式。

1 生活圈理论与方法研究进展

1.1 从静态空间转向动态时空活动

在城乡规划、时间地理、行为地理等理论深度交叉融合，以时空大数据等新技术赋能的共同驱动下，生活圈研究历经了从物质空间向人群活动、从节点场所向流动网络的转变。早期的生活圈研究主要立足于空间本体论，延续城市地理学中的同心圆学说、邻里单位等传统空间规划理论，将生活圈视为一个静态的、具有明确边界的、圈层状的空间容器^[13]。在此视角下，研究核心聚焦于其内部的空间组织模式，旨在揭示居住、商业、绿地等各类功能用地的宏观结构特征与组合关系^[14]。同时，运用空间计量及地理信息系统方法评估公共服务设施的服务效能及公平性，为标准化的空间资源配置提供依据^[15-16]。

随后，面对流动性、嵌套性增强的人类活动，生活圈营造迫切需要构建一套从活动系统出发研究人地互动关系的理论与方法。时间地理学的引入构成了关键的范式转向动力，借助于时空路径和棱柱概念模型，描绘个体切实发生的活动轨迹及潜在的活动机会集合，推动研究视角从对活动空间的静态式和节点式关注向活动性与流动网络方向转变^[17-19]。同时，得益于时空大数据技术的进步与应用，个体行为轨迹和城市活动数据得到了极大充实，推动生活圈研究向“活动模式归纳、生活圈圈层及功能识别、活动与空间作用机理”方向深入发展^[20]。研究内容涵盖基于时空轨迹的生活圈层级、结构与类型划分^[21-22]，面向需求—行为—供给的服务设施时空匹配测度^[23-24]，基于时空行为的生活圈空间利用效能及活力评估^[25]、生活圈时空行为的建成环境影响机制解析^[26-29]、生活圈时空行为的社会分异^[30-31]，为生活圈功能结构的精准识别、人与空间的交互关系及机理解析、以人为本的生活品质改善提供了有力的理论支持。

1.2 从宏观时空活动转向微观个体企划

时间地理学、行为地理学等理论为生活圈研究注入了人本的、活动的视角，

但主要集中于集聚层面的人群活动时空模式提炼与归纳，而对个体差异、空间感知以及社会经济条件限制考虑不足，难以深入探知受到个体与环境双重制约的活动机制及序列关联，导致研究结果停留在后置观测而难以实现前置预判^[2,8]。面对上述局限，相关研究提出了企划概念，强调活动不仅与个体意图、规划紧密相连，同时受到能力、组合、权威等三重制约^[32-33]。企划概念突破了基于活动特征的分类思路，转向基于个体内在意图及外在情境共同制约下的活动组织来划分活动类型，深化了活动情境中主观能动性、客观制约的共同作用过程，为时空间行为的过程机制以及活动系统的复杂性解析提供了全新的分析框架^[1,9]。

基于上述框架，国内外学者围绕日常生活企划—活动系统展开三方面研究：一是聚焦社会福利与公平，揭示不同社会群体的生活企划差异、时空困境与社会效应。重点分析通勤者、女性、老年人、低收入群体等在日常生活安排中面临的任职距离、家庭责任、身体机能、经济能力制约及应对策略^[34-41]。二是关注技术变革对企划形态与弹性的重构。研究指出，智慧出行、配送等可降低移动的能力制约，使复杂、多目的的活动序列成为可能^[23,42-44]。三是基于多模态大数据的企划调查及可视化。定位及轨迹数据、社交媒体数据的充实和计算社会科学的发展，能够高分辨率地呈现不同社会群体的时空活动路径，进而有效识别特定企划轨迹背后的制约因素，推动了企划测度从宏观到微观的精准刻画与动态分析^[12,45]。

1.3 从企划概念模型转向行为决策仿真模拟

企划概念的提出与应用，推动了日常生活研究从宏观的集体层面转向微观的个体层面。已有研究^[46]提出了基于活动锚点的个体活动空间建构算法。另有研究^[47-49]采用基于随机效用理论的离散选择模型，结合多主体仿真模型，分析主体意愿、建成环境、时间分配等因素共同制约下的目的地及路径选择活动。上述研究成果证实了主体建模技术在微观行为模拟方面的可行性，但目前仍停留在类型化人群模拟层面，对个体偏好

及差异性的量化表达有待进一步深入。

因此，本研究以时间地理学的企划—活动系统为理论原型，将决策过程理解为具有异质性偏好的个体，在由建成环境定义的机会与制约场中进行效用评估并做出选择。操作层面，结合混合Logit模型与主体建模技术构建时空智能体日常活动仿真模型。模型以时空智能体代理个人，在由建成环境构成的外部条件与内在偏好的共同制约下，遵循效用最大化原则进行活动决策，其中反映个体异质性的偏好参数通过混合Logit模型进行分布估计，由此建立起“制约—偏好”共同作用下的效用评估与决策机制。运用模型可定量评估个体偏好等不可观测因素对日常活动时空结果的贡献度及有效阈值，并可通过参数调整预测宏观现象变化，从而深化对于“个体—决策—活动—时间—空间”互动机制的理解，为生活圈更新与治理提供能够反映个体异质性的决策依据。

2 生活圈时空智能体仿真模型构建

采用主体模型通用的“模型概览—设计方案—模型细节”（overview—design concept—details, ODD）结构化框架，描述模型架构和智能体决策流程^[50]。其中，模型概览包括模拟目的、模型主体与变量选择，设计方案论述时空智能体决策规则，模型细节包括模型运行与验证。

2.1 模型构建目的

针对既有研究难以有效捕捉个体异质性偏好及其与空间环境动态互动机制的欠缺，融合离散选择模型与多主体建模，提出建构“个体偏好驱动、时空环境反馈”的智能体仿真平台，重点解析三个核心问题：模式识别——个体异质性的活动—出行选择与多层次空间环境的动态交互中，涌现出怎样的时空活动模式？机制探究——个体异质性偏好与空间—社会复杂系统的交互反馈机制如何？关键影响因素及其有效阈值如何？政策评估——不同设计方案对生活圈整体及个体的差异化效果如何？

2.2 模型主体与变量——时空智能体

设置

2.2.1 居民智能体设置

居民智能体具有主动和自适应决策能力，能够基于自身目标、偏好、当前状态及对环境的感知，在效用评估的基础上主动作出目的地、路径、时序安排等一系列选择。居民智能体的属性是活动决策的基础影响要素，包括静态属性和动态属性，其参数来源融合了宏观统计数据、微观调查数据及模型标定结果^[51-52]。静态属性用以定义社会人口特征和长期稳定的偏好，是生成其初始活动模式及决策参数的基础；动态属性用以记录智能体在仿真过程中的实时状态，是其决策的依据和结果见表1。

2.2.2 生活圈空间环境智能体设置

生活圈空间环境是居民智能体的决策对象、活动承载及约束框架，以点、线、面组成的二维平面表示，其中，点表示吸引居民智能体的服务设施、线表示可移动的路径、面表示建筑实体（图1）。

空间环境智能体具有静态和动态双重属性，静态属性用以反映空间环境的三维特质及拓扑结构，形成涵盖街道网络结构、功能设施、环境品质的空间环境指标体系，以属性信息的方式存储于二维空间，作为居民智能体空间认知和评价的影响要素（表2）。动态属性反映其当前占有率、拥堵等时变特征，通过效用函数中的变量实时反馈，影响后续居民智能体活动决策。

2.3 模型设计——时空智能体决策机制设置及参数估计

智能体决策机制是链接微观个体行为与宏观系统现象的计算桥梁。与以往研究相比，该模型的核心突破在于引入混合Logit模型，以参数异质性分布标注居民智能体个体差异，实现拥有“个性参数”的居民智能体在虚拟环境中实施决策与相互作用，从而更加深入地揭示不可直接观测的个体偏好对生活圈时空

表1 居民智能体属性及数据来源

Tab.1 Attributes and data sources of resident agents

属性类型	变量	变量要点	数据来源	
静态属性	社会人口属性	年龄	反映不同年龄组活动需求与移动能力差异	人口普查、社区网格数据,地产数据等
		职业	反映时间约束	
		家庭结构	影响活动时序与时空约束	
		收入	反映成本敏感度及消费能力	
		居住区位	影响空间可达性	
		交通工具拥有情况	影响出行时序及方式选择,潜在活动范围	
静态属性	内在偏好参数	时间敏感系数	对时间成本的敏感性	活动日志,混合Logit模型参数估计
		成本敏感系数	对货币成本的敏感性	
		设施品质偏好系数	对设施环境、品牌、服务质量等的重视程度	
		拥挤厌恶系数	对拥挤的厌恶程度	
		惯性系数	对熟悉空间及设施的偏好,即便不是最优解	
动态属性	时空状态	当天活动日程	行程列表,包括计划和实际执行的活动序列	活动日志,基于位置服务的数据
		当前位置	当前所进行活动的经纬度位置	
		当前活动	当前所处的活动类型及开始时间	
		移动状态	当前移动路径及剩余移动时间	
	生理与心理状态	疲劳度	影响活动耐力与休息需求	
		紧迫感	距离下一个固定活动的时间压力	
		满意度/效用累计	当日已完成活动所获效用总和	
		记忆与学习	影响下一次选择	
	资源与约束	当日成本预算	当日预算额度	
		当日时间预算	当日剩余的可自由支配时间	
待办任务列表		需要完成的固定及弹性任务		

模式及空间效能的影响。具体包括活动选择集定义、活动方案效用函数构建及参数估计两个步骤。

2.3.1 活动选择集定义

根据活动日志及生活圈空间环境数据，生成能力、耦合、权威等三重制约下的居民智能体可行活动模式集 C_n ，具体由“家—工作—家、家—送孩子上学—工作—购物—家”等活动模式 j_n 构成，每个模式具有出行时间、货币成本、活动类型等属性，用于后续活动选择的效用评估。

2.3.2 活动方案效用函数构建及参数估计

在生成个性化的可行活动模式集 C_n 后，需要令居民智能体依据其异质性偏好，对可行的“日计划”方案进行效用评估并做出选择，实现决策者属性与活动选择方案之间的链接。由此引入基于随机效用理论的离散选择模型，即采用混合 Logit 模型构建并估计每个活动模式 j 的效用函数及其参数，从而驱动居民智能体的概率化选择行为。对于居民智能体 n 而言，选择活动模式 j 的随机效用 U_{nj} 由可观测的确定项 V_{nj} 和不可观测的随机项 ε_{nj} 构成：

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad (式1)$$

式中，可观测效用 V_{nj} 被定义为活动模式 j 的各项属性 X_{nj} 的线性组合：

$$V_{nj} = \beta_n X_{nj} = \beta_{n1} \cdot T_{nj} + \beta_{n2} \cdot C_{nj} + \sum_{m \in M} \gamma_{nm} \cdot D_{jm} \quad (式2)$$

式中， $\beta_n = (\beta_{n1}, \beta_{n2}, \gamma_{n1}, \gamma_{n2}, \dots)$ 为居民智能体 n 的随机偏好系数向量，在个体间随机变化，用以捕捉偏好异质性； T_{nj} 为活动模式 j 的总出行时间； C_{nj} 为活动模式 j 的总货币成本； M 为所有活动类型构成的集合，包括工作、购物、休闲等； m 为集合 M 中某一个具体的活动类型； D_{jm} 为一个二元哑变量，如果活动模式 j 中包含类型 m 的活动，则 $D_{jm} = 1$ ，否则 $D_{jm} = 0$ ； γ_{nm} 是居民智能体 n 对从事活动类型 m 的偏好系数， $\gamma_{nm} > 0$ 表示偏好该类活动， $\gamma_{nm} < 0$ 表示厌恶该类活动。

上述模型的核心设定在于系数 β_n 并非固定常数，而是在个体间随机变化的向量，用以捕捉无法被观测变量解释的偏好异质性。可采用最大模拟似然估计法，利用居民活动日志调查数据估计其参数分布，得到研究区域内人群偏好异

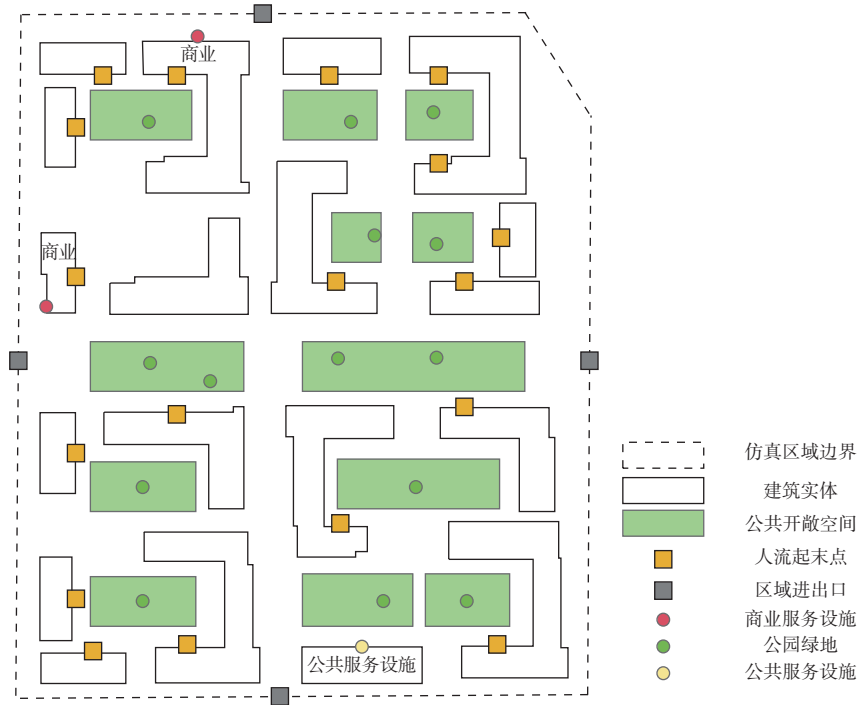


图1 虚拟空间环境
Fig.1 Virtual space environment

表2 空间环境指标体系

Tab.2 Space-environment index

一级指标	二级指标	指标内涵	数据来源
街道网络	长度	道路长度	相关规划, Open Street Map 等大数据
	宽度	道路宽度	
	路网密度	不同生活圈范围内的路网密度	
	邻近度(整合度)	反映街道可达性及吸引到达型人流的潜力	
	中介度(选择度)	反映街道被经过的概率及吸引经过型人流的潜力	
功能设施	规模	某类功能设施的规模	POI 等大数据, 实地测绘
	分布	某类功能设施的空间分布	
	密度	某类功能设施在特定生活圈范围内的密度	
	容积率	某类功能设施在特定生活圈范围内的容积率	
	混合度	特定生活圈范围内的功能设施混合度	
	营业时间	反映设施营业时间	
环境品质	绿化覆盖率	生活圈公园及街道绿化覆盖情况	遥感影像, 实地测绘
	天空可视率	特定节点的天空可见程度	
	街道宽高比	街道宽度与沿街建筑高度的比值	
	贴线率	临街建筑物的长度与红线长度的比值	

质性的定量统计分布。在后续 ABM 仿真初始化时，每个居民智能体 n 的偏好系数 β_n 将从该估计得到的分布中独立随机抽取一次并固定，使得每个智能体都具有独特、稳定且符合实证规律的决策逻辑，

将模型从基于简单规则的推演进阶为基于实证行为规律的模拟，增强模拟结果的解释力与预测效度。

2.4 模型运行与验证

2.4.1 模型初始化

模型初始化旨在生成一个符合现实生活圈空间环境及人群特征的虚拟场域。该过程可在 Netlogo、AnyLogic 等模拟平台实现，主要包括三个顺序执行的模块：一是空间环境数字化构建，基于高精度地理信息系统数据，在仿真平台中导入或矢量化建构研究区域的路网拓扑、建筑基底轮廓及公共服务设施点等数字化地理信息，并参照空间环境智能体设置部分的指标体系配置静态及动态属性。二是居民智能体设定，采用迭代比例拟合等算法，依据人口普查数据的多维度联合，生成与生活圈真实人口统计特征一致的虚拟居民智能体列表，并为每个智能体从前期通过混合 Logit 模型估计得到的偏好分布中，抽取其特有的随机系数向量 β_n ，表征居民智能体的内在偏好。三是居民智能体空间匹配与初始状态设定，将生成的居民智能体列表按其所属统计单元分配至相应的居住建筑中，完

成其空间锚点初始化。在此基础上，根据居民智能体的社会角色生成相应活动选择集，模拟开始时其以概率形式选择其一并执行，获得初始日程与时空状态。

2.4.2 计划—执行—反馈动态运行流程

模型初始化后，进入包含低频日规划决策和高频活动—设施—路径决策的“两级决策”与“空间反馈”的迭代循环。通过以下四个步骤实现：一是空间状态设置与感知，在每一仿真步长 t 开始时，设定（或依据上一轮居民智能体的行动结果更新）环境状态，构成本轮居民智能体空间感知的输入。二是居民智能体决策与行动，首先设定日规划与活动执行触发条件，进而采用单日规划、活动—设施—路径选择双层决策模型。在日规划层，每个智能体从其个性化的可行活动模式选择集 C_n 中，基于其特定偏好系数 β_n 计算各模式 j 的随机效用 U_{nj} ，并依据混合 Logit 模型生成的选择概率，从中抽取一项作为当日的总体活动计划 j^* ；在活动—设施—路径选择层，根据选

择的活动模式 j^* ，从当前时空可达的设施合集中，基于效用函数选择具体的设施 f ，完成目的地选择。在此基础上基于路径的预期出行时间计算路径效用，并以 Logit 概率选择其中一条^[52]。三是数据记录，记录每个居民智能体完整的时空轨迹、活动日志、累计效用与决策序列等微观数据，以及各空间设施的人流密度、活动类型等宏观使用状态，为后续模型验证与规划效果评估提供数据基础。四是数据更新与模型迭代，完成上述步骤后，居民智能体内部状态与空间状态更新，开启新一轮感知—决策—行动—记录过程。通过上述迭代，居民智能体的决策行为持续重塑空间状态（如制造或缓解拥挤），而更新后的空间状态又作为输入参数实时影响居民智能体的后续决策，从而动态地涌现出多重层级的时空活动模式。见图2。

2.4.3 模型有效性验证

为评估模型的有效性与其可信度，确保其能够作为解释居民活动决策机理、

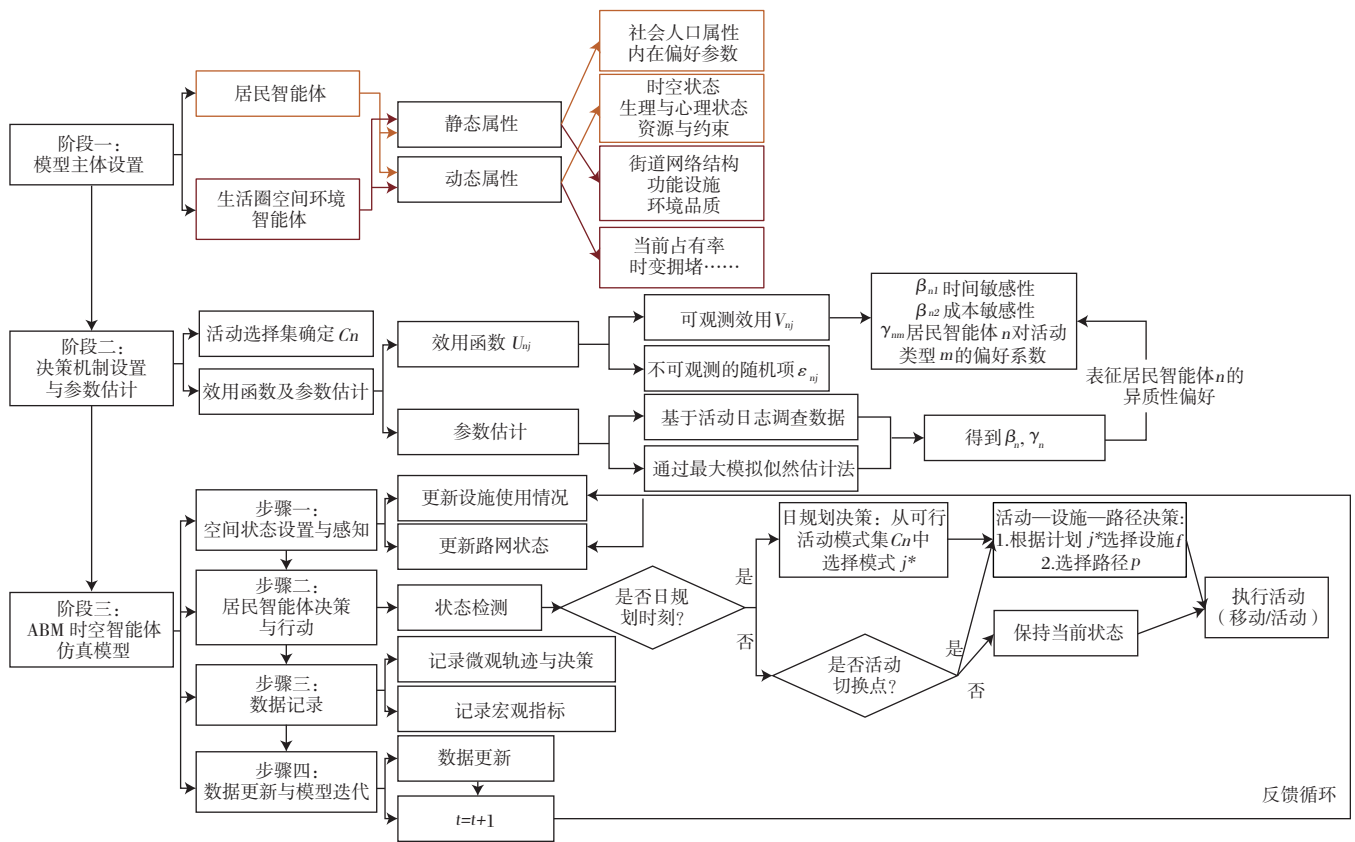


图2 时空智能体模型参数估计与模拟流程

Fig.2 Parameter estimation and simulation workflow for spatiotemporal agent-based model

预测空间干预效果的可靠计算实验平台，建立一个包含宏观模式匹配与微观逻辑检验的双层验证框架。一是宏观行为模式匹配检验，运行模型至稳定状态或取多日模拟结果的平均值，采用空间相关性分析和时间拟合度等方法，比较模拟与现实人流密度时空分布热力图、各类空间设施日/周访问量变化曲线，此外，使用K-S检验或计算分位数的方法，比较模拟生成与调查获得的居民日活动链数量、单次出行距离、活动时长等分布形态的一致性，多维验证模型是否能准确再现研究区域稳定的宏观时空活动统计规律。二是敏感性分析与内部有效性验证，采用单因素敏感性分析法，独立改变设施容量、偏好分布标准差等输入参数，观察设施到访人流量等核心输出指标的变化方向与幅度是否合理，验证模拟结果是否符合理论预期，同时，模拟节假日活动需求激增、设施关闭等极端情境，观测模型是否能涌现出相应的拥堵行为或部分区域出现服务真空等可预见的行为结果，检验模型逻辑的鲁棒性。

3 生活圈时空智能体模型应用

3.1 从静态测度到动态感知：生活圈服务效能的多维动态评估

传统基于设施点位与缓冲区叠加的静态可达性分析，未能充分考虑个体在时空能力与群体交互双重制约下的实际活动范围与行为边界，难以真实刻画空间及设施对于异质性个体的动态服务绩效。时空智能体模型通过嵌入混合Logit模型及偏好异质性参数，将空间环境表征为因人而异的“机会与制约”系统。在此基础上，通过模拟异质化居民在多重制约下的活动—出行决策及其与空间的持续反馈，得以从节点、网络、场所等三个维度切入，对生活圈进行设施效能、社会服务、系统韧性等综合性、人本化的动态评估。

节点维度。模型通过模拟居民在真实制约下的设施选择行为，能够在精细诊断单个设施理论服务人口与实际服务人口差异的基础上，评估设施的供需匹配与使用效率，使得评估指标从“有无覆盖”或“几何覆盖范围”升级为“有

效覆盖比率”与“服务质量时空波动图”。同时，识别因时间冲突、价格门槛等导致的服务盲区，为服务设施的空间布局、类型定位、经营管理等提供更加精准的决策支持。

网络维度。模型将生活圈视为由设施节点与居民流动构成的复杂系统，通过模拟关键设施失效或新增节点等情景，可以评估服务网络的整体韧性与结构效能、识别关键枢纽与脆弱环节、分析设施间的功能冗余与替代关系，为服务设施系统效率与公平提升提供模拟支撑。

场所维度。模型聚焦空间作为社会互动载体的属性，通过追踪人群时空活动轨迹，可定量评估公共空间使用的包容性及时空分异，诊断群体间潜在的聚集场所或使用冲突。同时，通过模拟新业态引入或空间规则调整，能够预演不同设计干预下场所活力的变化，推动空间评估范式从功能容器的测度转向场所培育潜力的研判。

3.2 从宏观关联到微观机理：人与生活圈互动机制与归因解析

传统研究多止于人与空间的宏观统计关联，难以揭示现象产生的微观动因。时空智能体模型则在居民异质性偏好、活动—出行决策与空间环境之间建立起了互动桥梁，可对以下两方面关键机制进行建模与解析。

微观层面，模型刻画了“个体时空行为与多维环境的耦合与自适应机制”。通过嵌入混合Logit决策规则与动态空间反馈，可以精确模拟“空间感知—效用评估—活动移动—属性更新”这一互动循环。基于此，可以回溯任一宏观现象的微观根源，例如，面对某设施利用率低下的结果，可追踪所有居民智能体的决策链，进而归因于开放时间不匹配（耦合制约）、费用过高（权威制约）或品质不佳（偏好制约）。这种机制解析能力，使得评估从“设施有没有人用”深入到“为什么没人用”以及“谁会用它”，从而为制定精准的、因人施策的公共服务政策提供了直接依据。

宏观层面，模型揭示了“从微观个体互动到宏观秩序涌现的机制”。若干异质性个体的自适应行为，在共享空间中叠加、互动与迭代，最终会涌现出无法

通过简单加和预测的宏观社会—空间模式，即“地方秩序”^[8]。时空智能体模型不仅能够呈现活动模式与地方秩序，更能通过调整输入条件，识别导致特定秩序的要素组合、临界条件与作用路径，从而通过设置初始规则与空间参数，引导系统自组织地向更具韧性、活力与包容性的地方秩序演进，推动规划从制定确定性的“蓝图式管控”，向培育积极可能性的“适应性干预”转变。

3.3 从功能配置到场所营造：基于活动模拟的多义空间塑造与场景构建

传统规划聚焦空间的物质功能配置，难以洞见其承载的社会活动与场所精神的形成。利用时空智能体模型，通过模拟异质性居民在真实制约下的活动选择与互动机制，使规划师对空间的评估不再局限于“缺什么”，而是“现有空间为何无法支持丰富的企划”，从而能够前瞻性地探索如何通过精细化的空间干预，激发个体主动的、多元的日常活动以及不同个体在同一时空的交互，实现空间营造从基于形态美学的设计，升维为基于行为动力学的“社会过程设计”。具体而言，模型支持两种相辅相成的、以活动模拟为驱动的空间营造策略。

一是精准植入“空间触媒”，激活节点的多义潜能。空间的“多义性”取决于其与使用者企划的匹配程度^[50]。模型通过解析居民决策的影响因素与活动轨迹，能够从设施、业态、可达性等方面诊断现有空间供给与多元活动需求的缺口，并利用模型模拟不同选址、类型的触媒元素置入后人群活动类型、强度与社交模式的动态响应，推动设计方案从经验判断转变为基于行为涌现的精准预测，确保每一次微更新都能有效“激活”空间，使其具备作为社交客厅或活力市集的弹性潜力。

二是系统编织“时空相遇网络”，激发系统的活力涌现。单一空间可容纳的多义性有限，而通过连接多个功能互补或相似的节点，能够以网络效应催化出超越个体叠加的更丰富场景的可能性。模型能够精确模拟这种“连接创造多义性”的过程，例如，通过规划一条串联社区花园、便利店、养老服务点与公交站点的慢行友好路径，不仅可以预测通

勤流与休闲流的叠加，而且可以模拟由此诱发的途中购物、散步社交等新的活动链。这种“时空相遇机遇”的系统性编织，将生活圈从功能地块的集合重构为支持相遇、自发活动与持续探索的流动舞台。

3.4 从现状描述到未来推演：生活圈发展情景模拟预测与干预评估

时空智能体模型为规划及政策评估提供了高度可控的模拟实验平台，实现了从实施后评估向前瞻性预判的转变。其核心应用体现在以下两个方面：一是资源配置的优化推演，通过模拟不同目标导向及约束下的规划方案，不仅能够在宏观层面预测各方案的人流时空分布格局、设施使用负荷、交通网络压力及社会效益的整体变化，而且能够深入微观机理，追踪居民个体出行链的演变、居民平均出行时间的变化、不同社会群体的可达性差异等响应空间变化的个体选择。这种“宏观现象—微观归因”的双重视角，推动了规划评估从静态的“方案优劣比较”升级为动态的“行为响应洞察”，为识别最优资源配置策略、平衡效率与公平提供了基于复杂系统仿真的决策依据。

二是政策干预的精细评估，尤其是对非空间的“软性”政策进行量化测试。通过调整模型中的时间规则（如设施开放时长）、价格杠杆（如分时段优惠）或权限设置（如群体专属服务），可模拟预测管理策略对居民行为及系统绩效的传导效应。例如，可精确测算延长社区服务设施夜间开放时间对提升在职群体使用率的具体效果，或评估价格补贴对低收入家庭活动机会的改善程度。这种将抽象政策转化为可调参数并进行政策实验的能力，使决策者能在政策实施前预见其复杂后果，优化干预力度与作用靶点，有助于提升公共政策的针对性、有效性及包容性。

4 研究展望

本研究构建的“个体—活动—时间—空间”四位一体的生活圈时空智能体模型，创新性地融合了混合Logit模型的个体异质性解析能力与多主体模型的

互动涌现模拟能力，提出三种关键交互分析视角：一是个体与空间的主客观交互，通过混合Logit模型的参数异质性分布标注居民智能体的差异偏好，在此基础上运用主体建模方法，模拟解析差异性个体与空间交互的时空规律、空间分异与作用机制；二是微观个体决策与宏观群体模式的跨尺度交互，运用时空智能体仿真模拟，不仅可以洞察局部的、微观的个体决策如何非线性地地相互作用并涌现出有序的、宏观的时空模式，而且可以通过控制变量实验，识别出驱动模式形成的关键因素及有效阈值；三是人与空间的长短期交互，短尺度上可分析一天当中不同时段人群活动及其对空间的利用情况，长时尺度上通过历史数据采集及情境模拟，可分析人口结构改变、信息技术驱动、政策变化等导向下的人群活动及空间结构变化。通过上述三种交互分析，实现了对生活圈个体差异性的精准刻画、个体与空间交互机制的解析、生活圈规划与服务效能的前瞻性预测，为生活圈空间高效利用、服务效能提升、社区活力营造提供了人本化的决策支持工具。

上述研究主要完成了框架构建、机理推演、方法集成工作。然而，要真正赋能于可实施的人本化生活圈规划实践，仍需在以下两个方面进行深化探究：一是个体时空活动数据的深度获取与异质性表达。当前，大规模微观个体时空活动数据获取面临广度、精度、深度的“三元困境”。未来的突破路径在于多粒度、多模态时空数据的整合，将高精度、高语义深度的GPS轨迹及活动日志数据，与高广度的手机信令数据融合建模。在此基础上，利用机器学习与数据反演技术，重构大规模个体的完整属性与活动语义，提取表征个体稳定行为的数字标签，并将其作为潜变量嵌入混合Logit选择模型，实现数据—行为—偏好端到端建模，使得个体异质性空间选择可度量、可解释。二是人与空间双向互动与长期演化的动态模拟。现有模型对“人影响空间、空间再塑造人”的动态反馈回路及长期演化机制刻画有限。为此，在微观层面，引入递归神经网络（RNN）等时序建模方法，刻画个体活动如何累积并反馈影响其对空间的认知与评价，进

而影响后续选择；在宏观层面，结合系统动力学模型，模拟人口结构变迁、建成环境更新及规划政策干预等因素的长期、非线性效应，从而评估规划的可持续影响。通过以上补充完善，可构建一个不仅能够解释个体与空间复杂交互机理，更能够推演与评估规划方案长期效益的时空智能体模型，为迈向可计算、可模拟的人本城市规划提供方法论内核。

参考文献

- [1] 柴彦威,塔娜. 中国地理学的行为革命及其理论内涵[J]. 地理研究, 2024, 43(9): 2259-2270.
- [2] 王德,任熙元,胡杨. 面向时间城市规划的行为决策建模及上海陆家嘴地区案例探索[J]. 国际城市规划, 2024, 39(3): 40-50.
- [3] SILVA B N, KHAN M, HAN K. Towards sustainable smart cities: a review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 38: 697-713.
- [4] 周素红,柴彦威,关美宝,等. 中国行为地理学的理论与方法研究前沿[J]. 地理研究, 2024, 43(9): 2235-2258.
- [5] ELLEGÅRD K. Thinking time geography: concepts, methods and applications [M]. London, UK: Routledge, 2018.
- [6] 吴志强,王凯,陈韦,等. “社区空间精细化治理的创新思考”学术笔谈[J]. 城市规划学刊, 2020(3): 1-14.
- [7] 孙逸渊,冯健. 信息技术影响下日常生活与空间互动研究框架[J]. 地理学报, 2025, 80(8): 2055-2071.
- [8] 张艳,柴彦威. 转向企划—活动系统研究的时间地理学[J]. 地理科学进展, 2022, 41(1): 53-63.
- [9] CHEN B Y, LUO Y B, et al. A spatiotemporal data model and an index structure for computational time geography[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2023, 37(3): 550-583.
- [10] 李春江,柴彦威,李彦熙,等. 企划—活动分类系统的探索性研究[J]. 地理研究, 2024, 43(9): 2295-2307.
- [11] SADOWSKI J. Cyberspace and cityscapes: on the emergence of platform urbanism[J]. Urban Geography, 2020, 41(3): 448-452.
- [12] SHAW S L. Time geography in a hybrid physical-virtual world[J]. Journal of Geographical Systems, 2023, 25(3): 339-356.

- [13] 刘泉, 钱征寒, 黄丁芳, 等. 15分钟生活圈的空间模式演化特征与趋势[J]. 城市规划学刊, 2020(6): 94-101.
- [14] 黄慧明, 周岱霖, 王烨. 基于居住形态类型的社区生活圈空间组织模式研究: 以广州为例[J]. 城市规划学刊, 2021(2): 94-101.
- [15] 沈育辉, 童滋雨. 人本尺度下社区生活圈便利性评估方法研究[J]. 南方建筑, 2022(7): 72-80.
- [16] 蔡兴飞, 王浩, 李莉, 等. 社区生活圈评估应用实践、挑战及展望[J]. 规划师, 2023, 39(5): 47-52.
- [17] KIM H M, KWAN M P. Space-time accessibility measures: a geo-computational algorithm with a focus on the feasible opportunity set and possible activity duration [J]. *Journal of Geographical Systems*, 2003, 5(1): 71-91.
- [18] YIN L, SHAW S L. Exploring space-time paths in physical and social closeness spaces: a space-time GIS approach[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(5): 742-761.
- [19] 廖静莹, 林姚宇, 肖作鹏, 等. 基于时空棱柱的实时可达空间的概念模型与测度[J]. 地理学报, 2024, 79(4): 931-948.
- [20] 钮心毅, 林诗佳. 城市规划研究中的时空大数据: 技术演进、研究议题与前沿趋势[J]. 城市规划学刊, 2022(6): 50-57.
- [21] 柴彦威, 李春江, 夏方渠, 等. 城市社区生活圈划定模型: 以北京市清河街道为例[J]. 城市发展研究, 2019, 26(9): 1-8.
- [22] 梁弘, 鞠秋变, 柴彦威, 等. 时空行为视角下多层次城市生活圈空间结构测度与类型划分研究: 以北京市为例[J]. 上海城市规划, 2025(3): 49-58.
- [23] 张姗姗, 甄峰, 孔宇, 等. 基于虚实空间交互的社区生活圈服务设施评估与优化配置: 研究进展与展望[J]. 自然资源学报, 2023, 38(10): 2435-2446.
- [24] 王德, 胡杨. 城市时空行为规划: 概念、框架与展望[J]. 城市规划学刊, 2022(1): 44-50.
- [25] 邹思聪, 张姗姗, 甄峰. 基于居民时空行为的社区日常活动空间测度及活力影响因素研究: 以南京市沙洲、南苑街道为例[J]. 地理科学进展, 2021, 40(4): 580-596.
- [26] 张文佳, 鲁大铭. 影响时空行为的建成环境测度与实证研究综述[J]. 城市发展研究, 2019, 26(12): 9-16.
- [27] TAO T, WANG J, CAO X. Exploring the non-linear associations between spatial attributes and walking distance to transit[J]. *Journal of Transport Geography*, 2020, 82: 102560.
- [28] 陶印华, 柴彦威, 杨婕. 城市居民健康生活方式研究的时空行为视角[J]. 人文地理, 2021, 36(1): 22-29.
- [29] 罗雪瑶, 张文佳, 柴彦威. 15分钟生活圈的建成环境阈值效应研究[J]. 地理研究, 2022, 41(8): 2155-2170.
- [30] 张雪, 柴彦威. 基于时空行为的混合住房社区社会分异的研究框架[J]. 人文地理, 2022, 37(6): 39-46.
- [31] 赵美凤, 张蓝青, 汪德根. 生活圈视角下城市公共服务设施配置分异及影响因素: 基于京津冀地区不同规模城市比较[J]. 城市发展研究, 2024, 31(10): 77-86.
- [32] 张艳, 柴彦威. “新”时间地理学: 瑞典Kajsa团队的创新研究[J]. 人文地理, 2016, 31(5): 19-24.
- [33] LATHAM A. Diagramming the social: exploring the legacy of Torsten Hägerstrand's diagrammatic landscapes [J]. *Landscape Research*, 2020, 45(6): 699-711.
- [34] 塔娜, 柴彦威, 关美宝. 北京郊区居民日常生活方式的行为测度与空间: 行为互动[J]. 地理学报, 2015, 70(8): 1271-1280.
- [35] ZHANG S Q, YANG Y, ZHEN F, et al. Understanding the travel behaviors and activity patterns of the vulnerable population using smart card data: an activity space-based approach[J]. *Journal of Transport Geography*, 2021, 90: 102938.
- [36] 焦健, 王德, 程英. 上海市时间贫困人群的日常活动模式与特征[J]. 城市规划, 2023, 47(4): 31-44.
- [37] 何嘉明, 周素红, 谢雪梅. 女性主义地理学视角下的广州女性居民日常出行目的及影响因素[J]. 地理研究, 2017, 36(6): 1053-1064.
- [38] GIURGE L M, WHILLANS A V, WEST C. Why time poverty matters for individuals, organizations and nations[J]. *Nature Human Behavior*, 2020, 4: 993-1003.
- [39] KWAN M P. The limits of the neighborhood effect: contextual uncertainties in geographic, environmental health, and social science research[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2020, 108(6): 1482-1490.
- [40] MÜÜRSEPP K, JÄRV O, TAMMARU T, et al. Activity spaces and big data sources in segregation research: a methodological review[J]. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2022, 4: 861640.
- [41] 魏越, 杨东峰. 邻里目的地建成环境对老年日常活动机会的影响: 基于感知和参与视角[J]. 地理科学进展, 2023, 42(1): 89-103.
- [42] YUAN Y H, XU Y. Modeling activity spaces using big geodata: progress and challenges[J]. *Geography Compass*, 2022, 16(11): e12663.
- [43] 牛强, 易帅, 顾重泰, 等. 面向线上线下社区生活圈的服务设施配套新理念新方法: 以武汉市为例[J]. 城市规划学刊, 2019(6): 81-86.
- [44] 伍磊, 牛强, 阿吉艾比布拉·艾尼瓦尔, 等. 虚实融合的线上线下社区生活圈: 迭代升级与规划探索[J]. 城市规划学刊, 2024(2): 25-33.
- [45] ARRANZ-LOPEZ A, SORIA-LARA J A. ICT use and spatial fragmentation of activity participation in post-Covid-19 urban societies[J]. *Land Use Policy*, 2022, 120: 1-11.
- [46] 袁泽皓, 骆钰波, 张宇, 等. 基于活动锚点的个体活动空间构建方法及应用研究[J]. 地球信息科学学报, 2025, 27(11): 2652-2669.
- [47] OMER I, KAPLAN N. Structural properties of the angular and metric street network's centralities and their implications for movement flows[J]. *Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(6): 1182-1200.
- [48] 车冠琼, 仇保兴, 王倚天, 等. 基于居民步行活动模拟的社区生活圈规划: 研究框架与议题[J]. 西部人居环境学刊, 2024, 39(2): 139-143.
- [49] 车冠琼, 兰旭, 王倚天. 居民步行仿真模拟下的生活圈居住区空间优化[J]. 南方建筑, 2025(2): 21-29.
- [50] 周志菲. 老旧社区公共空间“人口-空间”失配及设计应对[J]. 城市问题, 2021(6): 25-33.
- [51] YANG S Q, DANE G, ARENTZE T A. An agent-based model to simulate pedestrians' affective experiences and activities for evaluating urban public space design[J]. *Cities*, 2025, 166: 106292.
- [52] WOLPERT L, OMER I. Comparative analysis of pedestrian volume models: agent-based models, machine learning methods and multiple regression analysis [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2025, 117: 102238.