

城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同性评价

——以北京市轨道微中心为例

王晶¹, 路羨乔², 陆化普³

(1.北京建筑大学建筑与城市规划学院,北京100044;2.北京市城市规划设计研究院,北京100045;3.清华大学交通研究所,北京100084)

摘要:推动城市轨道交通车站与城市空间结构深度一体化开发是超(特)大城市高质量发展的重要路径。以节点-场所模型为基础,从微观与宏观协同视角提出城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同评价方法,将可步行性与城市活力引入评价模型,通过空间协同评价、评价矩阵分析以及相关分析来评价城市轨道交通车站TOD发展现状与城市空间结构的协同水平。以北京市31个轨道微中心为例进行TOD发展水平与城市活力协同性评价。结果表明:城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力呈现明显的核心-边缘结构;根据协同特征和发展趋势将城市轨道交通车站归纳为活力协调类、活力引领类、活力培育类和活力缺失类4种类型,不同类型车站的TOD发展水平与城市活力协同性存在较大差异;城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力存在明显正相关关系,但是节点指数与城市活力的相关性较弱,表明车站交通供给对城市活力的协同效应不足,且交通供给量对城市活力的刺激力度不足。

关键词:城市轨道交通;TOD;节点-场所-可步行性;城市活力;轨道微中心;北京市

Evaluation of the Coordination Between TOD Development Level and Urban Vitality at Urban Rail Transit Stations: A Case Study of Rail Transit Micro-Centers in Beijing

WANG Jing¹, LU Xianqiao², LU Huapu³

(1. School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Municipal Institute of City Planning & Design, Beijing 100045, China; 3. Institute of Transportation Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Promoting the in-depth integrated development of urban rail transit stations and urban spatial structures is a critical path for achieving high-quality growth in mega-cities. Based on the node-place model, this paper proposes a method for evaluating the coordination between the Transit-Oriented Development (TOD) level and urban vitality at urban rail transit stations from both micro and macro perspectives. The proposed method incorporates walkability and urban vitality into the evaluation model and employs spatial coordination assessment, evaluation matrix analysis, and correlation analysis to evaluate the coordination between the current TOD development and urban spatial structures at urban rail transit stations. Using 31 rail transit micro-centers in Beijing as a case study, the paper evaluates the coordination between TOD development level and urban vitality. The results indicate that TOD development level and urban vitality at urban rail transit stations exhibit a distinct core-periphery structure. Based on coordination characteristics and developmental trends, urban rail transit stations are categorized into four types: vitality-coordinated, vitality-leading, vitality-cultivating, and vitality-lacking. There are significant variations in the coordination between TOD development level and urban vitality across these station types. Additionally, the paper reveals a positive correlation between TOD development level and urban vitality; however, the coordination between the node index and urban vitality is relatively weak, indicating an insufficient synergy between transit supply and urban vitality and inadequate stimulation of the transit supply volume on urban vitality.

Keywords: urban rail transit; TOD; node-place-walkability; urban vitality; rail transit micro-centers; Beijing

收稿日期:2024-06-30

基金项目:中国工程院战略研究与咨询项目“城市公交优先发展的系统对策与政策研究”(2024-XBZD-19-05)、国家自然科学基金项目“大都市区综合客运枢纽与城市空间的耦合机理及开发模式”(51408023)

作者简介:王晶(1981—),女,山东济南人,博士,副教授,研究方向为交通与用地协调、城市更新、韧性城市,电子邮箱 wangjing@bucea.edu.cn。

通信作者:陆化普(1957—),男,辽宁铁岭人,博士,清华大学土木水利学院院长聘教授,博士生导师,清华大学交通研究所所长,研究方向为综合交通规划、交通管理与控制、智能交通系统、交通政策,电子邮箱 luhp@tsinghua.edu.cn。

0 引言

以公共交通为导向的开发(Transit-Oriented Development, TOD)理念促进了轨道交通车站及周边区域的进一步开发,吸引了更多资源聚集,使轨道交通车站成为城市发展的核心节点^[1]。推动轨道交通车站与城市空间结构协同发展并形成积极的互动关系,越来越被认为是解决城市交通拥堵和实现城市可持续发展的关键路径。北京是一个典型的发展中国家超大城市,快速城镇化过程中城市规模高速增长和用地快速扩张,但交通设施建设往往滞后于城市扩张,尤其是公共交通系统对城市空间结构发展的支撑力度不够、引导性不足。虽然近年来北京市轨道交通里程和线网密度不断增加,但由于城市空间结构和功能布局不合理,交通与城市发展之间的矛盾仍然存在。这种现象在发展中国家的其他大城市中也较为常见,影响了TOD理念的推广和实施。因此,对轨道交通车站与城市空间结构协同性进行深入探讨,可以为政策制定与投资优先级确定提供重要的评价依据。

既有研究多数从微观视角对轨道交通车站交通与用地协同性进行评价^[2-8],忽略了宏观层次城市空间结构对车站分级的影响。城市轨道交通与城市空间结构存在紧密的协调作用,这种协调作用可以促使交通设施与城市整体发展相融合,从而提升城市空间的整体效能和可持续性。在城市空间结构视角下,不同功能、不同活力的区域与城市轨道交通的协同模式、目标均存在差异,考虑城市空间结构因素对轨道交通车站“分而治之”非常关键。因此,对微观层次城市轨道交通车站TOD发展水平与宏观层次城市空间结构的协同性进行评价非常必要,有利于通过合理有效的方法实现城市轨道交通与城市空间结构协调及一体化开发。

L. Bertolini^[9]提出的节点-场所(Node Place, NP)理论模型是较为常用的TOD评价模型,主要用于评价车站地区节点交通与场所功能之间的协同性。然而,节点-场所模型及其衍生模型很少考虑微观层次车站周边

区域(以下简称“站域”)与宏观层次城市空间结构的相互作用^[10-13]。与此同时,城市活力可以作为城市空间结构特征的核心要素为协同评价模型提供宏观视角。因此,本文基于节点-场所模型从微观与宏观协同视角提出城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同评价的方法。微观层次,使用节点-场所-可步行性模型描述城市轨道交通车站TOD发展水平;宏观层次,使用城市活力指标评价节点-场所模型对城市空间结构的影响。通过构建分级-分类矩阵协同评价模型与量化节点价值维度、场所价值维度、可步行性维度及城市活力维度指标,本文以《北京市轨道微中心名录(第一批)》中的31个轨道微中心为例进行空间协同评价、评价矩阵分析、城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力相关性分析,探究城市轨道交通车站TOD发展水平与城市空间结构协同性,为城市可持续发展和城市轨道交通高质量发展提供更加全面和深入的理论与实践基础。

1 评价体系构建

城市轨道交通与城市空间结构相互影响。宏观层次,城市形态与城市轨道交通网络规划之间存在显著的协同效应,城市轨道交通的引入与扩建不仅提升了城市交通效率、促进沿线区域经济增长和土地价值上升,还引导城市空间结构的重新布局,有助于形成多中心结构,有效缓解城市中心区压力。微观层次,城市空间结构也会对城市轨道交通产生影响,居住人口密度、就业岗位密度和土地利用混合度等因素显著影响城市轨道交通的使用效率和效益^[14]。城市轨道交通极大地提高了区域交通便利性,使站域可达性大幅提升,从而吸引更多的人群和资本聚集。适宜的站域TOD交通服务设施、建筑密度和土地利用等微观要素与城市空间结构具有相互协同、相互促进的作用。因此,分别从宏观和微观两个层次构建城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同性评价体系(见图1)。

1) 城市轨道交通车站TOD发展水平测度。
节点-场所模型旨在促进站域节点功能和场所功能的协同耦合, 主要关注交通供给与场所土地利用特征, 缺少对站域建成环境的考虑。然而站域建成环境关系到人们的出行体验, 被广泛认为是TOD开发的关键影响因素之一。因此, 节点-场所模型应与站域建成环境特征评价相结合, 以综合全面评价城市轨道交通车站TOD发展水平。此外, 良好步行环境的营造是TOD开发的重要导向之一, 大量关于建成环境与步行之间关系的研究^[15-21]表明应将站域可步行性测度加入模型中。根据建成环境“5D”要素, 即合理距离(Distance)、目的地可达(Destination accessibility)、高密度(Density)、功能混合(Diversity)、良好设计(Design)对可步行性的影响研究^[20], 借助站域可步行性可

以评价建成环境影响出行的所有维度。因此, 本文在节点-场所模型中扩展可步行性维度, 使该模型能够体现步行环境对城市轨道交通车站的影响, 从而形成基于“节点-场所-可步行性”的城市轨道交通车站TOD发展水平测度方法。

2) 城市活力测度。

既有研究表明, 城市活力是经济、社会、文化和空间等多个方面在城市系统中的综合反映; 高城市活力的站域通常意味着更多样的土地利用、更密集的人口分布、更丰富的社交活动和更便捷的交通连接; 城市活力被视为一个综合指标用于评价站域在城市中的重要性^[21-22]。因此, 城市活力可以作为城市空间结构特征的核心要素为协同评价模型提供宏观视角, 使评价不仅局限于站域本身, 而且是将视野扩展到整个城市系统。通过引入城市活力维度, 可以更好地理解站域与整个城市之间的互动关系, 以及这种互动关系如何影响TOD理念的实现。将城市活力纳入协同评价模型是提升城市轨道交通车站TOD评价准确性和全面性的重要步骤。

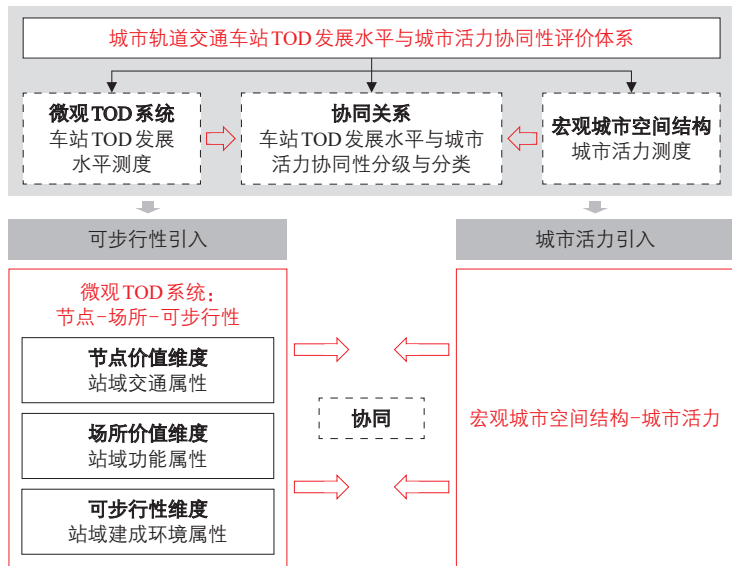


图1 城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同性评价体系
Fig.1 Evaluation framework for the coordination between TOD development level and urban vitality at urban rail transit stations

2 评价指标和评价模型

2.1 评价指标选取

从宏观层次和微观层次两个视角选取城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同性评价指标(见图2)。

宏观层次分级是对城市活力维度进行分级评价, 评价每个站域活力等级。基于既有文献研究、指标独特性和数据公开可用性, 本文选择车站客流量、夜间活动、未来规划作为评价城市活力的指标, 通过相关性检验避免维度间的相互交叉和相互影响。其中, 车站客流量是城市轨道交通车站活力的重要代表; 夜间活动包括夜间人口密度、经济活动状况, 是城市活力的重要表现; 未来规划使用规划用地中核心用地(产业和居住)面积比例来表征地区内可承载的产业用地量与人口量, 是城市活力的重要来源。

微观层次分类是从节点价值、场所价值和可步行性3个维度构建城市轨道交通车站TOD发展水平测度体系。其中, 节点价值维度主要考虑车站承载力、车站网络中心性、车站换乘便捷性3个指标; 场所价值维度主要考虑土地开发水平、土地混合利用、土地价值3个指标; 可步行性维度选取道路肌理、设施可达性和步行网络可达性3个指

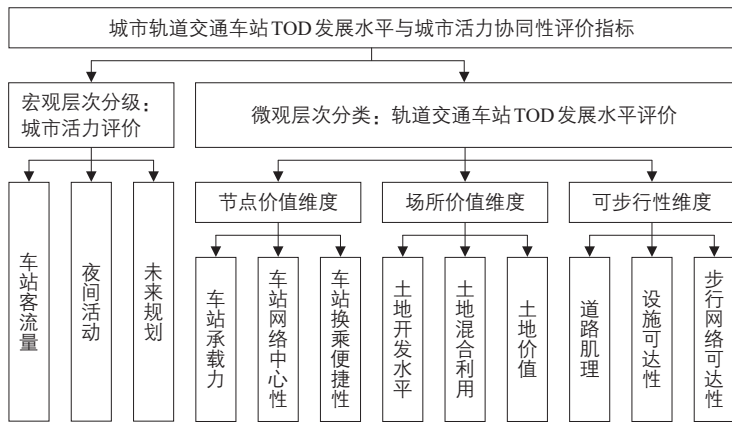


图2 城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同性评价指标
Fig.2 Evaluation indicators for the coordination between TOD development level and urban vitality at urban rail transit stations

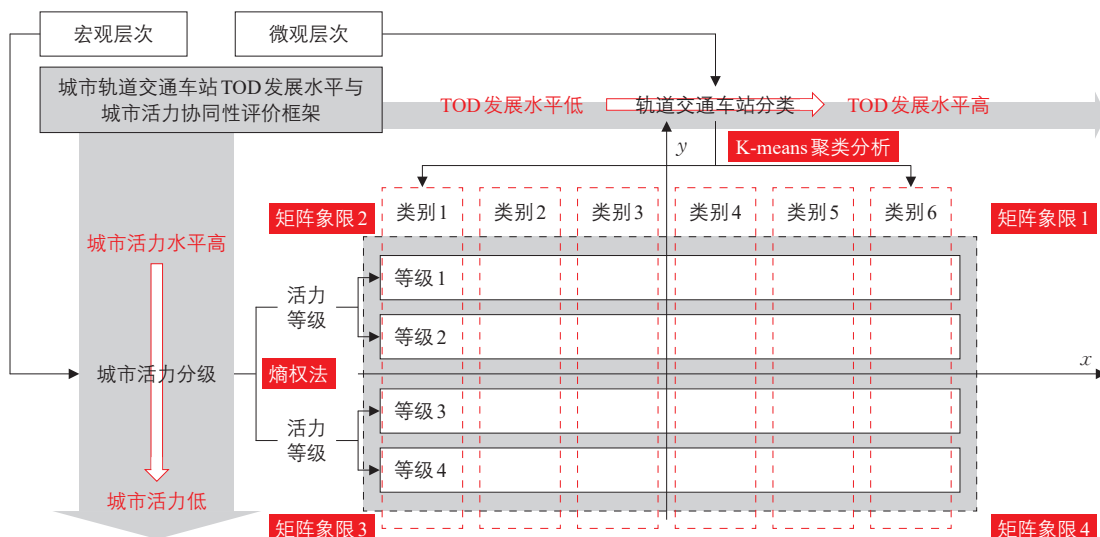


图3 分级-分类矩阵协同评价模型

Fig.3 Classification-categorization matrix coordination evaluation model

标。最后，通过指标处理、相关性检验、标准化、权重确定、三维模型聚类进行城市轨道交通车站分类。

2.2 分级-分类矩阵协同评价模型

在聚类分析得到城市轨道交通车站类型的基础上构建协同评价模型，将节点-场所-可步行性分类结果作为 x 轴、城市活力等级作为 y 轴，通过矩阵象限构建宏观层次的分级结果与微观层次的分类结果，以深入了解城市轨道交通车站与城市空间结构的相关性，并根据象限位置识别城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同性(见图3)。

3 北京市轨道微中心案例

3.1 研究对象与数据来源

为促进城市轨道交通与城市融合发展、提升车站周边活力，北京市于2020年底提出建设以轨道交通车站为核心的轨道微中心。轨道微中心是指与轨道交通车站充分融合、互动，可达性高，土地集约化利用程度高，具有多元城市功能，具备场所感和识别性的城市地域空间，具有活力共享、复合多元、高效集约、便利可达、空间宜人5个特征，其中活力塑造是重要目标。《北京市轨道微中心名录(第一批)》批复中指出：轨道微中心将立足于形成北京市未来功能复合、高品质、服务人民的活力中心，实现与城市公共服务体系、各级城市生活服务圈的有机融合。因此，评估城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力协同性将有利

表1 北京市31个已建成并投入使用的轨道微中心

Tab.1 Overview of 31 built and operational rail transit micro-centers in Beijing

城区	数量	轨道微中心车站名称	
		换乘站	一般站
中心城区	海淀区	3	牡丹园 五道口、六道口
	朝阳区	2	十里河 东大桥
	丰台区	6	景风门、草桥、新宫、丽泽商务区 丰台南路、榆树庄
	石景山区	2	金安桥 新首钢
外围地区	亦庄新城	5	次渠 北神树、次渠北、荣昌东街、同济南路
	大兴区	1	大兴新城
	房山区	2	良乡大学城、良乡南关
	昌平区	4	霍营 回龙观东大街、沙河高教园、生命科学园
副中心	通州区	6	花庄 万盛西、万盛东、群芳、高楼金、嘉会湖

于指导轨道微中心建设的政策制定和实施效果评估，为轨道微中心建设发展提供指引。

《北京市轨道微中心名录(第一批)》中共划定71个车站作为轨道微中心建设地区，包括17个铁路客站和54个地铁车站(以下称“城市轨道交通车站”)，本文选取截至2023年2月已建成并投入使用的31个城市轨道交通车站作为研究对象(见表1)。

研究城市轨道交通车站影响范围时，常使用步行吸引范围(Pedestrian Catchment Area, PCA)进行衡量，通常用圆形缓冲区来表示。本文采用10 min步行时间阈值和 $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 平均步行速度标准将城市轨道交通车站步行吸引范围设定为800 m缓冲区。

本文使用的多源数据主要包含北京市城市轨道交通车站与线路数据、车站周边兴趣点(Points of Interest, POI)、城市轨道交通线网数据、道路矢量数据、城市轨道交通车站进出站客流量数据等(见表2)。

3.2 评价指标和计算方法

参考借鉴国内外相关研究^[23-30], 依据数据可获得性和地域适用性, 本文从节点价值、场所价值、可步行性、城市活力4个维度对指标进行筛选, 共确定21项指标(见表3)。

3.3 评价方法

本文使用信息熵加权方法来综合分级与分类两个层次的指标, 该方法避免了人工加权的主观性。在城市轨道交通车站TOD发展水平分类评价中, 运用K-means聚类方法得到相应的城市轨道交通车站类型, 具体方法与结果参考了文献[31]中轨道微中心车站分类研究。

4 研究结果

4.1 城市轨道交通车站分类和城市活力分级

将31个城市轨道交通车站TOD发展水

平由高到低划分为6个类型: 压力型、节点失衡型、平衡型、平衡型-低步行性、发展型-低步行性、从属型-低步行性(见表4)。将城市轨道交通车站的城市活力划分为4级, 从等级1到等级4城市活力越来越低(见图4)。

城市轨道交通车站类型与城市活力水平分布如图5所示。整体来看, 城市中心区大部分城市轨道交通车站TOD发展水平和城市活力都相对较高, 而在线路末端的城市外围地区, 大部分城市轨道交通车站两者都相对较低。城市轨道交通车站TOD发展水平方面, 城市中心区车站通常具有较高可达性和高效的土地利用, 吸引了大量人口和产业聚集, 这些车站通常拥有完善的交通基础设施和多样化的土地利用功能, 为居民提供了便捷、舒适的出行和生活环境; 相比之下, 由于交通基础设施和土地利用规划的不足, 线路末端城市外围地区的城市轨道交通车站TOD发展水平相对较低。城市活力方面, 由于人口和产业的聚集, 中心区城市轨道交通车站通常具有较高的城市活力, 这些地区拥有丰富的文化、教育和商业资源, 吸引了大量人流和物流; 相比之下, 由于人口和产业分布稀疏, 线路末端处于外围地区的城市轨道交通车站城市活力相对较低。

整体来看, 北京市在城市轨道交通车站TOD发展水平和城市活力方面呈现明显的核心-边缘结构, 但部分线路末端处于外围地区的城市轨道交通车站, 例如回龙观东大街、金安桥、高金楼等车站也具有较高的TOD发展水平和城市活力。这些城市轨道交通车站通常位于大型居住区、城市副中心或重要交通枢纽地带, 具有较高可达性和土地利用效率, 同时也拥有一定的城市活力。这些地区的发展为北京市未来城市规划和建设提供了新方向和新机遇。

4.2 分级-分类矩阵协同评价

传统的节点-场所模型方法无法识别车站与城市空间结构的契合性, 而分级-分类矩阵协同评价模型可以有效识别城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力的匹配程度, 从而判定城市轨道交通车站TOD发展水平与城市空间结构的契合性。本文将城市轨道交通车站类型与城市活力等级进行交叉分析, 形成6×4的交叉矩阵。根据协同特征和发展趋势将处于不同象限的城市轨道交通车站归纳为4种类型: 活力协调类、活力引

表2 多源数据信息

Tab.2 Multi-source data information

数据类型	数量/个	字段	来源
城市轨道交通车站	458	车站名称、经纬度	OpenStreetMap
城市轨道交通线路	520	线路名称、经纬度	高德地图
城市轨道交通车站运营		车站运营时刻表	北京地铁、京港地铁、北京轨道运营官方网站
公共汽车站	3 637	线路名称、经纬度	高德地图
公共汽车线路	6 253	线路名称、经纬度	高德地图
城市轨道交通车站周边POI	46 521	名称、类别、经纬度	Bigemap
建筑	43 755	高度、类型、面积、位置	OpenStreetMap
道路网	20 716	ID、分类、长度	OpenStreetMap
住宅小区	605	名称、房价	链家网站
城市轨道交通车站客流	62	日期、进出站量	北京交通与土地协同研究课题
夜间灯光	31	灯光亮度平均值	NPP-VIIRS 卫星数据
规划用地	31	各类用地占比	北京市规划和自然资源委员会

注: 规划用地数据年份为2020年, 城市轨道交通车站客流数据年份为2022年3月, 其余数据年份为2023年。

领类、活力培育类和活力缺失类(见图6)。

4.2.1 活力协调类

活力协调类城市轨道交通车站既创造了较好的TOD发展成效,也具有较好的城市活力。压力型、节点失衡型车站都属于此类(见表5),这类车站主要位于北京市中心区。例如等级1-压力型的东大桥站(NPW 平均值=0.73,城市活力指数=0.71)、等级1-节点失衡型的十里河站(NPW 平均值=0.67,城市活力指数=0.71),TOD发展水平与城市活力协同性表现较好。值得注意的是,这些车站也存在一些问题。例如,由于人流和物流高度聚集,城市轨道交通车站交通压力较大,容易导致拥堵。此外,由于土地利用功能过度集中,也可能导致环境质量和居住条件下降。因此,在未来城市规划和发展中,

需要注重平衡交通、土地利用和城市活力之间的关系。一方面,通过优化交通组织和交通设施布局缓解交通压力,提高出行效率;另一方面,注重环境保护和居住条件改善,为居民提供舒适、宜居的城市环境。

活力协调类城市轨道交通车站中等级1-平衡型车站的城市活力值略高于TOD发展水平,展现出TOD发展水平与城市活力的良好协同性。这类车站多位于成熟的居住区,周边区域人口密集、商业活动繁荣,为车站提供了源源不断的客流。同时,在规划设计上这类车站也充分考虑了乘客出行需求,与周边用地和交通设施形成了良好协同,五道口站和牡丹园站是这类车站的典型代表。作为北京市地铁13号线的重要节点,五道口站不仅连接了多个重要商圈和居

表3 分级-分类矩阵协同评价指标

Tab.3 Classification-categorization matrix coordination evaluation indicators

层次	维度	基础指标	分项指标	指标说明
分类	节点价值(N)	车站承载力	$N1 =$ 车站出入口数量	车站出入口数量
			$N2 =$ 车站服务方向数	终点站的方向数为1;非换乘站(除终点站)方向数为2;换乘站每增加可换乘的额外线路,方向增加2
		车站网络中心性	$N3 =$ 城市轨道交通网络的介数中心性	通过车站的最短路径长度占网络总路径长度的比例
			$N4 =$ 城市轨道交通网络的接近中心度	车站与其他车站之间平均距离的倒数
			$N5 =$ 城市轨道交通车站之间的平均距离	车站与相邻车站的平均距离
		车站换乘便捷性	$N6 =$ 站域公共汽车站数量	站域内公共汽车的数量
			$N7 =$ 公共汽车换乘便捷性	车站周边200 m公共汽车线路数量
	场所价值(P)	土地开发水平	$P1 =$ 建筑开发强度	站域内地上建筑总面积占站域总面积的比例
			$P2 =$ 建筑密度	站域内地上建筑基底面积占站域总面积的比例
		土地混合利用	$P3 =$ 土地利用功能混合度	基于香农多样性指数方法计算的POI土地利用混合度
			$P4 =$ 场所设施数量	站域内POI数量
		土地价值	$P5 =$ 周边房价	站域内二手房住宅的平均价格
	可步行性(W)	设施可达性	$W2 =$ 商业服务设施修正步行指数	基于WalkScore方法计算的商业服务设施可达性
			$W3 =$ 公共服务设施修正步行指数	基于WalkScore方法计算的公共服务设施可达性
			$W4 =$ 生活服务设施修正步行指数	基于WalkScore方法计算的生活服务设施可达性
$W5 =$ 公园绿地设施修正步行指数			基于WalkScore方法计算的公园绿地设施可达性	
$W6 =$ 车站步行网络可达性			通过空间句法软件sDNA计算BtA800c(800 m角度中介性度量的行人交通量)并取平均值	
步行网络可达性				
分级	城市活力(V)	$V1 =$ 日均车站客流量	一个月内乘客进出站总量的日平均值	
		$V2 =$ 夜间灯光指数	一年中夜间平均光值	
		$V3 =$ 未来规划活力	规划用地中核心用地(产业用地)面积比例	

注:本文以节点价值维度(N)、场所价值维度(P)、可步行性维度(W)指标的平均得分,即 NPW 平均值反映TOD发展水平。

住区，还与周边非机动车道、人行道等道路交通设施紧密相连，为乘客提供便捷、舒适的出行体验。此外，作为地铁19号线始发站，新宫站承担北京市南部城区与郊区通勤客流的重要任务。站域用地与交通协同性也表现得相当出色，不仅为乘客提供了快速便捷的出行服务，还通过优化周边交通组织、

完善配套设施等措施进一步提升城市轨道交通车站的吸引力和便利性。

4.2.2 活力引领类

活力引领类城市轨道交通车站尽管拥有较好的城市活力，但其TOD发展并未达到相应水平，即TOD发展水平与城市活力明显不匹配(见表6)。例如等级1-平衡型-低步行性的丽泽商务区站(NPW 平均指标=0.37, 城市活力指数=0.63), 由于周边商业氛围浓厚, 就业与居住人口密集, 因此城市活力较高, 但因站域部分区域规划正在实施中, 导致站域步行网络连通性与设施可达性较差。为提升这类城市轨道交通车站TOD发展水平, 可以构建高效便捷的步行网络系统, 并不断改进其交通接驳系统, 以提高站域交通状况, 进而提高整个车站的交通效率。等级2-平衡型-低步行性车站也呈现同样状况, 例如回龙观东大街站(NPW 平均值=0.35, 城市活力指数=0.53), 作为大型居住区周边车站, 该车站具有较多商业、文化和娱乐设施, 吸引着人流和物流聚集, 但是大型居住区式的道路网络使得可步行性处于较低水平, 影响城市轨道交通车站TOD发展水平。针对此类车站可以优化步行网络和设施可达性, 提升车站可步行性水平, 为居民提供更加舒适、便捷的出行环境。

活力引领类城市轨道交通车站中等等级2-发展型-低步行性车站呈现较为明显的TOD发展水平与城市活力不匹配特征。例如高楼金站(NPW 平均值=0.25, 城市活力指数=0.50)拥有较好的城市活力, 但TOD发展水平却不足。此类车站通常位于城市外围地区, 周边拥有大量特色产业, 具有大量就业岗位的人口密度单元。因此, 这类车站应将产业功能向城市轨道交通车站集聚, 打造成为城市重要的功能组团。

4.2.3 活力培育类

活力培育类城市轨道交通车站TOD发展水平和城市活力水平都较低(见表7), 例如大兴新城站(NPW 平均值=0.16, 城市活力指数=0.17)和嘉会湖站(NPW 平均值=0.07, 城市活力指数=0.15)。这些车站通常位于城市轨道交通线路末端或者较为偏远地区, 由于交通基础设施和站域开发不足或规划实施未完全, 车站功能效益仍然处于较低水平, 导致TOD发展水平和城市活力都相对较低。此类车站场所和可步行性方面的低价值表明未来发展具有巨大潜力, 应着重对

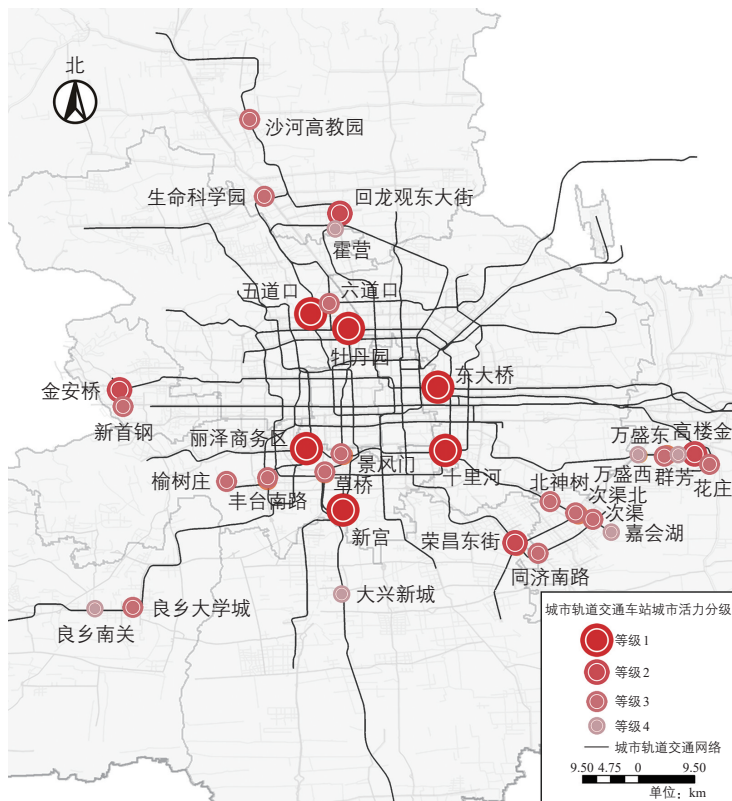


图4 城市轨道交通车站城市活力分级
Fig.4 Classification of urban vitality at urban rail transit stations

表4 城市轨道交通车站类型及各维度平均值
Tab.4 Urban rail transit station types and average values by dimension

城市轨道交通车站类型	数量/个	车站	维度平均值		
			节点价值	场所价值	可步行性
压力型	1	东大桥	0.65	0.75	0.78
节点失衡型	1	十里河	0.88	0.57	0.56
平衡型	7	五道口、牡丹园、新宫、六道口、丰台南路、景风门、草桥	0.54	0.54	0.39
平衡型-低步行性	5	丽泽商务区、金安桥、荣昌东街、回龙观东大街、霍营	0.52	0.47	0.17
发展型-低步行性	12	高楼金、新首钢、万盛东、花庄、次渠北、同济南路、北神树、良乡大学城、生命科学园、榆树庄、群芳、良乡南关	0.30	0.32	0.15
从属型-低步行性	5	次渠、沙河高教园、万盛西、大兴新城、嘉会湖	0.25	0.16	0.07

这些车站地区的规划实施情况进行动态评价。在未来城市规划和发展中，需要加强对这些车站的关注和支持，通过优化交通组织和土地利用规划，提高城市轨道交通车站可达性和便利性，吸引更多人口和产业聚集，促进站域发展。

活力培养类城市轨道交通车站中等级4-平衡型-低步行性车站呈现了另一种不匹配特征，TOD发展水平与城市活力水平相差较多。例如，作为特殊型车站，霍营站(NPW平均值=0.36，城市活力指数=0.17)未来定位为综合交通枢纽，为地铁8号线和13号线换乘站，TOD发展水平中节点价值较高，但由于规划实施未完全，导致车站交通供给水平未有效带动站域活力衍生，站域还存在大量中低效用地。因此，与TOD发展水平相比，霍营站城市活力处于较低水平。对这类车站需要更加关注，以综合交通枢纽建设为契机，重新激活城市中低效利用的土地，通过优化交通功能引导多种城市功能在此集聚，推动城市更新。这不仅可以改善出行、提升服务功能，还能塑造更具吸引力的城市景观形象，进而从多个维度优化城市空间结构，打造充满活力的城市中心。

4.2.4 活力缺失类

活力缺失类城市轨道交通车站中等级3-平衡型车站呈现较为明显的TOD发展水平与城市活力不匹配特征，这类车站TOD发展水平较好，但城市活力水平较差(见表8)。例如景风门站(NPW平均值=0.51，城市活力指数=0.29)和六道口站(NPW平均值=0.48，城市活力指数=0.32)，这类车站周边区域一般具有较为成熟的生活设施、便利的公共交通，并且该区域居民高度依赖城市轨道交通出行。虽然这类车站已经得到重点建设，但在引领城市空间结构方面的能力不足。未来规划中应激活其活力，提高核心用地比例，将TOD发展优势转化为城市活力。

4.3 城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力相关性分析

通过城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力相关性分析(见图7)发现，NPW平均值与城市活力指数相关性较强，存在明显正相关关系($R^2=0.65$)，说明城市轨道交通车站TOD理念的实施可以有效带动站域城市活力。而节点指数与城市活力指数的相关性较弱($R^2=0.25$)，说明交通供给与城市

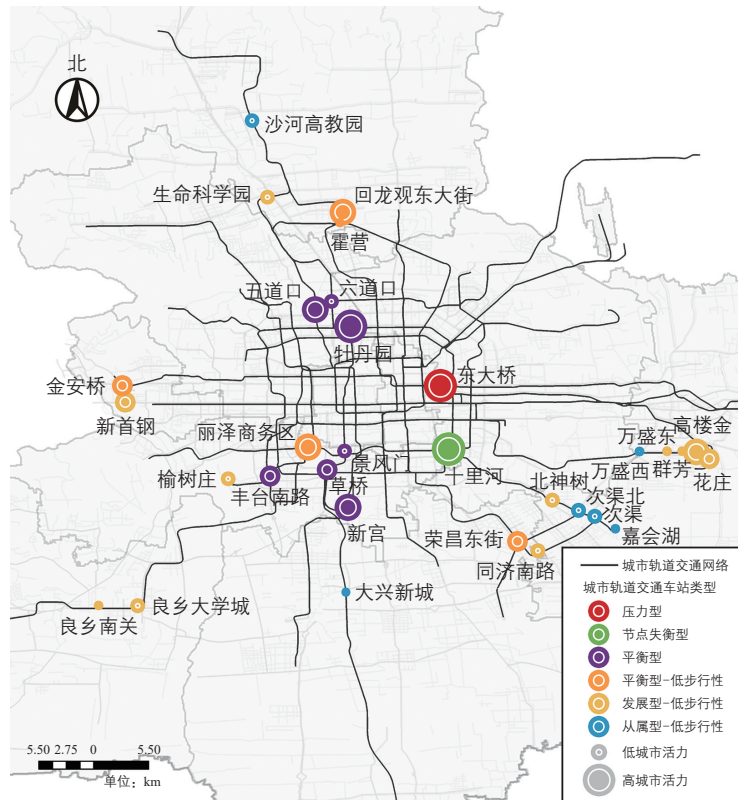
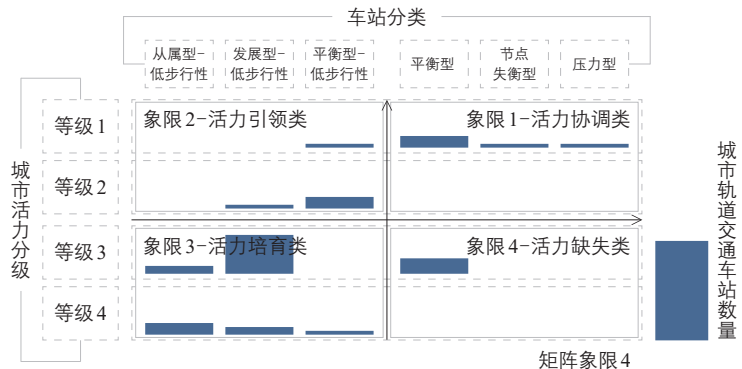


图5 城市轨道交通车站类型与城市活力水平分布

Fig.5 Distribution of urban rail transit station types and urban vitality levels



注：柱状图高度表示该交叉类型的城市轨道交通车站数量，右上角代表城市活力水平最高且TOD发展水平最好的城市轨道交通车站。

图6 基于分级-分类矩阵协同评价的城市轨道交通车站类型划分

Fig.6 Identification of urban rail transit station types based on classification-categorization matrix coordination evaluation

表5 活力协调类城市轨道交通车站分级-分类类型与指标水平

Tab.5 Classification-categorization types and indicator levels of vitality-coordinated urban rail transit stations

车站	分级-分类类型	NPW 平均值	城市活力指数
东大桥	等级1-压力型	0.73	0.71
十里河	等级1-节点失衡型	0.67	0.71
牡丹园	等级1-平衡型	0.56	0.72
新宫	等级1-平衡型	0.45	0.59
五道口	等级1-平衡型	0.51	0.61

活力协同效应不足。一方面是因为尽管交通基础设施建设为城市带来了新的连接和可达性，但如果没有与之相匹配的城市活动和土地利用规划，交通基础设施难以充分发挥其

潜力；另一方面也表明部分城市轨道交通车站现有交通系统过于注重机动车需求而忽视了行人和骑行者需求，从而导致城市活力不足。这整体上反映出31个城市轨道交通车站建设还处于初期阶段，交通基础设施尚未建设完全，站域用地功能也较为欠缺；而TOD发展水平可以较为有力地带动站域城市活力，在一定程度上印证了这些城市轨道交通车站的发展潜力。

表6 活力引领类城市轨道交通车站分级-分类类型与指标水平

Tab.6 Classification-categorization types and indicator levels of vitality-leading urban rail transit stations

车站	分级-分类类型	NPW 平均值	城市活力指数
丽泽商务区	等级1-平衡型-低步行性	0.37	0.63
金安桥	等级2-平衡型-低步行性	0.45	0.43
荣昌东街	等级2-平衡型-低步行性	0.40	0.41
回龙观东大街	等级2-平衡型-低步行性	0.35	0.53
高楼金	等级2-发展型-低步行性	0.25	0.50

表7 活力培育类城市轨道交通车站分级-分类类型与指标水平

Tab.7 Classification-categorization types and indicator levels of vitality-cultivating urban rail transit stations

车站	分级-分类类型	NPW 平均值	城市活力指数
次渠	等级3-从属型-低步行性	0.22	0.29
沙河高教园	等级3-从属型-低步行性	0.19	0.29
新首钢	等级3-发展型-低步行性	0.26	0.36
万盛东	等级3-发展型-低步行性	0.24	0.22
花庄	等级3-发展型-低步行性	0.22	0.37
次渠北	等级3-发展型-低步行性	0.28	0.29
同济南路	等级3-发展型-低步行性	0.25	0.31
北神树	等级3-发展型-低步行性	0.29	0.32
良乡大学城	等级3-发展型-低步行性	0.24	0.34
生命科学园	等级3-发展型-低步行性	0.26	0.33
榆树庄	等级3-发展型-低步行性	0.32	0.34
万盛西	等级4-从属型-低步行性	0.18	0.12
大兴新城	等级4-从属型-低步行性	0.16	0.17
嘉会湖	等级4-从属型-低步行性	0.07	0.15
群芳	等级4-发展型-低步行性	0.22	0.14
良乡南关	等级4-发展型-低步行性	0.26	0.21
霍营	等级4-平衡型-低步行性	0.36	0.17

表8 活力缺失类城市轨道交通车站分级-分类类型与指标水平

Tab.8 Classification-categorization types and indicator levels of vitality-lacking urban rail transit stations

车站	分级-分类类型	NPW 平均值	城市活力指数
六道口	等级3-平衡型	0.48	0.32
丰台南路	等级3-平衡型	0.45	0.38
景风门	等级3-平衡型	0.51	0.29
草桥	等级3-平衡型	0.46	0.37

5 总结与讨论

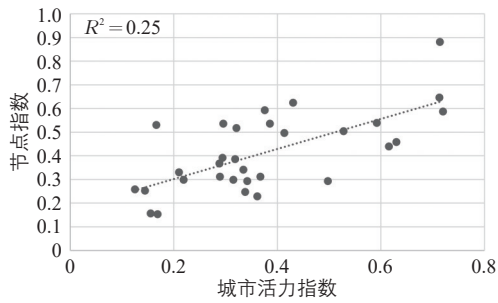
本文从微观与宏观协同视角对北京市31个城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力的协同性进行评价。主要结论如下：

1) 城市轨道交通车站的TOD发展水平和城市活力呈现明显的核心-边缘结构，但是部分线路末端处于外围地区的城市轨道交通车站也具有较高的TOD发展水平和城市活力，这表明了这些局部区域未来可能成为引领城市空间结构发展的重要节点。

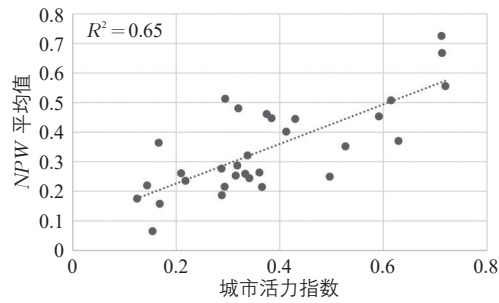
2) 分级-分类矩阵协同评价结果显示，轨道微中心之间存在明显的协同性水平差异。活力协调类城市轨道交通车站通常具有良好的交通服务、高效的土地利用和强大的城市活力；相反，活力缺失类与活力引领类城市轨道交通车站呈现出TOD发展水平与城市活力之间的不匹配特征，需要针对性地规划和改进；活力培育类城市轨道交通车站需要加强规划引导，提高车站可达性和便利性。

3) 城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力呈现明显的正相关关系，但是节点指数与城市活力的相关性较弱，这表明交通供给对城市活力的协同效应不足和交通供给量对城市活力的刺激力度不足。

总体来说，在未来城市规划和发展中应充分考虑城市轨道交通车站TOD发展水平和城市活力的协同关系，通过制定科学、合理的政策措施改善和提升城市活力。宏观方面，根据城市活力水平促进城市轨道交通车站精细化发展，打造差异化车站组群，构建围绕城市轨道交通车站的城市功能组团，以优化城市空间结构。微观方面，以TOD发展水平与城市活力协同状态为依据，通过优化步行网络和设施可达性健全非机动车交通系统、强化城市轨道交通车站多元功能、优化公共服务等，提高城市轨道交通车站整体协同水平，实现城市交通和城市发展的良性循环。



a 车站节点指数与城市活力指数



b NPW 平均值与城市活力指数

图7 城市轨道交通车站TOD发展水平与城市活力相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between TOD development levels and urban vitality at urban rail transit stations

参考文献:

References:

[1] 黎淑翎, 胡曼莹. 公交导向发展的量化评价体系及其应用[C]//中国城市规划学会城市交通规划学术委员会. 协同发展与交通实践: 2015年中国城市交通规划年会暨第28次学术研讨会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 1-14.

[2] REUSSER D E, LOUKOPOULOS P, STAUFACHER M, et al. Classifying railway stations for sustainable transitions—balancing node and place functions[J]. *Journal of transport geography*, 2008, 16(3): 191-202.

[3] MONAJEM S, NOSRATIAN F E. The evaluation of the spatial integration of station areas via the node place model; an application to subway station areas in Tehran[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2015, 40: 14-27.

[4] HIGGINS C D, KANAROGLOU P S. Forty years of modelling rapid transit's land value uplift in North America: moving beyond the tip of the iceberg[J]. *Transport reviews*, 2016, 36(5): 610-634.

[5] CERVERO R, KOCKELMAN K. Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 1997, 2(3): 199-219.

[6] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a meta-analysis[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 265-294.

[7] VALE D S. Transit-Oriented Development, integration of land use and transport, and pedestrian accessibility: combining node-place model with pedestrian shed ratio to evaluate and classify station areas in Lisbon[J]. *Journal of transport geography*, 2015, 45: 70-80.

[8] LYU G, BERTOLINI L, PFEFFER K. Devel-

oping a TOD typology for Beijing metro station areas[J]. *Journal of transport geography*, 2016, 55: 40-50.

[9] BERTOLINI L. Spatial development patterns and public transport: the application of an analytical model in the Netherlands[J]. *Planning practice and research*, 1999, 14(2): 199-210.

[10] 卢桂伊, 徐涛. 非中心城市高铁可达性与站区空间发展不协调性: 基于“节点—场所”模型的评估[J]. *上海城市规划*, 2023(5): 107-112.

[11] ZADEH A S M, RAJABI M A. Analyzing the effect of the street network configuration on the efficiency of an urban transportation system[J]. *Cities*, 2013, 31: 285-297.

[12] ZHONG C, ARISONA S M, HUANG X, et al. Detecting the dynamics of urban structure through spatial network analysis[J]. *International journal of geographical information science*, 2014, 28(11): 2178-2199.

[13] CASET F, VALE D S, VIANA C M. Measuring the accessibility of railway stations in the Brussels regional express network: a node-place modeling approach[J]. *Networks and spatial economics*, 2018, 18: 495-530.

[14] CHANG J P, CHEN Z S, WANG Z J, et al. Assessing spatial synergy between integrated urban rail transit system and urban form: a BULI-based MCLSGA model with the wisdom of crowds[J]. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 2022, 31(2): 434-448.

[15] 苏世亮, 赵冲, 李伯钊, 等. 公共交通导向发展的研究进展与展望[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(2): 175-191. SU S L, ZHAO C, LI B Z, et al. Transit Oriented Development: a review[J]. *Geomatics and information science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 175-191.

[16] CERVERO R, SARMIENTO O L, JACOBY

- E, 等. 建成环境对步行和自行车出行的影响: 以波哥大为例[J]. 耿雪, 译. 城市交通, 2016, 14(5): 83-96.
- CERVERO R, SARMIENTO O L, JACOBY E, et al. Influences of built environments on walking and cycling: lessons from Bogotá [J]. GENG X, translated. Urban transport of China, 2016, 14(5): 83-96.
- [17] FORSYTH A, SOUTHWORTH M. Cities afoot-pedestrians, walkability and urban design[J]. Journal of urban design, 2008, 13 (1): 1-3.
- [18] 聂煊城, 陈奕言, 陈箐. 建成环境可步行性研究及测度发展综述[J]. 南方建筑, 2022(4): 88-98.
- NIE X C, CHEN Y Y, CHEN Z. Research review of the walkability and measurement development of built environment[J]. South architecture, 2022(4): 88-98.
- [19] FORSYTH A, SOUTHWORTH M. Cities afoot-pedestrians, walkability and urban design[J]. Journal of urban design, 2008, 13 (1): 1-3.
- [20] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a synthesis[J]. Transportation research record, 2001, 1780(1): 87-114.
- [21] 张程远, 张淦, 周海瑶. 基于多元大数据的城市活力空间分析与影响机制研究: 以杭州中心城区为例[J]. 建筑与文化, 2017 (9): 183-187.
- ZHANG C Y, ZHANG G, ZHOU H Y. The analysis and influence mechanism research of urban vigorous space based on multiple big data: a case study on the partial area of central Hangzhou[J]. Architecture & culture, 2017(9): 183-187.
- [22] LIU S, ZHANG L, LONG Y, et al. A new urban vitality analysis and evaluation framework based on human activity modeling using multi-source big data[J]. ISPRS international journal of geo- information, 2020, 9 (11): 617.
- [23] VALE D S, VIANa C M, PEREIRA M. The extended node- place model at the local scale: evaluating the integration of land use and transport for Lisbon's subway network [J]. Journal of transport geography, 2018, 69: 282-293.
- [24] WU T, ZHOU Y. Measuring the accessibility of metro stations in Tianjin: an origin-destination approach[J]. Journal of Asian architecture and building engineering, 2023, 22 (2): 693-704.
- [25] 周垠, 龙瀛. 街道步行指数的大规模评价: 方法改进及其成都应用[J]. 上海城市规划, 2017(1): 88-93.
- ZHOU Y, LONG Y. Large-scale evaluation for street walkability: methodological improvements and the empirical application in Chengdu[J]. Shanghai urban planning review, 2017(1): 88-93.
- [26] SHI Y, ZHENG J, PEI X. Measurement method and influencing mechanism of urban subdistrict vitality in Shanghai based on multisource data[J]. Remote sensing, 2023, 15 (4): 932.
- [27] CHEN T, HUI E C M, WU J, et al. Identifying urban spatial structure and urban vibrancy in highly dense cities using georeferenced social media data[J]. Habitat international, 2019, 89: 102005.
- [28] 宋小冬, 陶颖, 潘洁雯, 等. 城市街道网络分析方法比较研究: 以 Space Syntax、sDNA 和 UNA 为例[J]. 城市规划学刊, 2020, 256(2): 19-24.
- SONG X D, TAO Y, PAN J W, et al. A comparison of analytical methods for urban street network: taking Space Syntax, sDNA and UNA as examples[J]. Urban planning forum, 2020, 256(2): 19-24.
- [29] SU S, PI J, XIE H, et al. Community deprivation, walkability, and public health: highlighting the social inequalities in land use planning for health promotion[J]. Land use policy, 2017(67): 315-326.
- [30] DORMANN C F, ELITH J, BACHER S, et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance[J]. Ecography, 2013, 36 (1): 27-46.
- [31] 路羨乔, 王晶, 张政, 等. 基于扩展节点-场所模型的北京轨道微中心地铁站点评价与分类[J]. 科技导报, 2023, 41(24): 41-51.
- LU X Q, WANG J, ZHANG Z, et al. Evaluation and classification of Beijing rail micro-center subway stations based on extended node-place model[J]. Science & technology review, 2023, 41(24): 41-51.