文章编号：0253-374X(2025)09-1433-11

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24096

轨道出行质量对城郊轨道站客流吸引力的影响

吴娇蓉[1,2]，胡雨辰[1]，邓泳淇[1]，田子立[1]

（1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室，上海 201804；2. 同济大学 城市交通研究院，上海 200092）

摘要：采用轨道站每日进出站客流量和轨道站域人群选择轨道出行的比例共同表征轨道站客流吸引力。为探究轨道站点客流吸引力的影响因素，从出行链角度提出“门到站＋站到门”和“站到站”的轨道出行质量测度方法。以上海主城区和郊区为例，分别以轨道站客流量和站域人群的轨道出行比例为因变量，建立多尺度地理加权回归(MGWR)模型，分析轨道出行质量对轨道站点客流吸引力的影响。回归结果表明，主城区站点客流受“门到站＋站到门”出行质量的影响较大；郊区站点客流量主要受站域建成环境和“站到站”出行质量的影响，尤其是小汽车与轨道“站到站”的出行时间比；郊区人群的轨道出行比例主要受用地功能混合度和距市中心距离的影响，部分偏远站点受轨道出行质量的影响较大。

关键词：轨道交通；轨道出行质量；轨道站点客流吸引力；多尺度地理加权回归

中图分类号：U293　　**文献标志码**：A

Effect of Rail Trip Quality on Passenger Attraction of Urban and Suburban Rail Stations

WU Jiaorong[1,2], *HU Yuchen*[1], *DENG Yongqi*[1], *TIAN Zili*[1]

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Urban Mobility Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, we use a combination of the ridership of rail stations and the proportion of rail trips to characterize the passenger attraction of rail stations. In order to investigate the factors influencing the passenger attraction of rail stations, the “door-to-station + station-to-door” and “station-to-station” rail trip quality measurement method is proposed, from the perspective of the trip chain. Taking the urban and suburban areas of Shanghai as an example, a multi-scale geographically weighted regression (MGWR) model of the factors influencing the passenger attraction of rail stations is built, with the ridership of rail stations and the proportion of rail trips as dependent variables, respectively. The regression results show that the ridership in urban stations is strongly influenced by the quality of “door-to-station + station-to-door” trips. And the ridership in suburban stations is mainly influenced by built environment and the quality of “station-to-station” trips, especially the ratio of travel time between car and rail. The proportion of rail trips in suburban people is primarily influenced by the functional mix of the site and the distance from the city center, and some remote sites are also heavily influenced by the rail trip quality.

Keywords: rail transport; rail trip quality; passenger attraction of rail stations; multi-scale geographically weighted regression

国内超大城市的轨道建设正由基本网络转向加密网络，郊区市域铁路、快轨成为发展重点。然而，随着轨网里程的增加，客流增速放缓(如上海2017—2019年轨网里程增长约6%，客流增长仅约4%)。尽管广泛应用以公共交通为导向的开发(transit-oriented development，TOD)理念，部分站点仍面临客流吸引力不足的问题，表现为站域出行总量或轨道出行比例偏低[1]。在站域环境已建成的情况下，提升站点客流吸引力尤为迫切。现有研究较少同时关注站域出行总量与进出站客流的机制差异及两者组合关系，也较少从轨道出行全过程的出行质量(服务水平与乘客体验)角度进行量化解析。

本文以轨道站日进出站客流量与站域人群选择轨道出行的比例共同表征客流吸引力，并引入轨道站域出行质量指标。基于上海351个轨道站点数据，建立多尺度地理加权回归(MGWR)模型，研究出行质量对主城区与郊区站点客流吸引力的差异化

收稿日期：2024-03-25
基金项目：国家自然科学基金(52072263)；中央高校基本科研业务费专项资金
第一作者：吴娇蓉，教授，工学博士，主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail：wjrshtj@163.com

论文拓展介绍

影响,解析郊区出行质量改善的潜力,为提升客流吸引力及郊区站域更新开发提供理论支撑。

1 相关文献综述

1.1 出行质量研究综述

出行质量指乘客对一次完整出行链中所有交通环节服务满意程度的综合评价,涵盖公共交通的客观服务水平和乘客的主观体验[2-3]。已有研究从公共交通服务质量、TOD发展和出行链角度提出了多种测度指标[2-12],但各指标体系相对独立,缺乏能够精细评估单个轨道站点服务水平及乘客实际出行体验的整合体系。公共交通服务质量指标通常区分物理层面(速度、时间、发车频率、运能等)和感知层面(舒适、美观、安全等)[2-9],但较少结合具体人群的实际出行评估其主观感受,且评估对象多为整个公共交通系统或线路[6-7],难以量化网络中不同轨道站点间的出行质量差异。TOD评价标准虽可应用于站点评估,但主要关注站外建成环境的密度、多样性和设计,对站内外设施的服务水平考量不足。出行链角度的研究[11-12]更关注乘客主观感受,多以问卷调查为主,尚未形成完善的量化指标体系。

1.2 轨道站点客流吸引力研究综述

现有关于轨道站点客流吸引力影响机理的研究主要聚焦于进出站客流量,较少关注站域人群的轨道出行比例,也普遍忽视了轨道出行质量的作用[1,13-16]。研究表明,站域建成环境(通常基于TOD“5D”设计原则的客观数据)和人群社会经济属性(多为问卷调查获取的主观数据)是影响客流量的显著因素。部分研究结果表明,公共交通出行质量对乘客满意度和客流量有积极影响,但缺乏中国城市的定量实证证据[17-20]。综上,现有研究在自变量(缺乏精细的出行质量指标)和因变量(多局限于客流量)选择上存在不足。本文基于出行链视角提出轨道站域出行质量测度指标,分析其对站点客流量和站域人群轨道出行比例的影响,旨在丰富客流吸引力机理,并为站点服务水平评估与改善提供指标参考。

2 轨道站点客流吸引力概念及空间异质性实证研究

2.1 轨道站点客流吸引力概念

轨道站点是否有客流吸引力的判断条件为:一方面,轨道站的每日进出站客流量能直观反映客流吸引力的大小,该数值与建成区环境、轨道站服务水平均有关[1,13-16];另一方面,关注站点附近出行人群中有多少比例转化为实际轨道出行客流[21-22],用轨道站进出站客流量与站域总出行量之比进行描述,该比例涉及站域总出行量的数据收集,可采用手机信令数据进行统计[23-24],站域总出行量与TOD“5D”设计原则下的建成区环境密切相关。

2.2 研究区域及数据来源

将上海市轨道站点作为研究对象,轨道站点为2019年8月前正式开通并投入运营的351个轨道站点,共涉及16条地铁线路和1条市域铁路(金山铁路)。上海可分为主城区和郊区,郊区设有五大新城,如图1所示。

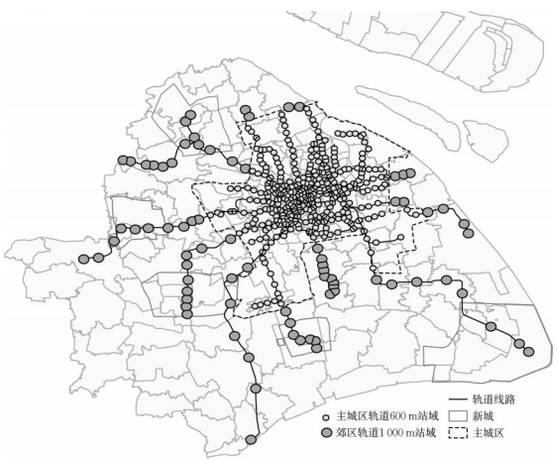


图1 轨道交通站域划分

Fig.1 Rail station area classification

所用数据包括:①2019年9月13日上海市轨道站日进出站客流数据,达1 204万人次;②2019年9月连续30日的上海联通手机信令起讫点(origin-destination,OD)数据,对原始数据进行清洗,剔除异常定位、缺失数据,采用停留时长阈值法提取驻留-出行数据[24],再计算联通手机用户占所在区县常住人口比例,对OD数据进行扩样,最终得到出行起点或终点在轨道站域内的日出行量,达2 309万次;③2019年上海人口、岗位、上海轨道站点和公交线路shp文件等基本规划资料,地图数据来自OpenStreetMap,人口数据来自LandScan,岗位数据通过控制性详细规划图、各区县统计年鉴中的就业人数等估算;④高德地图应用程序编程接口(application programming interface,API)爬取的上海市2019年出行距离、公共交通出行时间、兴趣点(point of interest,POI)等数据;⑤2019年实地调研获取的站内外基础设施数据。

计算各项指标之前需要划定轨道站域范围，轨道站域通常指轨道站外接驳客流覆盖区域，参考已有方法[1,25-26]，轨道站域通常是以站点为中心、以一定距离为半径的圆形区域，并结合泰森多边形切割为互不重叠的范围。Liu等[25]认为上海轨道站域采用600 m半径范围能够更好地解释机器学习模型下的客流影响机理。考虑到郊区轨道线网密度较低、站点吸引乘客的范围相对更大，部分上海实证研究[1,26]则对郊区轨道站域采用1 000 m的半径。因此，本文针对上海主城区和郊区分别选择600 m和1 000 m的半径确定站域范围，如图1所示。

2.3　空间异质性分析

同时考虑轨道进出站客流量和站域人群的轨道出行比例2个指标，轨道站点客流吸引力有4种情况：①进出站客流量大、轨道出行比例高；②进出站客流量大、轨道出行比例低；③进出站客流量小、轨道出行比例高；④进出站客流量小、轨道出行比例低。笔者认为，情况①的轨道站域客流吸引力大，情况②和③有客流吸引力提升的潜力，情况④为客流吸引力小，需重点关注。

鉴于缺少各轨道站域人群的出行调查数据，结合上海全市轨道站点工作日进出站客流量和手机信令数据，提取各轨道站域的全部出行量，以轨道进出站客流量和站域人群总出行量的比例作为该站域人群的轨道出行比例。从图2、3可以看出，轨道站点客流量和轨道出行比例均高于均值的站点占比约12%，属于情况①，如主城片区虹桥区域站点；情况②站点占比约23%，多为主城区市中心区域、郊区地铁8和9号线沿线轨道站点，客流量较高且站域出行总量更大，轨道出行比例较低；情况③站点占比约17%，为郊区部分线路沿线（地铁11和16号线）、线路起始站点（浦东国际机场、美兰湖），站域出行总量不大但轨道站点客流量较大，轨道出行比例较高；情况④站点占比约48%，为偏远郊区站点（地铁5和17号线）。由于上海轨道站点客流量和站域人群的轨道出行比例都在空间上呈现明显差异，因此轨道站点的客流吸引力应综合考虑以上2个指标，探究影响客流吸引力的相关因素。

图2　上海轨道站点客流量分布

Fig.2　Distribution of ridership in Shanghai rail stations

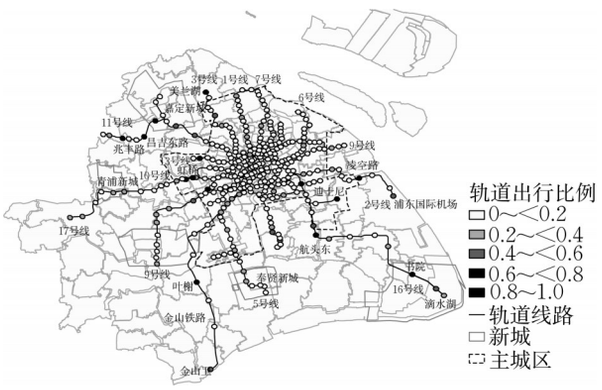


图3　上海轨道站域人群轨道出行比例分布

Fig.3　Distribution of the proportion of rail trips in Shanghai station area people

3　轨道站域出行质量测度

3.1　出行质量指标体系构建

出行质量指乘客对出行全过程的体验，轨道出行质量聚焦于出行链中与轨道相关的环节。“门到站”指乘客结束上一段非轨道的交通方式出行，从公交站或停车场步行至轨道站的进站过程；“站到站”指乘客乘坐轨道在站点间移动的过程；“站到门”指乘客下车后步行离开轨道站至其他交通站（公交站、停车场）的过程；与轨道服务无关的换乘前后环节暂不考虑。构建“门到站＋站到门”和“站到站”2个维度的出行质量指标体系，如图4所示。综合站域人群实际出行数据与站点设施服务水平数据，精细化测度各轨道站点的出行质量。

（1）“门到站＋站到门”指标。关注步行获取轨道服务的便利性（步行到达候车厅时间、站内不想换乘时间、轨道发车频率和站内设施保障）及与其他交通方式的换乘便利性（站外换乘步行时间）。该维度与建成环境相关，相关研究较多。对相关研究指标进行适当改进，更强调设施供给质量而非数量，并增强对站内设施服务水平的考量，丰富了TOD“5D”设计原则的“设计”和“交通换乘距离”原则。

（2）“站到站”指标。关注人群实际出行的直达

性与便利性(小汽车与轨道的出行时间比、轨道出行换乘次数和非直线系数)。受数据获取限制,现有研究较少且多依赖于抽样或假设出行数据,难以反映不同站域实际出行差异。利用手机信令数据筛选站域人群主流向(大流量OD对)的实际出行进行测度,弥补了现有评估体系的不足。

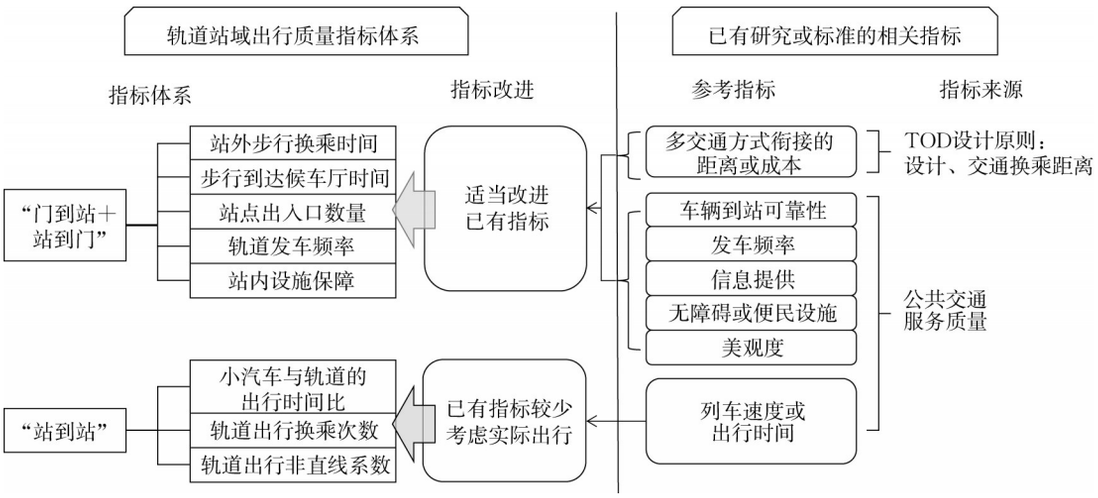


图4 轨道站域出行质量指标体系

Fig.4 Trip quality indicator system in the rail station area

3.2 轨道出行质量指标计算

3.2.1 “门到站+站到门”出行质量指标

基于已有公共交通服务质量、TOD评估等规范标准和相关文献[1-12],提出5个“门到站+站到门”指标,重点研究“门到站+站到门”出行过程的服务质量,如图5所示。采用站外步行换乘时间和步行到达候车厅时间直接衡量“门到站+站到门”过程的快捷性;采用站点出入口数量、轨道发车频率和站内设施保障描述轨道站点各类设施的服务水平,反映“门到站+站到门”过程的便利性。

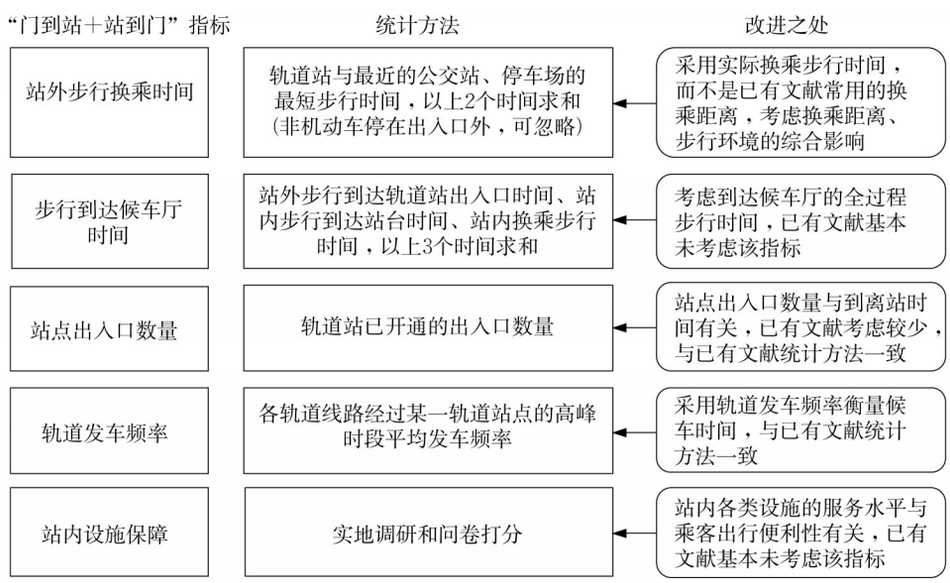


图5 “门到站+站到门”指标统计方法

Fig.5 Statistical methodology for the “door to station & station to door” indicator

站外步行换乘时间、站点出入口数量、轨道发车频率可通过电子地图平台爬取,步行到达候车厅时间和站内设施保障通过实地调研获取。其中,站内设施保障的调研问卷参考《城市轨道交通客运服务规范》(GB/T 22486—2022)、已有文献中公共交通服务质量属性总结[2-9],包括站内服务设施的供给保障、站内环境条件、到发列车的运行稳定性、标志标识的清晰与准确性、票务和信息服务系统的完备性。设计如表1所示

表 1　站内设施保障调研问卷

Tab.1　Station facilities survey questionnaire

评分角度	评分细则
车站环境条件	卫生、照明、温度、噪声、通风等条件适宜
售票机	存在现金和线上支付等多种支付方式。售票机多于3台。操作便捷，运行正常
储值卡充值机	存在储值卡充值机，包括充值、办卡退卡等多种业务。操作便捷，运行正常
自动扶梯	所有出入口都至少有一个上行方向的扶梯
垂直电梯	所有候车站台都至少有一个垂直电梯，且步行可达距离小于30 m
进出站闸机	进出站闸机感应灵敏（车票、手机二维码、近场通信（NFC）等多种方式均感应灵敏）。开关的反应时间快，持续打开的时间适宜（乘客能够正常通过，尤其是带行李和大件物品的乘客）
标志标识	换乘指引、列车到发站、设施名称等标志标识清晰明确，容易看到
信息服务	包含广播、视频设备、网络等多种方式的信息提供途径。列车到发站信息、开关门、延误等信息实时播放或显示在视频界面
通信信号	站内和车内全程信号良好，不存在信号较弱（加载图片或网页较慢）或无信号情况
辅助服务设施	车站内有卫生间、自动售卖机、商铺、医疗急救物品、婴儿车或雨伞租赁等

的调研问卷并进行实地调研主观评分，共10个维度，某一个维度的要求全部满足即可得1分，满分10分。

3.2.2　“站到站”出行质量指标

基于已有文献调查所得的乘客乘坐轨道出行所考虑的因素[12]，提出3个“站到站”指标，重点研究“站到站”出行过程的服务质量，如图6所示。采用小汽车与轨道的出行时间比衡量轨道出行的快捷性；采用轨道出行的换乘次数和非直线系数衡量轨道出行的直达性与便捷性。

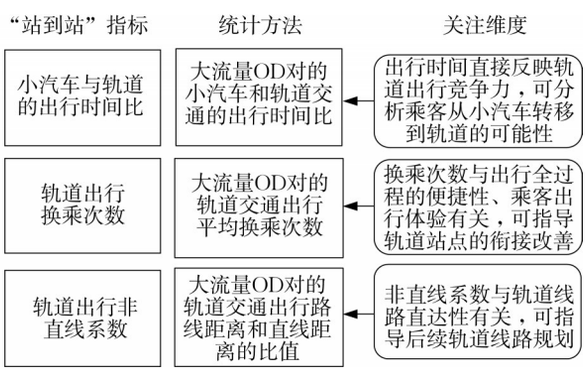


图 6　“站到站”指标统计方法

Fig.6　Statistical methodology for the “station to station” indicator

具体方法如下：①基于手机信令数据，识别OD两端至少有一端在轨道站域内的出行，视作该站域人群的出行；②筛选各站域流量排名前30的大流量OD对，将其O、D点简化至最近地铁站；③通过高德地图API爬取相应OD对间小汽车与轨道交通的“站到站”出行路线。以嘉定新城站为例（见图7），其人群主要出行集中于本站附近及沿地铁11号线向市中心方向。统计结果显示：上海全部轨道站域大流量OD对（前30名）的小汽车与轨道的出行时间比均值为0.77（即小汽车节省23%时间）；轨道“站到站”出行平均换乘次数为1.24，非直线系数为1.45。相较于《2019年上海综合交通发展年度报告》中的全市轨道换乘率1.75，站域主流向的出行换乘更少、路线更直达。

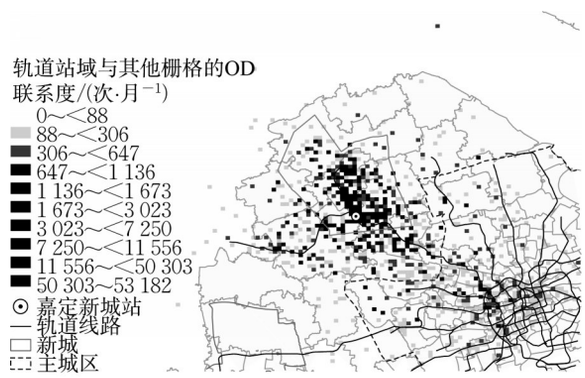


图 7　上海嘉定新城站与其他栅格的OD联系度

Fig.7　Jiading Xincheng Station OD connection with other grids

各指标的数量级相差较大，为便于后续分析，对原始调查数据进行归一化处理。采用线性函数转换，使数据值归一化至区间[0,1]。归一化后，站外步行换乘时间、步行到达候车厅时间、轨道出行换乘次数和非直线系数这4个指标的数值越小，说明该指标越好；站点出入口数量、轨道发车频率、站内设施保障和小汽车与轨道的出行时间比这4个指标则是数值越大，说明该指标越好。

4　轨道出行质量对轨道站点客流吸引力的影响分析

4.1　研究方法

地理加权回归（GWR）是一种基于空间变化关系建模的局部线性回归方法，与传统线性回归方法相比，能够在研究区域的每一处产生不同的描述局部关系的回归模型，可更好地解释变量的局部空间关系与空间异质性。其中，多尺度地理加权回归

(MGWR)基于经典GWR模型改进,将固定带宽的假设放宽为灵活带宽,能够体现各因素对轨道客流在作用尺度上的差异。模型可以表示为

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{j=1}^{k}\beta_{bwj}(u_i,v_i)x_{ij}+\varepsilon_i \quad (1)$$

式中:x_{ij}为第i个空间位置(样本点)的第j个解释变量的观测值;k为解释变量总数;y_i为位置i处的被解释变量的观测值;(u_i,v_i)为位置i处的中心坐标;$\beta_{bwj}(u_i,v_i)$为位置i处第j个变量的回归系数;$\beta_0(u_i,v_i)$和ε_i分别为模型在i处的截距和误差项。

使用标准化的变量建模,采用常用的高斯函数作为核函数建立GWR模型。接着,采用更正的赤池信息准则(AICc)方法寻找最优带宽,以优化GWR模型的固定带宽。AICc方法以GWR模型的估计结果作为初始估计,不断迭代回归系数估计值与真实值之差,直到差值小于1×10^{-5}为止,从而确定各变量的带宽,最终得到MGWR模型结果[27]。建模软件为美国亚利桑那州立大学空间分析研究中心(https://sgsup.asu.edu/SPARC)开发的MGWR2.2,该软件可自由选择核函数和寻找带宽方法准则,地图数据处理所用软件为Arcgis10.8。

4.2 出行质量对站点客流吸引力的贡献性

为探究出行质量指标对轨道站点客流吸引力的影响,分别构建仅包含常用客流影响因素的MGWR模型以及包含常用客流影响因素和出行质量的MGWR模型,对比轨道出行质量对于模型的贡献。

基于TOD"5D"设计原则,选取5个已有文献的常用客流影响因素(见表2),参考3.2节对数据进行归一化处理。

表2 常用的轨道客流影响因素

Tab.2 Common factors affecting rail station ridership

TOD"5D"设计原则	量化指标	统计方法
密度(density)	站域人口岗位[13-16]	轨道站域范围内的人口岗位密度
多样性(diversity)	用地功能混合程度[15-16]	站域内所有兴趣点(POI)类型的混合熵
设计(design)	站域内道路密度[13-14]	站域内所有道路的长度除以站域面积
交通换乘距离(distance to transit)	站域内公交线路密度[1,13,15]	站域内所有经过的公交线路数除以站域面积
目的地可达性(destination accessibility)	站点距市中心距离[1,15]	站点距离上海市中心(人民广场)的最短公交出行时间

构建MGWR模型前,先用莫兰指数(Moran's I)检验各变量的空间自相关性[28]。经检验发现,常用客流影响因素和出行质量指标显著性均小于0.05,且因变量轨道站点客流量和站域人群轨道出行比例的Moran's I分别为0.181(p=0.000)和0.131(p=0.000),表明轨道客流吸引力大小存在明显的空间集聚正相关,也证明了建立地理加权回归模型的必要性。

分别以轨道站点客流量、站域人群的轨道出行比例为因变量,建立仅包含已有因素、包含已有因素和出行质量指标作为自变量的MGWR模型,模型拟合结果见表3。可以看到,加入出行质量指标后,轨道站点客流量模型的调整R^2从0.300增长至0.731,站域人群的轨道出行比例模型的调整R^2从0.286增长至0.357,AICc值也更小,认为出行质量指标对轨道站点客流吸引力有一定影响,且对于轨道站点客流量影响更显著。

表3 加入出行质量指标前后的模型拟合优度

Tab.3 Model goodness-of-fit before and after adding trip quality indicators

因变量	MGWR模型	AICc值	调整R^2
轨道站点客流量	已有因素	881.528	0.300
	已有因素+出行质量	654.515	0.731
站域人群的轨道出行比例	已有因素	946.372	0.286
	已有因素+出行质量	908.395	0.357

此外,以常用客流影响因素和出行质量指标为自变量,对比多元线性回归(MLR)、GWR、MGWR模型拟合效果,如表4所示。MGWR模型在AICc值和调整R^2方面均最好,后续将基于MGWR模型分析上海郊区和主城区轨道站点客流吸引力的差异及机理。

表4 模型拟合优度和带宽对比

Tab.4 Comparison of model goodness-of-fit and bandwidth

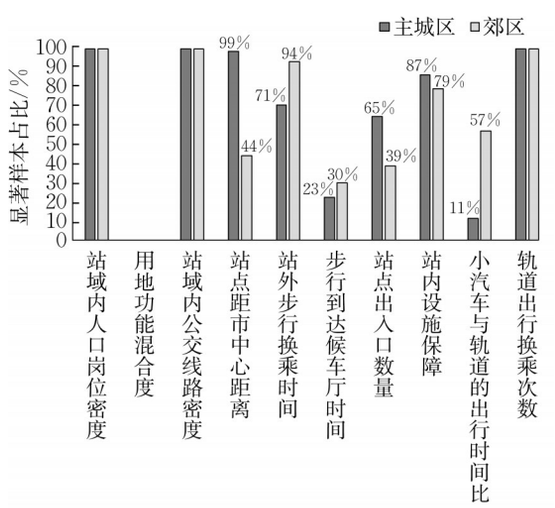
因变量	模型	AICc值	调整R^2
轨道站点客流量	MLR	763.649	0.513
	GWR	727.668	0.702
	MGWR	654.515	0.731
站域人群的轨道出行比例	MLR	946.755	0.181
	GWR	927.761	0.284
	MGWR	908.395	0.357

4.3 郊区和主城区的站点客流吸引力差异

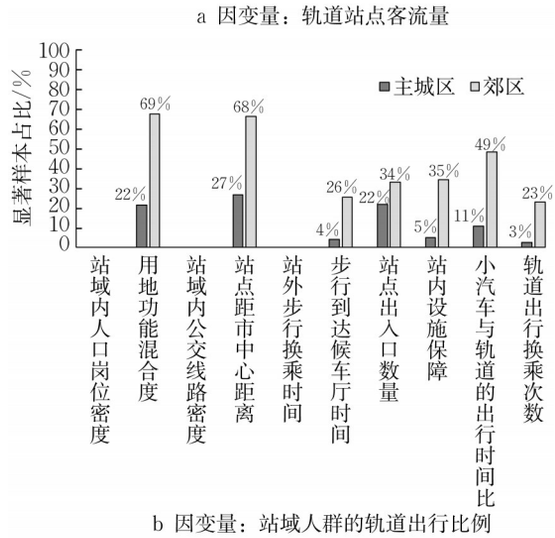
4.3.1 城郊的显著样本对比

基于包含常用客流影响因素和出行质量的MGWR模型回归结果,分析郊区和主城区的站点客

流吸引力的影响因素。将$p \leqslant 0.1$的样本记为显著，分别统计主城区和郊区的显著样本占比、显著样本回归系数均值，如图8、9所示。对轨道站点客流量的影响方面，主城区的站点出入口数量、站内设施保障的显著样本占比更高，回归系数均值更大，表明两者对客流量影响更显著。郊区的站外步行换乘时间、步行到达候车厅时间、小汽车与轨道的出行时间比的显著样本占比更高，且前2项回归系数均值更大，说明这些指标对郊区客流量影响更突出。在站域人群的轨道出行比例影响方面，郊区的显著样本占比及回归系数均值普遍高于主城区，表明模型对郊区人群轨道出行比例的解释力更强。主城区因发展成熟且出行需求多元，其轨道出行比例可能受更多未纳入因素影响。



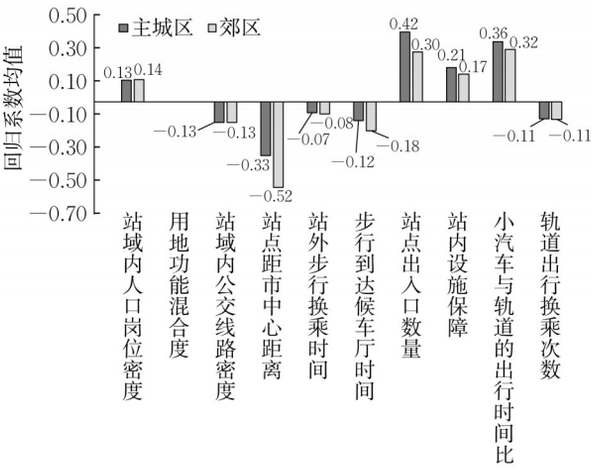
a 因变量：轨道站点客流量



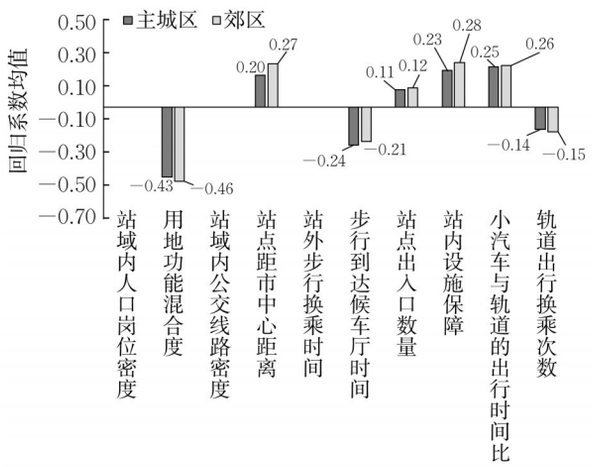
b 因变量：站域人群的轨道出行比例

图8　主城区和郊区的显著样本占比

Fig.8　Percentage of significant samples in urban and suburban areas



a 因变量：轨道站点客流量



b 因变量：站域人群的轨道出行比例

图9　主城区和郊区显著样本的回归系数均值

Fig.9　Mean values of regression coefficients for significant samples in urban and suburban areas

4.3.2　进出站客流量影响因素的空间异质性

绘制全上海轨道站点客流量和站域人群轨道出行比例的自变量回归系数的空间分布，即$p > 0.1$的样本记为不显著，只统计$p \leqslant 0.1$的显著样本的回归系数并绘图，如图10、11所示。常用TOD指标对轨道进出站客流量的影响方面，站域内人口岗位密度对全域站点客流量呈显著正效应（见图10a），且郊区效应更强，论证了郊区人口集聚对提升客流的重要性。站域内公交线路密度呈全域显著负效应（见图10b），表明过量公交可能与轨道形成竞争，降低轨道客流量。站点距市中心距离对主城西南部及郊区5、9号线站点呈局部负效应（见图10c），反映其与市中心轨道出行的紧密联系。

在“门到站＋站到门”指标影响方面，站外步行

换乘时间和步行到达候车厅时间对郊区站点客流影响更大,站点出入口数量和站内设施保障对主城区站点客流影响更大。站外步行换乘时间和步行到达候车厅时间对郊区站点(尤其是西部、南部)客流影响更大,呈显著负效应(见图10d、e),郊区轨道出行难以直达,突显改善郊区换乘便利性的必要性。步行到达候车厅时间在主城虹桥区域呈正效应(见图10e),因其重要换乘功能抵消了步行时间劣势。步行到达候车厅时间的回归系数均值略大于站外步行换乘时间,步行到达候车厅时间与地铁站构造和规模有关,已有文献考虑较少,本文结论证明了未来轨道站点的改善不仅要考虑站外换乘设施的布局,也要考虑站内步行路线的优化和良好指引。站点出入口数量及站内设施保障对主城区(尤其是市中心)站点客流影响更大,呈显著正效应(见图10f、g),提示更新老旧站点设施的重要性。

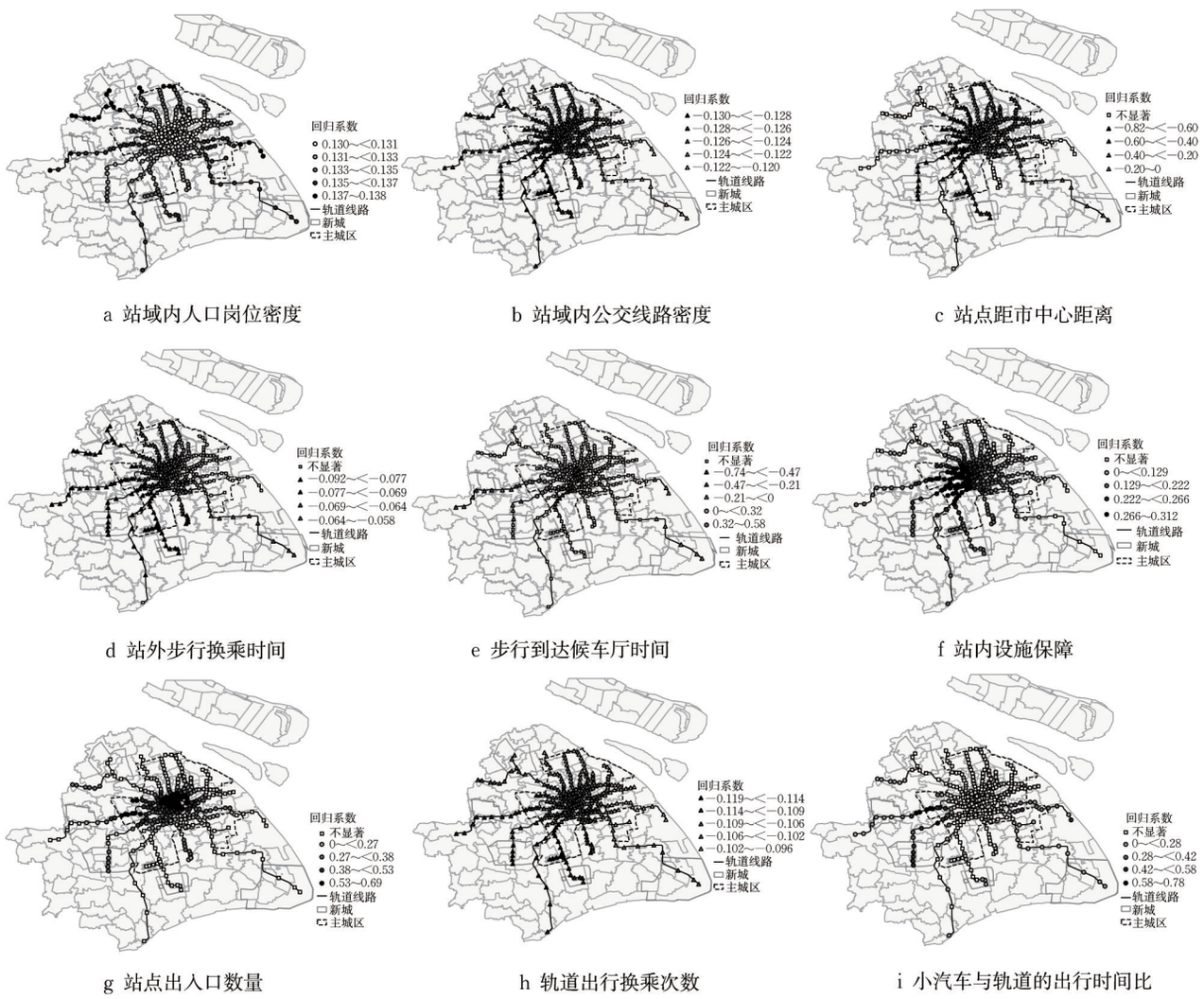


图10 轨道站点客流量的MGWR模型回归系数空间分布

Fig.10 Spatial distribution of regression coefficients of MGWR model for ridership in rail stations

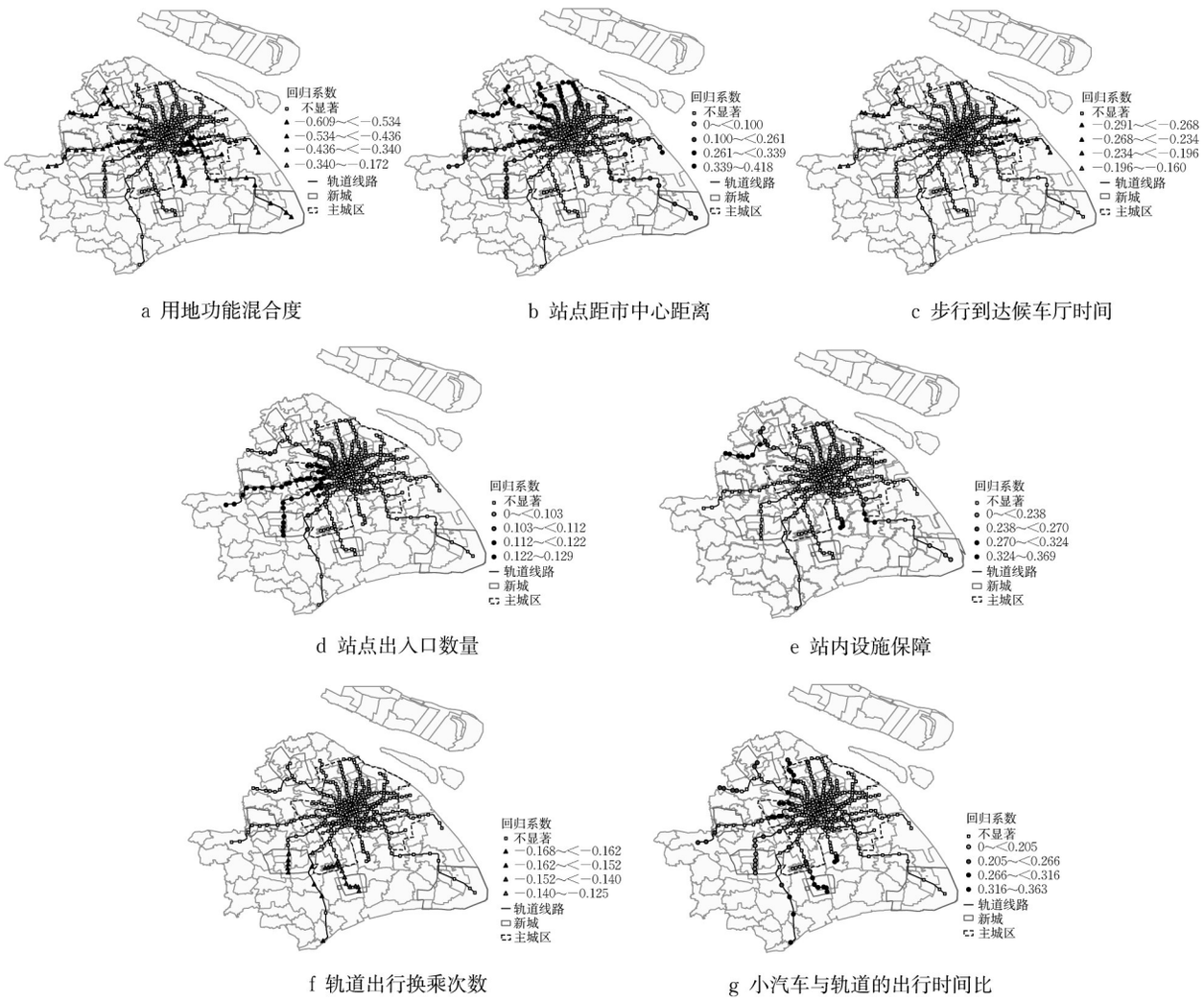
在“站到站”指标影响方面,小汽车与轨道的出行时间比对郊区站点(尤其是线路起始段)影响更大,呈显著正效应(见图10i),因郊区轨道出行时间长、选择少,促使乘客更关注时间成本对比。轨道出行换乘次数对全域站点均有显著影响(见图10h),但上海南部回归系数更大,因距离远导致换乘更多。

4.3.3 轨道出行比例影响因素的空间异质性

在常用TOD指标对轨道出行比例的影响方面,用地功能混合度对西北部、东南部站点呈显著负效应(见图11a),多样化土地开发反而削弱了人们对轨道出行的依赖。站点距市中心距离对郊区(尤其嘉定区)呈显著正效应(见图11b),因嘉定仅依赖11号线承担中长距离出行,轨道出行比例高于其他郊区。

在出行质量指标方面,步行到达候车厅时间对郊区老线起始站呈显著负效应(见图11c);站点出入口数量对主城西部及郊区9、11号线站点影响较大,

呈显著正效应（见图11d），可能高架站构造导致乘客对便捷性更敏感。站内设施保障对主城区1、7号线起始站及郊区8、11和16号线站点影响较大，呈显著正效应（见图11e），说明老旧设施需优化。轨道出行换乘次数对南部郊区站点影响更大，呈显著负效应（见图11f）；轨道与小汽车的出行时间比对西北、南部郊区站点影响更大，呈显著正效应（见图11g），远距离出行的乘客更关注“站到站”质量。



a 用地功能混合度　　b 站点距市中心距离　　c 步行到达候车厅时间

d 站点出入口数量　　e 站内设施保障

f 轨道出行换乘次数　　g 小汽车与轨道的出行时间比

图11　站域人群的轨道出行比例的MGWR模型回归系数空间分布

Fig.11　Spatial distribution of regression coefficients of MGWR model for the proportion of rail trips

5　轨道站点客流吸引力提升建议

国家《关于促进市域（郊）铁路发展的指导意见》明确要求加快市域（郊）铁路建设，完善多层次交通系统。未来市域（郊）铁路将重点布局郊区，本文针对城郊轨道站客流吸引力的差异化解析及提升建议，可为郊区站点选址和开发、主城区站点服务优化提供参考。

（1）远郊站点或轨道线路起始站。客流量低但轨道出行比例较高，应提升轨道站出行质量。例如，对于上海开通较早的2、8、11和16号线起始站点，重点优化“门到站＋站到门”出行质量，提升站内外设施服务水平，优化步行指引。对于远郊站点（如5、9号线、金山铁路），重点改善“站到站”出行质量，开行快车、减少换乘，引导人们选择轨道而不是私家车出行。

（2）靠近主城区的近郊轨道站或建成环境发展较为成熟的郊区轨道站。出行需求大、客流量高但轨道出行比例低。例如，上海郊区地铁8和9号线、浦江线站点，继续改善建成环境对客流提升影响不大，应重点改善“门到站＋站到门”出行质量，增设出入口、更新站内设施、优化站内引导。此外，对“站到

站”出行质量敏感的站点(如9号线)开行直达列车以提升时效。

(3)其他郊区轨道站。客流、出行需求及轨道出行比例均低,应优先土地开发,吸引人口岗位集聚,刺激需求。其次,改善“站到站”出行质量,规划直达快线、大站车。辅助改善“门到站+站到门”出行质量,提升换乘便捷性。

(4)城区轨道站。客流量高但轨道出行比例低。城区发展成熟,继续改善建成环境对客流提升影响不大。重点改善“门到站+站到门”质量,增设出入口、衔接商务建筑,更新站内设施。

6 结论

(1)从出行链角度提出“门到站+站到门”和“站到站”的轨道出行质量测度方法,构建融合出行质量与常规影响因素的MGWR模型。验证了TOD“5D”建成环境指标对客流的作用,并发现引入出行质量指标可显著提升模型解释力。这表明,轨道全过程出行质量对客流吸引力具有显著影响,丰富了已有轨道客流影响因素来源。

(2)从轨道站点客流量和站域人群的轨道出行比例2个角度解释轨道站客流吸引力,更好地解释城郊客流吸引力的差异化机理。主城区站点客流量更多受到“门到站+站到门”出行质量影响,尤其是站点出入口数量和站内设施保障。郊区站点客流量更多受建成环境和“站到站”出行质量影响,尤其是小汽车与轨道的出行时间比;部分远郊或线路起始站域人群对轨道的依赖性还受站内设施保障、步行到达候车厅时间、轨道出行换乘次数、小汽车与轨道的出行时间比影响。

后续研究将考虑更全面的人群主观体验、不同城市实际情况等,完善轨道出行质量指标,探究轨道站域出行质量对于不同城市、不同空间区位的轨道站点客流吸引力预测和发展变化方面的影响机理。

本研究得到上海市多网多模式轨道交通协同创新中心的“长三角城市群多模式轨道网络数字规划运营仿真平台”支持,特此感谢。

作者贡献声明:

吴娇蓉:研究设计,轨道出行质量测度方法构建,数据建模审核,论文撰写。

胡雨辰:研究设计,数据采集与处理,建模分析,论文修订。

邓泳淇:数据处理,制图。

田子立:数据处理,制图。

参考文献:

[1] 吴娇蓉, 邓泳淇, 陈彩婷. 上海郊区轨道站客流与站域出行活力匹配性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2023,51(7):1105.
WU Jiaorong, DENG Yongqi, CHEN Caiting. Study on the matching of passenger flow and station travel vitality in suburban rail stations in Shanghai [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2023,51(7):1105.

[2] Transportation Research Board. Transit capacity and quality of service manual[M]. 3 rd ed. Washington DC: Transportation Research Board, 2013.

[3] ZHAI J, WU W, YUN Y, *et al*. Travel satisfaction and rail accessibility[J]. Transportation Research, Part D: Transport and Environment, 2021, 100: 103052.

[4] REDMAN L, FRIMAN M, GAERLING T, *et al*. Quality attributes of public transport that attract car users: a research review[J].Transport Policy, 2013, 25: 119.

[5] 城市轨道交通客运服务规范: GB/T 22486—2022[S]. 北京: 全国城市客运标准化技术委员会, 2022.
Specification for passenger transport services in urban rail transit: GB/T 22486—2022 [S]. Beijing: National Urban Passenger Transportation Standardization Technical Committee, 2022.

[6] SHEN W, XIAO W, WANG X. Passenger satisfaction evaluation model for urban rail transit: a structural equation modeling based on partial least squares[J]. Transport Policy, 2016, 46: 20.

[7] 王才雪, 陈坚, 傅志妍, 等. 基于社交网络数据的城市轨道交通服务质量评价模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5):1871.
WANG Caixue, CHEN Jian, FU Zhiyan, *et al*. An evaluation model of urban rail transit service quality based on social network data[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1871.

[8] 蒋琦玮, 吴小兰, 冯芬玲, 等. 基于IPSO-XGB的城市轨道交通车站服务质量评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(4): 1097.
JIANG Qiwei, WU Xiaolan, FENG Fenling, *et al*. Service quality evaluation of urban rail transit stations based on IPSO-XGB[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(4): 1097.

[9] 赵琳娜, 王炜, 季彦婕, 等. 乘客差异化需求对公交出行满意度的影响[J]. 城市交通, 2014(4): 65.
ZHAO Linna, WANG Wei, JI Yanjie, *et al*. The impact of passenger differential demand on transit travel satisfaction[J]. City Transportation, 2014(4): 65.

[10] Institute for Transportation and Policy Development (ITPD). Transit oriented development evaluation criteria [S]. New York: ITPD, 2017.

[11] 赵琳，李斌，刘冬梅，等. 基于出行链的城市客运协同服务水平评估[J]. 公路交通科技，2022，39(S1)：167.
ZHAO Lin，LI Bin，LIU Dongmei，*et al*. Assessment of cooperative service level of urban passenger transportation based on travel chain[J]. Highway Transportation Science and Technology，2022，39(S1)：167.

[12] 刘花，潘昭宇，杜竞强，等. 基于“门到门”出行链的公共交通高效出行模式研究[C]//2016年中国城市交通规划年会论文集. 北京：中国建筑工业出版社，2016：12-23.
LIU Hua，PAN Zhaoyu，DU Jingqiang，*et al*. Research on efficient travel mode of public transportation based on “door-to-door” travel chain [C]//Proceedings of the 2016 Annual Conference on Urban Transportation Planning in China. Beijing：China Architecture & Building Press，2016：12-23.

[13] XU T，YANG H，CHEN D，*et al*. Exploring spatial variation in relationship between station level metro ridership and influencing variables[C]// 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). New York：IEEE，2019：995-1001.

[14] ZHOU Y，SHEN X，JIN S. A geographically and temporally weighted regression model to explore the spatiotemporal influence of built environment on trip distribution：a case study in Hangzhou[C]// CICTP 2019. New York：ASCE，2019：4721-4732.

[15] 马壮林，杨兴，胡大伟，等. 城市轨道交通车站客流特征影响程度分析[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2023，63(9)：1428.
MA Zhuanglin，YANG Xing，HU Dawei，*et al*. Analysis of the influence degree of passenger flow characteristics in urban rail transit stations[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)，2023，63(9)：1428.

[16] 马书红，廖国美，黄岩，等. 建成环境对交通小区地铁通勤客流的异质性影响[J/OL]. 吉林大学学报(工学版)，2024(7).[2023-12-11]. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20221236.
MA Shuhong，LIAO Guomei，HUANG Yan，*et al*. Heterogeneous effects of built environment on subway commuter flows in transit neighborhoods[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition)，2024(7). [2023-12-11]. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20221236.

[17] LAI W T，CHEN C F. Behavioral intentions of public transit passengers：the roles of service quality，perceived value，satisfaction and involvement[J]. Transport Policy，2011，18(2)：318.

[18] DE ONA J，DE ONA R，EBOLI L，*et al*. Transit passengers’ behavioural intentions：the influence of service quality and customer satisfaction [J]. Transportmetrica A：Transport Science，2016，12(5)：385.

[19] CARREL A，WAILKER J L. Understanding future mode choice intentions of transit riders as a function of past experiences with travel quality [J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research，2017，17(3)：360.

[20] 龙俊仁，周溶伟，邵源. 轨道乘客全出行链体验及服务提升策略分析[J]. 交通与运输，2019，32(S1)：132.
LONG Junren，ZHOU Rongwei，SHAO Yuan. Analysis of rail passengers’ whole travel chain experience and service improvement strategy[J]. Traffic and Transportation，2019，32(S1)：132.

[21] 李丽群. 城市轨道交通客流竞争理论与方法研究[D]. 镇江：江苏大学，2013.
LI Liqun. Research on the theory and method of passenger flow competition in urban rail transit [D]. Zhenjiang：Jiangsu University，2013.

[22] 温慧敏，朱珊，孙建平，等. 轨道新线对公共交通乘客吸引力影响因素研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(4)：282.
WEN Huimin，ZHU Shan，SUN Jianping，*et al*. Study on the factors affecting the attractiveness of new rail lines to public transportation passengers [J]. Transportation Systems Engineering and Information，2023，23(4)：282.

[23] 李井波，崔扬. 基于手机信令数据浅析天津地铁1号线客流与周边用地吸引力的关系[J]. 交通与港航，2019，6(1)：50.
LI Jingbo，CUI Yang. Analysis of the relationship between passenger flow and attractiveness of surrounding land use of Tianjin Metro Line 1 based on cell phone signaling data[J]. Transportation and Harbor Navigation，2019，6(1)：50.

[24] 高瑜堃，赵鹏军. 手机信令数据在职住空间、出行行为和交通碳排放研究中的应用进展与前景[J]. 热带地理，2024，44(5)：877.
GAO Yukun，ZHAO Pengjun. Progress and prospect of the application of cell phone signaling data in the study of work-life space，travel behavior and transportation carbon emission[J]. Tropical Geography，2024，44(5)：877.

[25] LIU Xiang，CHEN Xiaohong，TIAN Mingshu，*et al*. Effects of buffer size on associations between the built environment and metro ridership：a machine learning-based sensitive analysis[J]. Journal of Transport Geography，2023，113：103730.

[26] 潘海啸，任春洋，杨眺晕. 上海轨道交通对站点地区土地使用影响的实证研究[J]. 城市规划学刊，2007(4)：92.
PAN Haixiao，REN Chunyang，YANG Tiaoyun. An empirical study on the impact of Shanghai rail transit on land use in station areas[J]. Journal of Urban Planning，2007(4)：92.

[27] 周志凌，程先富. 基于MGWR模型的中国城市PM_(2.5)影响因素空间异质性[J]. 中国环境科学，2021，41(6)：2552.
ZHOU Zhiling，CHENG Xianfu. Spatial heterogeneity of PM_(2.5) influencing factors in Chinese cities based on the MGWR model[J]. China Environmental Science，2021，41(6)：2552.

[28] 姜莉. 建成环境影响下轨道站点客流效应分析及预测建模研究[D]. 广州：华南理工大学，2023.
JIANG Li. Analysis and predictive modeling of passenger flow effects at rail stations under the influence of built environment [D]. Guangzhou：South China University of Technology，2023.