

面向空间绩效的规划模拟与评价： 以上海市虹桥主城片区单元规划 为例

晏龙旭 陈君南 张尚武 王 德 李 欣 殷振轩 窦 寅

Planning Simulation and Spatial Performance Evaluation: A Case Study of Unit Planning of Hongqiao, Shanghai

YAN Longxu, CHEN Junnan, ZHANG Shangwu, WANG De, LI Xin, YIN Zhenxuan, DOU Yin

提 要 规划应具备分析和评价方案空间绩效的能力，这是规划科学性的基本要求。提出一种新的规划模拟评价方法，聚焦城市用地布局规划中的“功能—用地”“功能—功能”匹配问题，集成多种模型模拟供给和需求的分布，并借鉴空间绩效相关研究构建指标体系，系统评价规划方案的供需匹配绩效。针对上海市虹桥主城片区单元规划开展应用，发现其通过规划就业和商业中心，一定程度上提升了全市尤其是周边地区的通勤和消费出行绩效，但也付出了供需匹配绩效下降的代价，带来商务商业空间空置风险和交通压力。访谈调查和相关研究在多个方面印证评价结果，验证了方法的有效性。认为所提出的模拟评价方法一定意义上也可作为智能规划奠定基础。

关键词 空间绩效；规划模拟；供需匹配；方案评价；虹桥商务区

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202305005
文章编号 1000-3363(2023)05-0037-08

作者简介

晏龙旭，同济大学建筑与城市规划学院、国土空间智能规划技术自然资源部重点实验室助理教授，yanlongxu@tongji.edu.cn

陈君南，同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生

张尚武，同济大学建筑与城市规划学院教授，通信作者，zhshangwu@tongji.edu.cn

王 德，同济大学建筑与城市规划学院教授

李 欣，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

殷振轩，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

窦 寅，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

Abstract: The scientific planning paradigm calls for systematic analysis and evaluation of potential outcomes of spatial plans. This paper proposes a novel method for planning simulation and evaluation, focusing on spatial performance and emphasizing the compatibility between different urban functions as well as between urban functions and land use. It constructs a series of models to simulate the spatial distribution of supply and demand and evaluates plan performance in meeting spatial needs through employing metrics derived from existing studies. The method is tested in the evaluation of the unit plan of Hongqiao, Shanghai. Results demonstrate that the plan helps improve the efficiency of commuting and consumption-related trips through strategically reserving spaces for employment and commercial centers. However, it also raises the risk of commercial and business space vacancy and may exacerbate traffic congestion. Field investigations confirm the evaluation results in many aspects, providing evidence for the methods' validity. Finally, we conclude that the method lays the foundation for smart planning.

Keywords: spatial performance; planning simulation; supply-demand compatibility; plan evaluation; Hongqiao Business Area

随着我国新一轮国土空间总体规划的编审完成，如何把总体规划的目标指标进一步落实到详细规划，统筹优化功能布局、空间结构、资源利用，促进城乡发展“更高质量、更高效率、更加公平、更可持续、更为安全”，成为规划研究关注焦点^[1]。2023年3月自然资源部印发《关于加强国土空间详细规划工作的通知》（以下简称《通知》），要求各地要在“三区三线”划定后全面开展详细规划的新编或修编工作，发挥详细规划在“五级三类”体系中承上启下的关键作用，并通过详细规划的落地实施将“多规合一”改革不断向纵深推进。

在深化土地使用布局规划过程中，规划应具备分析和评价空间布局方案优劣的能力，这是规划科学性的基本要求。《通知》提出要加快推进规划编制和实施管理的数字化转型，积极开发各类辅助决策算法程序，不断提高详细规划的数字化管理水平和动态适应能力。但在规划实践中，规划师面临具体的土地使用和开发强度配比^[2]、空间结构

*“十四五”国家重点研发计划课题“国土空间多要素协同机理与系统调控理论方法体系”（项目编号：2022YFC3800801）；国家自然科学基金项目“‘本地—非本地’理论视角下大都市中心体系的功能构成模式与相互作用机制研究：以上海为例”（项目编号：52208074）；国家自然科学基金项目“基于空间绩效情景的城市布局方案评价方法研究”（项目编号：52078352）

优化^[3-4]、交通承载力^[5]、低碳减碳发展^[6]等问题时,虽然已有诸多定量的绩效评价方法探索,但实践中仍常常依赖主观经验判断,有关方法有待更广泛地应用到实践中。与此同时,传统的功能分区、轴线、廊道、发展带、多中心等抽象逻辑难被主观把握,有时非但没有好处,还会影响城市发展的良性循环^[7]。国土空间规划局在《通知》解读中也提出,依托国土空间规划“一张图”系统积极开发各类辅助决策算法程序,是提高详细规划编制水平的重要技术支撑手段之一^①。

在欧美发达国家,试图利用计算机解决规划问题的历史由来已久。随着1970年代后欧美城市规划逐渐走向协作式规划,基于计算机的支持规划系统和方法也从大尺度模型、“最优决策”平台转向聚焦空间方案和规划情景的评估和分析,为政府、规划师和利益相关者之间的规划协作提供理性支持^[8]。近期发展趋势也表明,随着近年来计算机软硬件、人工智能算法和大数据应用的快速发展,规划支持系统(planning support system, PSS)和相关工具成为规划中不可或缺的工具^[9]。可见,探索面向我国实践需求的方案模拟评价方法是一项十分紧迫的任务,也是走向智能规划的必经之路。

本文提出一种方案模拟和评价的方法,部分借鉴城市活动模拟的思路,聚焦城市用地布局规划中的“功能—用地”“功能—功能”匹配问题,通过模拟方案背后居住、工作、消费、交通等供给和需求的分布,对有关绩效指标开展系统测度和评价。进一步针对上海虹桥主城单元规划开展应用探索,结合实地调研访谈验证该方案模拟评价方法的可行性与有效性。

1 城市空间绩效及方案模拟评价的相关进展

1.1 城市空间绩效的评价研究重点

规划模拟的主要目标是评价空间方案的合理性和优劣——即空间绩效。梳理空间绩效研究的关注重点和有关指标对于方案模拟评价至关重要。通过有关文献的梳理,认为有关研究的关注重点可以归纳为供给和需求的匹配^[10],空间

供给主要由各类用地布局、开发强度等规划直接决定,而需求主要来自人的居住、就业、消费、公共服务等方面。由于城市中有着多个维度的相互交织的供需关系,空间布局的绩效存在复杂性。见图1。

一方面,一种需求需要相应的用地和建筑提供空间供给,形成“功能—用地”的供需匹配关系。匹配不佳时,会出现过度拥挤、建筑空置等问题,造成人地关系的低效。有研究聚焦青年居住空间及公共服务设施的需求,分析了青年人口的集聚区位和对公共服务设施的动态需求,提出住房和公共服务设施布局等应对策略^[11]。在产城融合的研究中,重点评价就业岗位供给和需求的失衡,识别产业用地增长速度过快带来的职住关系不合理等问题^[12]。在商业空间绩效评价研究中,强调了空间活力、利用效率、均好性等指标,用以测度活动需求与商业空间供给之间的匹配程度^[13]。以上空间绩效评价要点可以总结为居住需求、就业需求、消费活动需求与相应的居住用地(住房)、就业类用地、商业用地之间的匹配度。

另一方面,不同功能之间,如居住与就业(在劳动力市场中互为供需)、居住与商业、居住与各类公共服务等,又构成了“功能—功能”的供需匹配关系(图1)。如果供需在空间上离得太远,会带来长距离通勤和消费出行等出行效率的低效。在这一方面,职住平衡和通勤绩效备受关注,例如通过辨析职住关系的“静态”多中心结构和通勤出行的动态特征,提出通勤视角下多中心战略的

本质是提高组团内部的出行比例^[14]。有研究同样基于静态与动态视角,通过识别分析都市区的基本通勤单元来评价通勤绩效^[15]。也有研究提出将多尺度职住关系指标与通勤距离分布指标交叉分析,进一步识别职住平衡但不匹配(导致长距离通勤)、职住不平衡且可能不匹配等具体问题在空间上的分布,为规划策略提供更精细的参考^[16]。人口与公共服务设施的供需匹配同样广受关注,研究者一般通过构建各类设施的综合可达性和满意度测度模型来评价两者的供需匹配质量^[17-18]。总的来看,在“功能—功能”供需匹配方面,居民的通勤出行距离、消费出行距离、生活圈可达距离/时间(或公共服务覆盖度)等成为规划评价研究中主要的空间绩效指标^[19-21];同时,出行需求与相应的地铁等大容量公共交通系统、道路网络等供给之间的匹配,也是规划评价的重点^[13,15]。

1.2 国内外规划方案模拟评价方法的进展

试图利用计算机解决规划问题的历史可以追溯到1960年代,伴随着规划理论和方法从设计转向“应用科学”,诞生了各种大尺度模型,试图借由计算机精准预测未来^[22]、直接生成“最优决策”^[23];这些模型在1970年代规划走向“后理性时代”的过程中遇到了惨败^[24],之后随着微型计算机的普及,1980年代之后陆续出现了一批采用数字技术支持公众协作的工具^[25-26]。在这些工具有相当一部分聚焦于空间方案的评估和分析,包括影响分析(impact analysis)、情

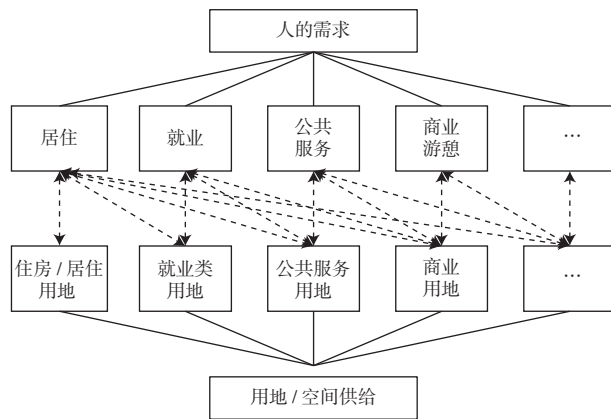


图1 城市中多维交织的供需关系
Fig.1 The supply-demand relations in cities

景分析 (scenario analysis)、面向绩效的规划 (performance-based planning) 等主要功能^[8]，其主要目标是为政府、规划师和利益相关者之间的规划协作提供理性支持。例如，Klosterman^[27]首次阐述著名的协作式规划支持平台“*What if?*”的目标——“不是为了准确地预测未来的情况，相反，它是一种政策导向的规划支持工具，能够确定在给定清晰的政策选择、趋势假设时将会发生什么”。在这种思想下，早期版本的*What if?*实现了特定情景下的各类用地的需求预测、空间分配、影响分析等功能。针对不同地区的规划实践需求，类似的规划支持系统广泛开发了多种方案/情景模拟评价方法，例如ENVISION Tomorrow开发了区位分析、交通模拟、财务分析、公共健康、城市更新、住房公平等一系列工具，用以支撑情景规划中情景构建、模拟、评估等多个环节，广泛应用在美国的城市与区域规划案例中^②。欧美发展经验表明，城市规划中应用基于计算机的各类技术，必须以规划问题为导向，寻求适宜的技术及其应用方法^[28-29]。

我国学者对空间方案模拟评价方法与应用也进行了广泛探索。有较多研究^[30-31]针对环境绩效开展物理过程模拟评价，例如基于各类较成熟的环境模拟方法，对规划方案的水污染排放、大气污染排放、风环境、噪声情况、温度环境等进行模拟和评价。一些研究^[3,5]关注交通方面的模拟评价，通过模拟特定空间结构或用地开发强度分区规划的交通影响，评价方案空间绩效，并提出优化策略。较少的研究关注空间布局方案的影响分析：根据不同政策情景生成用地布局方案，模拟和评价不同政策实施对城市规划区土地使用产生的影响^[32]；采用元胞自动机模拟了轨道交通规划对未来土地使用演变的潜在影响^[33]。总体来看，国内相关研究对环境绩效的模拟评价应用较多，对供需匹配视角下方案空间绩效的模拟评价仍有待进一步完善，而后者与各类大城市病显著相关，正是当前国土空间规划从总体规划向详细规划推进过程中，进一步统筹优化功能布局与空间结构、实现高质量发展的关键。

2 面向空间绩效的空间方案模拟与评价方法

2.1 空间方案运行绩效模拟评价方法

基于空间绩效相关文献，总结认为方案评价中关键的“功能—用地”供需关系包括：人口—住房（居住用地）、就业—就业类用地、消费活动—商业类用地等，主要绩效指标包括各类用地的“空置风险”等。关键的“功能—功能”供需关系包括：人口—就业、人口—商业、人口—公共服务设施等，涉及常用指标包括职住平衡指数、通勤距离、消费出行距离、生活圈距离等。与交通绩效有关的指标则包括地铁流量、道路流量分布等。

囿于多种供需关系的相互交织，很难采用一种方法一次性评价所有供需关系，更好的方式是针对每一种供需关系进行并行评价，并将与该供需关系有关的其他重要因素作为模拟供需关系的前提条件。据此，本文提出一种“推导式”的空间绩效模拟评价方法。以人口、居住用地、就业、就业类用地等供需关系为例，由于其相互之间存在相互交织的匹配关系，很难进行一次性评价。因此提出了给定其他关键要素分布前提下的模拟评价方法：

(1) 给定就业分布下，评价“人口—住房”匹配绩效。假设就业岗位按照相应用地的规划布局实现，然后再进行就业岗位的居住地选择模拟，获得其居住需求的空间分布，最后与住房的供给进行关联，评价居住用地的“空置风险”。需要指出的是，现实世界的空置风险不仅与住房、就业总量的分布有关，还与就业类型、住房类型、开发运营策略、住房价格等有关，这里的“空置风险”不是为了预测未来，而是基于一般规律来评价方案布局的合理性。

(2) 给定人口分布下，评价“就业—就业类用地”匹配绩效。假设人口分布按照居住用地的规划布局实现，然后再进行居住人口的就业地选择模拟，获得其就业需求的空间分布，最后与就业岗位供给进行关联，评价就业类用地的“空置风险”。这一方式同样适用于评价“消费活动—商业类用地”之间的供需匹配绩效。现实中商务商业楼宇和产

业用地的空置显然不是由人口就业需求单方面决定，更受到招商引资、开发策略等的决定性影响，这里的“空置风险”同样只是在居民出行一般规律下对供需关系的测度评价，不是对未来的预测。

(3) 给定人口和就业分布下，评价“人口—就业”的匹配绩效。假设人口分布、就业岗位分布均按照规划布局实现，然后采用双约束通勤模型，获得在人口和就业岗位总量分布的约束下的通勤矩阵，从而评价通勤距离指标。同理，假设人口分布和商业用地、公共服务设施均按规划落实，这一思路同样可以评价消费出行距离、获取公共服务的活动距离分布情况，只需将双约束模型修改为对应的目的地选择模型即可。

2.2 模型构建和参数标定

以上方法需要整合多种模型予以实现（图2）。在供给侧，通过人口分布模型、就业分布模型、消费分布模型等来预测在给定的用地布局和开发强度规划下，居住容量、就业机会、消费活动容量的规划供给。这些模型以多元线性回归为主要形式，基于用地性质、面积、开发强度、用地周边建成环境因素等自变量预测各类潜在供给量的空间分布。在需求侧，主要通过居住地选择模型、就业地选择模型、消费活动地选择模型等来分别预测居民的居住、就业、消费需求的空间分布。这3个模型以多项Logit离散选择模型为主要形式，分别基于给定居民就业地或居住地，考虑潜在目的地的用地性质、面积、开发强度、周边建成环境因素及可达性等因素，预测各类潜在需求量的空间分布。在针对虹桥案例的研究中，上述供给和需求类模型均采用上海市2014年的有关数据在居委单元尺度进行标定，标定结果显示，预测的就业岗位分布、就业地选择集计分布、消费活动地选择集计分布与实际结果的相关系数分别达到0.92、0.80、0.75，表明模型较好地拟合了居民活动规律。

另外，评价一些指标还需要用到其他模型。采用双约束通勤模型，基于规划方案预测的居住容量、就业机会及可达性条件，可以预测在人口居住、就业活动按规划布局落实的情况（即双约束）

下,平均通勤距离、长距离通勤等绩效指标的表现情况。基于双约束通勤模型模拟的通勤OD矩阵、消费活动地选择模型模拟的消费活动OD矩阵,可进一步模拟评价对轨道交通和地面交通的影响。轨道交通方面,主要参考现状通勤出行中轨道交通出行占比来估算未来轨交通勤增量,用以评价方案对特定轨交线路出行需求的影响;地面交通方面,采用现状小汽车出行占比估算潜在小汽车OD规模,然后采用经典的随机多路径(stochastic multi-path)交通分配方法获得交通流量在路网上的分布,从而评价方案对道路交通的影响。基于上海市越江隧桥流量监测报告,验证了模拟的地面交通流量与监测流量之相关系数约为0.8,表明该方法具有一定有效性。

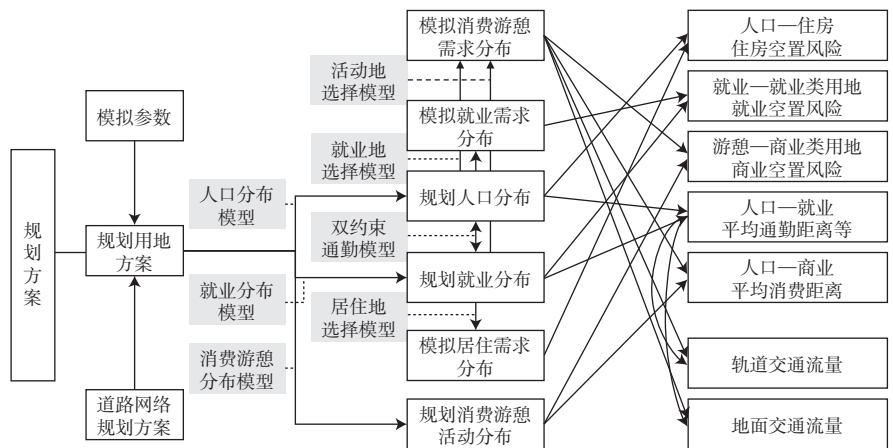


图2 基于活动模拟的规划空间绩效评价的技术框架

Fig.2 Simulation-based framework for evaluating spatial performance

3 上海虹桥商务区案例应用

3.1 虹桥商务区规划背景

虹桥商务区是上海市2009年依托虹桥综合交通枢纽设立的国际化现代商务区,后被《上海市城市总体规划(2017—2035年)》确定为4个主城片区之一。从2011年《虹桥商务区规划》到2020年《上海市虹桥主城片区单元规划》(以下简称虹桥单元规划),再到2021年《虹桥国际开放枢纽建设总体方案》,其功能定位从交通枢纽逐步转为包含商务、服务、会展、科创、居住等的综合性功能,规划能级从上海市拓展到长三角乃至国际层面,因此是对上海全市发展有重要影响的规划案例。虹桥单元规划常住人口45万人,预测就业岗位70—75万人(表1)^③,建筑总量控制在4940万m²以内,其中,住宅建筑规模约1831万m²,商业商务办公、研发工业类建筑面积约1582万m²、296万m²,足以对城市产生显著影响。

本文探索性地将虹桥单元规划(图3)置于全市的“现状”(2014年)中,以居委单元开展模拟评价。将现状置于2014年主要是囿于研究数据局限,无法获取当前土地使用现状图,也缺少全市的地块尺度用地规划布局,因此无法将该规划置于当前或未来的总体环境中予以模拟评价。另一方面,按2020年建筑轮廓估算虹桥单元规划已经建设完成约

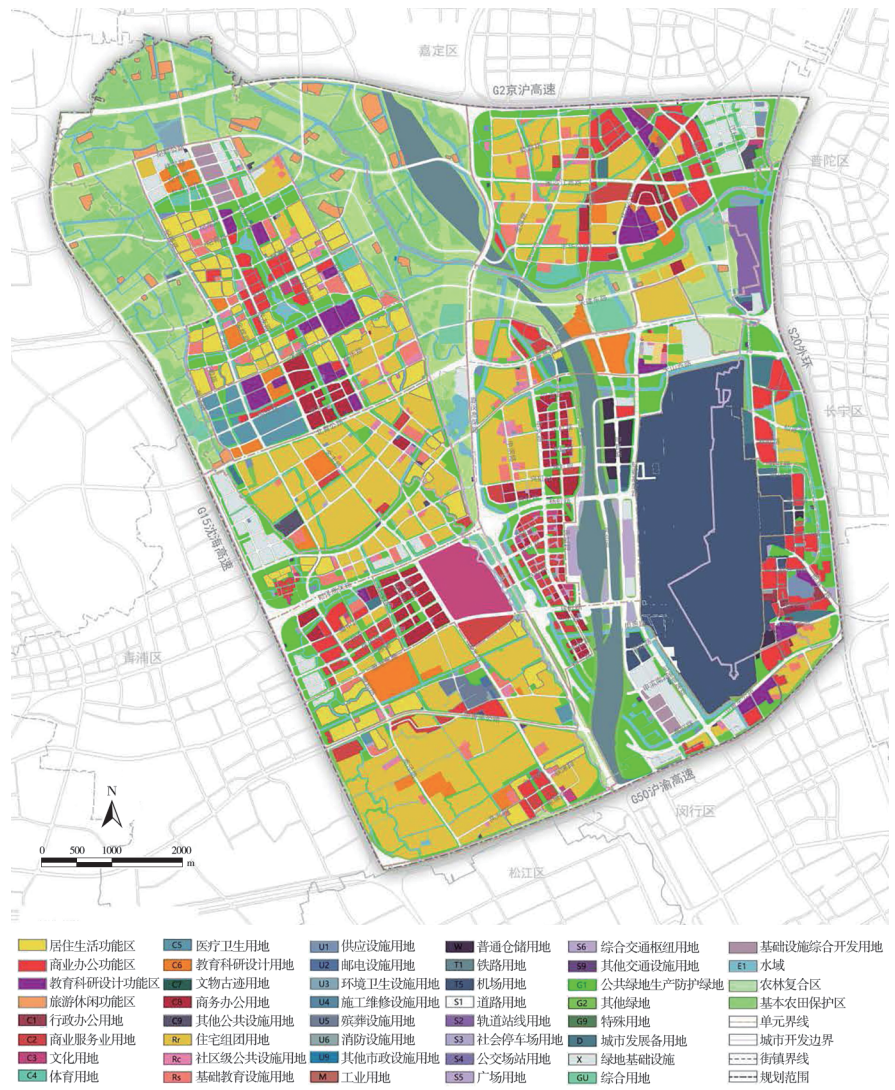


图3 《上海市虹桥主城片区单元规划》土地使用规划图

Fig.3 The land use plan in "Shanghai Hongqiao main city area unit plan"

资料来源:规划公示文件

60%以上,已经对城市产生了相当大的影响,例如有研究^[34]发现其职住分离现象突出。因此认为,将该规划置于2014年全市“现状”的评价分析仍对后续建设有一定指导意义。

3.2 “功能—用地”匹配绩效模拟评价

首先评价虹桥单元规划的“功能—用地”匹配绩效。在“人口—住房”维度,采用就业分布模型模拟岗位分布,然后代入规划方案,模拟每个就业人口的居住选择,集计为居住需求分布,并分析其与规划住房供给的匹配度。模拟结果(表2)发现,规划落实会带来高达89.5万人的居住需求,远超规划供给,未来总就业人口中约有30%的就业人口会选择居住到中心城区。这意味着随着该地区就业的如期导入,居住需求和住房价值可能都会持续上涨。现实中的住房空置还受到住房开发与产业导入相互关系以及住房市场投机等因素的关键影响,其他地区就业人口抢先在虹桥商务区购房,会进一步挤占本地就业人口的居住空间,使问题比模型估计更严峻。例如有研究^[34]发现,近期虹桥商务区的就业人群中只有15%在本地居住,职住分离问题较为突出,随着未来商务区内办公楼宇陆续开发建设,商务区内职住失衡的问题可能会进一步加剧。

在“就业—就业类用地”维度,先采用人口分布模型模拟居住分布,然后代入规划方案,模拟全市每个居住就业人口的就业地选择,集计为就业需求分布,并分析其与供给(规划就业岗位)的匹配度。结果(表2)发现,虹桥商务区能吸引到的就业需求约40万人,只相当于规划就业岗位的一半。这说明在可达性制约下,虹桥商务区吸引外部居民前往工作的可能性并不足以抵消商务区的职住不平衡,其就业空间(主要是商务商业用地上的建筑)有高达49%的“空置风险”。这一结果并不是对未来空置风险的预测,而是为了说明在普遍的通勤出行规律下就业空间供给超出需求的情况,相对应的现实可能是:在未来产业全面导入后,入驻企业必须为了从其他地区吸引就业人口付出额外成本(例如住房补贴、交通补贴)。

采用同样的方法模拟分析“消费活

表1 虹桥商务区现状(2014年)及规划的人口和就业情况

Tab.1 Current and planned population and employment

	现状总量/万人	规划值/万人	规划总量/万人
常住人口	76.3	45	62.5
常住就业人口	38.5	—	34.7
就业岗位	34.8	70	79.7

表2 虹桥单元规划的“功能—用地”匹配绩效

Tab.2 The function-land use compatibility

绩效维度	供给	需求	评价
人口—住房	62.6万人	89.5万人	供小于求
就业—就业类用地	79.7万人	40.4万人	空置风险约49%
消费—商业类用地	345.1万人次/天	200.1万人次/天 ^⑤	空置风险约42%

动—商业类用地”匹配绩效,发现虹桥商务区能吸引到的常住居民和外来人口的消费活动总量仅为推测供给能力的58%,其商业游憩类空间有高达42%的空置风险。这一结论同样不是对未来的预测,而是依据客观规律对商业空间供给与消费需求的匹配程度的定量测度。与评价结论类似,有关研究也注意到虹桥商务区产强城弱、职住失衡的问题,认为会影响社会消费能力的提升和城市商业、服务业的发展,使得城市发展缺少内生动力^[35]。其他因素如价格机制可能会进一步影响未来空置情况:如果未来虹桥商务区的商办楼宇租金持续下降,也许能吸引更多商家和企业前来入驻,但虹桥商务区是否还能维持发展定位和品质将面临挑战。

笔者尝试从侧面调查了虹桥商务区当前发展情况,以验证以上模拟评价结论。访谈了虹桥商务区某开发运营公司经理,其估计办公空间近期整体空置率接近50%,并强调因为住宅供应量少和限高等原因,晚上和周末商业客流较为缺乏,该公司最初规划的商业空间实际只保留建设了1/3,但出租率仍只有一半左右^④。相关人员还提出,由于虹桥商务区用地大多已经出让,进一步补充住房的难度较大,而高铁客流的停留时间很短,消费机会不高。还访谈了前虹桥商务区管委会规划处相关人员,其推测虹桥商务区近期商务办公和商业空间空置率可能高于35%。总体上,模拟评价结果反映的问题与调查访谈基本一致,有力支持了所提出的方法的可行性和有效

性,同时也表明,如果能在规划编制时期就开展类似的方案模拟评价,上述问题或许能够得到提前考虑甚至完全避免。

3.3 “功能—功能”匹配绩效模拟评价

评价虹桥单元规划的“功能—功能”匹配绩效。假设居住人口、就业岗位按规划(商务区外按现状)分布,通过双约束通勤模型模拟获得通勤OD矩阵(图4左),进而计算各单元的平均通勤路网距离。结果发现,规划显著改善了周边地区的通勤效率,使规划区及周边5 km范围的平均通勤路网距离下降约3%,使全市平均通勤路网距离下降0.11%。显然,在虹桥枢纽这一近郊区位布局如此大规模的就业中心,有利于减少原来全市的向心通勤规模,一定程度上提高了全市的通勤绩效。同时,虹桥商务区这一强就业中心还能够吸引到嘉定新城、松江新城甚至中心城的居民前来通勤,造成两个新城的通勤距离上升约1%以上,一定程度上会加剧新城的“卧城”属性。

类似地,通过消费地选择模型模拟消费活动OD矩阵(图4右),进而计算各单元居民消费出行的平均路网距离。结果发现,其规划的商业中心同样显著改善了周边消费出行效率,使规划区及周边5 km范围的平均消费距离下降4.6%,也轻微促进了全市的消费出行的匹配绩效,使全市平均消费距离下降0.07%。虹桥商务区也吸引到一些来自中心城、嘉定和松江新城的居民,使其消费出行距离有1%—2%的上升。同时,

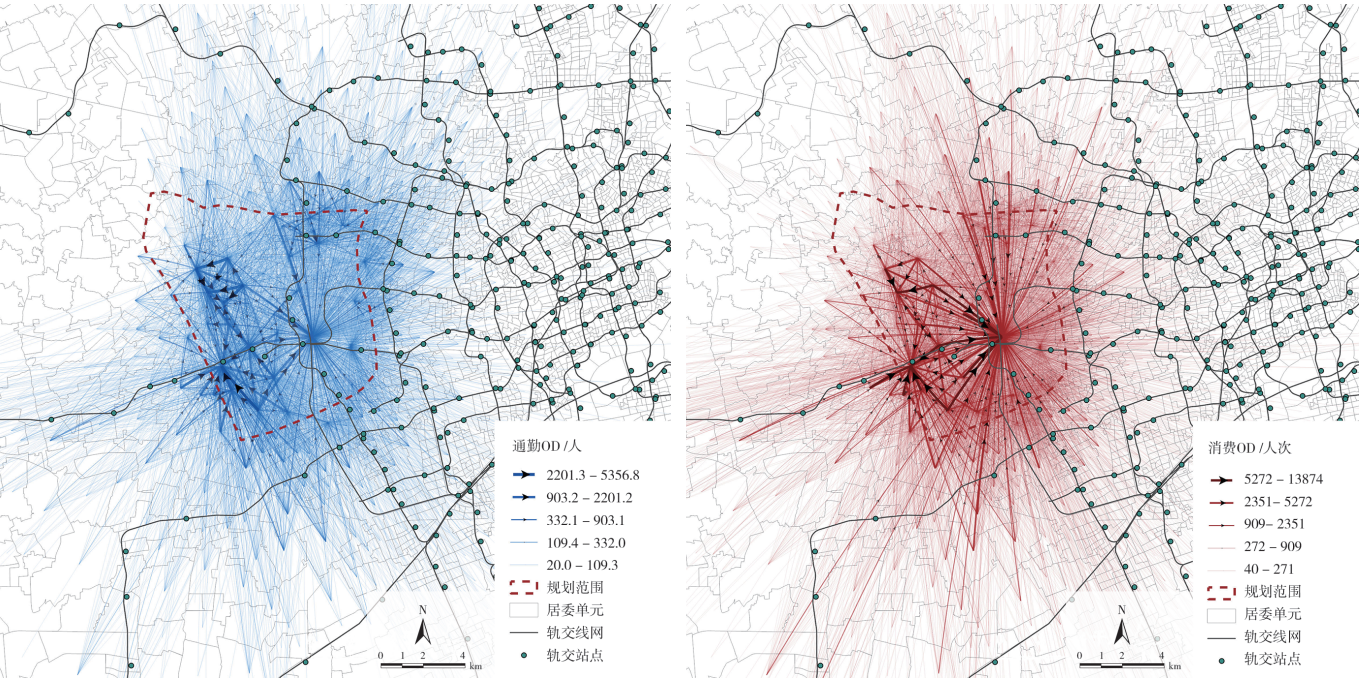


图4 模拟虹桥商务区的通勤（左）和消费出行（右）OD分布
Fig.4 Simulated origin-destinations of commuting (left) and consumption trips (right)

模拟结果还显示：虹桥商务区将会形成两个具备区域吸引力的商业中心（紧邻虹桥枢纽的虹桥天地、规划区西部的蟠龙天地及周边）和一个主要服务内部居民的“南虹桥地区中心”；规划公共中心体系中的“北虹桥地区中心”和“东虹桥地区中心”则没有显示出较好的吸引力，这一结果有待验证。

最后评价通勤的交通影响。根据2019年手机数据监测的各OD方向地铁通勤占比，推算模拟的通勤OD矩阵中与虹桥商务区有关的地铁通勤出行^⑦（表3），发现规划将会导致2、10、17号线的通勤人流增加84%以上，未来仅通勤人流就将超过11万人次/天。考虑到该地铁线路本身就已经承担了虹桥枢纽的庞大城际出行、大型公共服务设施（国家博览中心等）人流，大幅增长的通勤人流可能会显著加剧地铁的拥挤。实际上，已有研究^[36]注意到虹桥枢纽存在的对外交通与市内交通过度集中的问题，发现2019年虹桥枢纽集散交通总量就已经达到预期规模的112%，这一矛盾在未来可能会更加明显。同时，进一步模拟地面交通通勤OD的流量分布并与现状拥堵态势（采集自2022年9月高德地图）进行对比（图5），可见虹桥商务区的通勤车

表3 虹桥单元规划的“功能—功能”匹配绩效
Tab.3 The function—function compatibility

绩效指标	空间范围	现状	规划	变化 /%
平均通勤距离 /km	内环	5.205	5.220	0.29
	内环—外环	6.851	6.881	0.44
	规划区及周边5 km	8.674	8.409	-3.06
	嘉定新城	7.763	7.847	1.08
	松江新城	7.165	7.237	1.00
	全市	8.069	8.060	-0.11
平均消费距离 /km	内环	6.004	6.057	0.88
	内环—外环	7.858	7.912	0.69
	规划区及周边5 km	10.078	9.615	-4.59
	嘉定新城	9.421	9.608	1.98
	松江新城	8.605	8.773	1.95
	全市	9.757	9.750	-0.07
轨道交通通勤流量 /人次		6.129	11.284	84.31

流呈环绕虹桥枢纽和中央商务区的格局，在向东、南、北几个方向与当前的常发拥堵路段高度重叠（如嘉闵高架路北段、沪青平公路、七莘路、祁连山南路等^⑧），因此可能会显著加剧未来地面交通拥堵的风险。

4 结论与讨论

本文提出一种新的规划模拟评价方法，集成多种模型模拟规划方案反映的供给和需求空间分布，并借鉴空间绩效相关研究构建指标体系，系统评价供需匹配绩效。针对上海市虹桥主城片区单元规划开展应用，研究发现：该规划通



图5 模拟通勤出行的地面交通流量（左）与现状拥堵态势（右）

Fig.5 Simulated commuting traffic volumes (left) and actual congestion status (right)

过在虹桥商务区布局强就业中心和商业中心，显著改善了周边地区的通勤和消费出行绩效，在一定程度上提升了全市出行绩效；同时也付出了职—住、人口—商业匹配绩效显著下降的代价，给商务商业空间带来空置风险，也给商务区及周边带来交通压力，使可持续发展面临挑战。针对虹桥商务区的访谈调查和相关研究，在商务楼宇和商业空间空置率/出租率、职住关系、交通等多个方面印证了模拟评价发现的问题，验证了方法的可行性与有效性，同时也说明，如果能在规划编制时就开展类似的方案模拟评价，上述问题或许能够得到提前考虑甚至避免。未来可以进一步将该方法推广到整个城市，引入更系统的活动模拟技术，深化指标体系，全面模拟评价用地布局总体方案（例如上海单元规划拼合）的空间绩效，为详细规划统筹优化功能布局与空间结构提供科学依据。

更进一步，本文实际上也试图奠定智能规划的方法论基础。如果与著名的AlphaGo智能围棋类比，这里提出的模拟方法、空间绩效评价指标体系相当于强化学习中的技术环境（environment）与奖励规则（reward/return），如此一来，智能体（agent，目前是规划师，将来可

能是人工智能模型）才能借助算法的力量，实现真正的智能规划。虹桥商务区案例研究表明，城市空间的集聚绩效（就业与商业中心、公服设施规模等）与匹配绩效（职—住、人口—商业/公服等）的矛盾性是城市空间运行绩效的重要形成机理，在两者之间相互权衡是政府、企业、居民和规划师等共同面临的问题。智能规划应当充分考虑上述空间绩效的复杂性，而不应该仅从简化的目标出发（例如只考虑设施可达性）构建脱离实际的“智能规划技术”。

注释

- ① http://gi.mnr.gov.cn/202304/t20230414_2781723.html
- ② <http://envisiontomorrow.org/>
- ③ “现状总量”“规划总量”指与2014年规划区有关的所有居委单元的现状与规划统计结果。“规划总量”相比“规划值”多了与边界相交但部分位于规划区外的居委单元统计值。2014年现状总量采用手机数据扩样后估计获得。
- ④ 为2023年2月访谈结果，其中可能有疫情的影响。
- ⑤ 消费需求包括了模型模拟的常住人口消费活动需求和现状手机数据测算的外来人口活动，后者主要受虹桥枢纽和会展功能吸引。

口活动，后者主要受虹桥枢纽和会展功能吸引。

- ⑥ 由于是将规划置于2022年现状路网上模拟，无法反映未来路网修改后的情况，结果仅供参考。
- ⑦ 现状和规划轨道交通通勤流量基于现状和模拟的通勤OD矩阵和2019年手机数据监测的各OD方向地铁通勤占比推算而得，远期新增线路后虹桥枢纽有关的地铁通勤流量还会进一步增加。

参考文献

- [1] 张尚武, 刘振宇, 张皓. 国土空间规划体系下的详细规划及其运行模式探讨[J]. 城市规划学刊, 2023(4): 12-17.
- [2] 张泽, 付磊, 姜秋全, 等. 总体城市设计中高度和强度控制的双基准模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1083-1089.
- [3] 黄建中, 胡刚钰, 赵民, 等. 大城市“空间结构—交通模式”的耦合关系研究: 对厦门市的多情景模拟分析和讨论[J]. 城市规划学刊, 2017(6): 33-42.
- [4] 李峰清, 赵民, 黄建中. 论大城市空间结构的绩效与发展模式选择[J]. 城市规划学刊, 2021(1): 18-27.
- [5] 周军, 谭泽芳. 交通承载力评估在密度分区及容积率测算中的方法研究及应用实

- 践:以深圳为例[J]. 城市规划学刊, 2020 (1): 85-92.
- [6] SUN B, HAN S, LI W. Effects of the polycentric spatial structures of Chinese city regions on CO₂ concentrations[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 82: 102333.
- [7] 晏龙旭, 张尚武, 王德. 集聚经济、新型城镇化与规划改革[J]. 城市发展研究, 2022, 29(12): 5-11.
- [8] GEERTMAN S, STILLWELL J. Planning support systems in practice[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] GEERTMAN S, STILLWELL J. Planning support science: developments and challenges[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2020, 47 (8): 1326-1342.
- [10] 方晨昊, 赵民. 城市规划视域的“空间供需”理论框架及研究意义[J]. 城市规划学刊, 2023(1): 26-32.
- [11] 殷振轩, 焦健, 王德, 等. 杭州市青年居住空间及公共服务设施需求研究[J]. 上海城市规划, 2021(4): 85-90.
- [12] 冷炳荣, 曹春霞, 易峥, 等. 重庆市主城区产城融合评价及其规划应对[J]. 规划师, 2019, 35(22): 61-68.
- [13] 王灿, 王德, 朱玮, 等. 基于消费者行为的商业空间绩效评价体系建构[J]. 城市规划, 2021, 45(3): 33-45.
- [14] 李峰清, 赵民, 吴梦笛, 等. 论大城市“多中心”空间结构的“空间绩效”机理: 基于厦门Lbs画像数据和常规普查数据的研究[J]. 城市规划学刊, 2017(5): 21-32.
- [15] 郭亮, 张秋圆, 冯佳宇, 等. 大城市基本通勤单元识别与通勤绩效评估: 以武汉都市区为例[J]. 城市发展研究, 2022, 29(12): 43-52.
- [16] YAN L, WANG D, ZHANG S, et al. Evaluating the multi-scale patterns of jobs-residence balance and commuting time-cost using cellular signaling data: a case study in Shanghai[J]. Transportation, 2019, 46(3): 777-792.
- [17] 冯君明, 李超, 孙悦昕, 等. 城市公共服务设施供需空间匹配研究: 以北京市回天地区为例[J]. 城市规划, 2023, 47(5): 75-85.
- [18] 魏伟, 杨启莲, 洪梦瑶. 面向供需匹配的城市公共服务设施分级分类评估方法研究: 以武汉市为例[J]. 城乡规划, 2023(3): 61-72.
- [19] 钮心毅, 丁亮, 宋小冬. 基于职住空间关系分析上海郊区新城发展状况[J]. 城市规划, 2017, 41(8): 47-53.
- [20] 朱娟, 钮心毅. 职住平衡、土地混合使用及其与通勤距离的关系: 基于南宁市移动手机信令数据[J]. 现代城市研究, 2020(2): 98-105.
- [21] 晏龙旭, 张尚武, 王德, 等. 上海城市生活中心体系的识别与评估[J]. 城市规划学刊, 2016(6): 65-71.
- [22] LOWRY I S. A model of metropolis[R]. Santa Monica Ca the Rand Corporation, 1964.
- [23] Urban development models (special report 97)[R]//Highway Research Board, 1968.
- [24] LEE JR D B. Requiem for large-scale models[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1973, 39(3): 163-178.
- [25] GEERTMAN S, STILLWELL J. Handbook of planning support science[M]. Edward Elgar Publishing, 2020.
- [26] KLOSTERMAN R E. Planning support systems: a new perspective on computer-aided planning[J]. Journal of Planning Education and Research, 1997, 17(1): 45-54.
- [27] KLOSTERMAN R E. The what if? collaborative planning support system[J]. Environment and planning B: Planning and design, 1999, 26(3): 393-408.
- [28] 钮心毅. 西方城市规划思想演变对计算机辅助规划的影响及其启示[J]. 国际城市规划, 2007(6): 97-101.
- [29] HOPKINS L D. Structure of a planning support system for urban development[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1999, 26(3): 333-343.
- [30] 杨俊宴, 邵典, 傅秀章, 等. 基于物理环境数字地图的城市设计逐级优化: 过程性探索[J]. 城市规划, 2022, 46(5): 64-80.
- [31] 程熙, 沈占锋, 杨邦会, 等. 城市总体规划环境影响的GIS模拟与评价分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 513-519.
- [32] 钮心毅, 宋小冬. 基于土地开发政策的城市用地适宜性评价[J]. 城市规划学刊, 2007 (2): 57-61.
- [33] 周新刚, 杨辰颖, 黄永俏, 等. 融入规划轨道交通的土地使用多情景模拟: 以上海外围地区TOD为例[J]. 上海城市规划, 2023 (3): 112-118.
- [34] 熊健, 孙娟, 葛春晖, 等. 区域一体化发展背景下枢纽地区规划的实践探索: 以上海虹桥枢纽地区为例[J]. 城市规划学刊, 2020 (4): 73-80.
- [35] 黄亮, 王振, 陈钟宇. 产业区的产城融合发展模式与推进战略研究: 以上海虹桥商务区为例[J]. 上海经济研究, 2016(8): 103-111.
- [36] 王亿方, 刘翀, 谢辉. 虹桥综合交通枢纽十年发展回顾与展望[J]. 城市交通, 2019, 17 (5): 59-65.

修回: 2023-09