

轨道站点地区居民出行方式结构差异及影响因素* ——基于手机信令数据的武汉实证

Travel Mode Structure and Influencing Factors in Rail Station Areas: An Empirical Study of Wuhan Based on Mobile Signaling Data

徐 涛 张云祥 XU Tao, ZHANG Yunxiang

摘 要 我国城市轨道交通建设促进居民绿色出行行为的效应和机制仍不明晰。基于手机信令数据,分析武汉市轨道站点地区居民出行方式构成空间差异及不同交通方式分担率的影响因素,探讨站点地区分类型规划调控策略,主要得出以下结论:第一,武汉市轨道交通站点地区的常规公交、轨道交通分担率与慢行分担率呈现此消彼长的态势,轨道交通与常规公交分担率呈协同变化趋势,而小汽车分担率空间差异不明显。第二,从影响要素来看,轨道站点网络中心性特征对促进人口选择公交出行、减少小汽车出行具有显著积极作用,建成环境要素对慢行分担率、轨道交通分担率影响作用呈现显著差异,小汽车出行分担率主要受人口社会经济特征影响。第三,将城市轨道交通站点地区聚类划分为3大类、8个子类型站点,出行方式构成和关键影响因素具有差异,探讨针对性规划策略以提升轨道站区绿色交通效应。

Abstract The effects and mechanisms of urban rail transit development on promoting residents' active travel behaviors remain unclear. Based on mobile phone signaling data, this study analyzes the spatial differences in travel mode structure and influencing factors of mode share rates in Wuhan's rail station areas, proposing planning strategies. The main findings are as follows. First, conventional bus and rail transit mode shares in Wuhan's station areas exhibit a competitive relationship with non-motorized transport (NMT) shares, while demonstrating synergistic trends between rail and bus modes. Together, they form the core of public transportation dominance, whereas spatial variation in private car usage remains statistically insignificant. Second, network centrality metrics of rail stations significantly promote public transport adoption and reduce car dependency. Built environment characteristics differentially influence NMT and rail transit shares, while car usage primarily correlates with socioeconomic attributes. Third, through hierarchical clustering analysis based on travel mode structure and key influencing factors, three major categories with eight subtypes of stations are identified. To enhance the traffic regulation effect of rail transit, targeted TOD planning strategies should be implemented.

关 键 词 轨道交通站点地区;出行方式结构;影响因素;手机信令数据

Key words rail station areas; travel mode structure; influencing factors; mobile signaling data

文章编号 1673-8985 (2025) 03-0118-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20250316

作者简介

徐 涛
武汉理工大学土木工程与建筑学院
副教授,硕士生导师,xutaowhu@126.com
张云祥
武汉理工大学土木工程与建筑学院
硕士研究生

0 引言

我国大城市推进轨道交通建设和站点地区公交导向发展,以期优化交通出行结构、缓解城市交通问题、促进绿色低碳发展。理论上,轨道交通能够提高站点地区时空可达性,压缩居民出行时间成本,促进站点地区交通出行结

构优化^[1]。然而,实证发现轨道交通建设并不能保证居民选择更为绿色的交通行为,在建成环境、居民交通偏好等复合影响下,站点地区交通方式构成呈现空间差异^{[2], [3][11]}。把握我国城市轨道交通站点地区居民交通方式构成时空差异与驱动要素,对于制定合理政策、促进交通

*基金项目:国家自然科学基金面上项目“城市生活服务设施驱动生活出行低碳化机理和规划调控方法研究”(编号52278077)资助。

调节效应具有启示意义。

轨道交通站点地区交通行为调节方向已积累了丰富成果。有实证研究表明,轨道交通的开通能提高站点地区居民的步行频率、公共交通分担比例、降低平均机动车行驶里程,促使小汽车出行者转向使用轨道交通;也有研究发现,轨道交通站点地区居民通勤行为中轨道交通出行比例升高、小汽车出行率下降,但常规公交、自行车出行比例也有所下降,同时发生了平均出行距离、出行时耗缩减^{[4-6], [7]575}。公共交通服务水平和轨道交通的可达性会促进公交分担率的提升,但城市交通出行结构优化还受到多种因素的共同作用:包括居民社会属性、地区经济特征^{[7]572, [8-10]},城市层面的土地利用模式、道路结构与密度、距城市中心距离等空间要素^[11-14],以及街区尺度公共服务设施配置、住区可穿越性等要素^[15-16]。轨道交通服务对站点地区交通结构影响作用具有空间异质性和人群差异性^{[3]9, [17]},其复杂机制仍需细致解析。我国对城市轨道站区的交通行为研究仍存在下述局限。研究多针对公交、小汽车等单一出行方式变化开展分析,鲜有研究比较性分析多种交通方式结构的时空差异。理论上,轨道交通网的发展水平、结构会对站点地区经济、社会、交通效益产生影响,但少有研究考量轨道站点网络结构特征对交通行为的影响。此外,从交通效应角度对不同轨道站区TOD规划建设策略差异性探讨也有欠缺。

本文利用手机信令数据,识别并分析武汉市主城区164个轨道站点地区居民出行交通方式构成差异,并细致分析轨道站点网络结构、站区人口社会经济、建成环境等特征对慢行、常规公交、轨道交通、小汽车等出行分担率的影响作用差异,最后通过聚类分析识别轨道站点类型化特征并探讨差异化的站点地区交通调节策略,以为轨道交通站点地区TOD规划和绿色交通发展政策制定提供决策依据。

1 研究对象、数据及方法

1.1 研究对象

本文选取武汉市主城区轨道交通站点地

区作为研究对象(见图1)。截至2023年底,武汉市主城区已建成运行11条轨道交通线路,设有166个站点。武汉轨道交通线路结构和站点密度呈现显著空间差异:长江以北汉口片区轨道线路多、站点密度高,长江以南武昌片区二环外轨道站点密度显著低于二环内,汉阳片区轨道网稀疏。本文基于Mapbox模拟166个轨道交通站点步行10 min可达范围。为消除站点步行范围交叉覆盖影响,利用泰森多边形划分形成164个无重叠的站点步行可达区。最后,考虑步行可达区、邻接城市街坊尺度,以及手机信令数据平台可提供250 m网格数据,将164个站点步行可达区相交250 m网格均识别为轨道站点地区。最终,确定164个轨道站点地区如图1所示,重点关注其内部居住人口的出行交通方式构成差异。

1.2 数据来源

研究数据包括下述3类。第1类是联通智慧足迹平台提供的2023年9月武汉市手机信令数据,包含用户唯一ID及其社会经济属性与出行特征。通过关联用户ID与其居住地,可以识别各站点地区居住人口。随后,利用平台提取各个轨道站点内居住人口的性别、年龄、户籍及其每次出行的时间、速度、距离、起止点等信息,利用隶属度函数判别各站点居民各次出行交通方式,汇总统计各交通方式分担率。第2类是武汉市2020年土地利用、2023年建筑普查、道路、轨道交通网等地理信息数据,主要用于测算轨道交通站点地区建成环境指标。第3类是武汉市2023年高德地图POI数据,经过划分类型和核密度等分析,用于描述服务设施丰富度;同时结合手机信令平台中网格就业、居住人口和工休停留时间差异,可辅助识别出城市中心。

1.3 研究方法

(1) 交通出行方式判别方法

居民出行行为特征中,交通方式选择和出行时间、出行距离、出行速度等具有交互影响。利用手机信令数据可提取出行的时间、距离、速

度等特征值,引入模糊识别模型构建合理的隶属度函数,能够判断居民单次出行所采用的交通方式,既往研究证明该方法的精度^[18]。构建综合考虑出行速度、距离、时间的隶属度函数,按照最大隶属度原则判别该次出行所采用的出行方式。具体公式如下:

$$U_m = \max(F_i) (i = 1,2,3,4,5) \tag{1}$$

$$F_i = S_i \times T_i \times V_i (i = 1,2,3,4,5) \tag{2}$$

式中: i 表示交通方式,1—5分别代表步行、自行车、常规公交、轨道交通、小汽车5种出行方式; U_m 表示根据最大综合隶属度判断出 m 条出行数据所对应的出行方式; F_i 表示第 i 种出行方式的综合隶属度; S_i 表示出行距离对应第 i 种出行方式的隶属度; T_i 表示出行时间对应第 i 种出行方式的隶属度; V_i 表示出行速度对应第 i 种出行方式的隶属度。

其中,结合武汉市不同交通工具平高峰速度和时间差异等运行特征,标定不同距离、速度、时间下可能采用交通方式的隶属度函数及参数(见表1)。

本文利用武汉市客运交通量数据来对比验证上述方法的可行性。武汉市城市运输局发布的客运运营情况分析数据,统计公布市域范围内公汽电车、轨道交通、出租汽车、客运轮渡的客运完成量,但无针对轨道交通站点地区的统计数据。故研究利用设定的交通方式判定模型和参数,基于2023年9月武汉市手机信令数



图1 研究范围图
Fig.1 Study area map

资料来源:笔者自绘。

据分析武汉市市域居民出行量和交通方式。识别结果中,武汉市2023年9月市域居民常规公交出行量为6 186.86万人次,轨道交通出行量为11 841.52万人次。相较于武汉市2023年10月客运运营数据中公共汽电车客运完成量6 360.72万人次、轨道交通12 542.60万人次,两种交通方式交通量差异在5%以内、比例关系基本一致,说明上述方法判断结果基本可信。

(2) 不同交通方式分担率影响因素分析方法

计算Maron'I指数,发现武汉市轨道站点地区交通分担率及相关要素空间自相关现象不显著。这与武汉市主城区轨道站点空间分布不均匀特征有关。因此,本文建立多元线性回归模型,选取慢行分担率(步行和骑行)、常规公交、轨道交通和小汽车分担率为因变量,分析识别多方面要素对于轨道站点地区居民出行方式构成的影响,如公式(3)所示。

$$Y_i = \beta_0 + \beta_{i1}X_1 + \beta_{i2}X_2 + \beta_{i3}X_3 + \beta_{ij}X_j + \cdots \beta_{ik}X_k + \mu \quad (i = 1,2,3,4) \quad (3)$$

式中:Y_i为轨道站点地区第i种交通方式的分担率;X_k表示对站点出行分担率可能产生影响的k个自变量;β₀是回归常数;β₁₁、β₁₂···β_{ik}称为回归系数;μ是随机误差。

自变量选取中,考虑建成环境、社会经济、人口特征及轨道网络特征等方面的影响要素。通过多重共线性检验,剔除了距城市几何中心距离、道路交叉口密度、非武汉市户籍人口比例等变量后,方差膨胀因子均低于5,自变量及其描述性统计见表2。

建成环境方面:功能混合度反映土地利用功能多样性;路网密度影响小汽车的出行效率;公交站点密度关乎公共交通可达性;居住人口密度、就业岗位密度衡量站点地区人口与就业的密集程度;商业密度反映站点地区设施的密集程度。

社会经济属性方面:中青年、老年、男性和非湖北户籍人口比例反映了站点地区的人口结构特征;居民平均通勤距离体现居民职住分离程度;房价和月均话费额度则一定程

度上反映该站点地区居民经济水平。

武汉市轨道交通网呈现出空间分布不均的特征,不同站点在轨道网络中的结构特征会影响居民出行方式选择。度数中心性反映地铁站节点的换乘能力;接近中心性表示地铁网络的连接便捷程度,值越大,站点越靠近区域网络中心;介度中心性表明轨道交通站点在轨道交通网络中充当桥梁的程度,值越高,表明站点居民更容易经过更少站点到达其他地方。

(3) 分层聚类方法

本文采用分层聚类方法,实现城市轨道交通站点地区的交通方式结构类型划分,分层聚类适用于处理具有重叠或模糊特征的数据,能够清晰地展示不同类别间的关系,且具有一定灵活性和适应性。研究综合利用Q型聚类(K-means)与R型聚类(模糊C均值聚类)。首先,Q型聚类以4种出行分担率为聚类因子,提供了初步的大类划分,明确了站点地区的交通方式构成特征;而R型聚类进一步结合站

表1 出行方式隶属度函数及参数标定表
Tab.1 Membership functions and parameter calibration for travel modes

函数类型	出行距离	出行时间	出行速度	取值依据
步行隶属度函数	$S_1 = e^{-\frac{s^2}{4.5}}$	$T_1 = e^{-\frac{(t-10)^2}{25}}$	$V_1 = e^{-\frac{v^2}{30}}$	依据2020年武汉市第四次综合交通调查数据,居民步行出行时间分布峰值在10 min。因此设定出行时间峰值为10 min
骑行隶属度函数	$S_2 = e^{-0.8(s-2)^2}$	$T_2 = e^{-\frac{(t-13.5)^2}{20}}$	$V_2 = e^{-\frac{(v-10)^2}{8}}$	依据《2023两轮绿色出行研究报告》,全国居民自行车单次平均骑行时间为13.6 min,出行距离集中在0.5—3.5 km。因此设定出行距离峰值为2.0 km,时间峰值为13.5 min
常规公交隶属度函数	$S_3 = e^{-\frac{(s-5)^2}{6}}$	$T_3 = \begin{cases} e^{-\frac{(t-38)^2}{45}} & if \\ e^{-\frac{(t-28)^2}{45}} & \end{cases}$	$V_3 = \begin{cases} e^{-\frac{(v-18)^2}{10}} & if \\ e^{-\frac{(v-22)^2}{10}} & \end{cases}$	依据《2020年武汉市交通发展年度报告》,武汉市常规公交高峰平均运行车速为17.8 km/h左右。依据2020年武汉市第四次综合交通调查数据,武汉市常规公交出行时间峰值在32.0 min左右。因此分别设定平高峰速度为18.0 km/h、22.0 km/h;平高峰出行时间设定为28.0 min、38.0 min
轨道交通隶属度函数	$S_4 = \frac{1}{1 + e^{-0.6(s-5)}}$	$T_4 = e^{-\frac{(t-35)^2}{150}}$	$V_4 = e^{-\frac{(v-35)^2}{25}}$	依据《2020年武汉市交通发展年度报告》,2019年乘客在轨道系统内部平均行程时间为32.2 min,考虑站内候车时间,参数设定为35.0 min。由高德地图选取多条轨道交通线路,进行点对点出行路径规划,测算考虑车次运营过程中平均速度,武汉市平均轨道交通运行出行速度为35.0 km/h左右
小汽车隶属度函数	$S_5 = \frac{1}{1 + e^{-0.8(s-4)}}$	$T_5 = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{-0.3(-t-28)}} & if \\ \frac{1}{1 + e^{-0.2(-t-20)}} & \end{cases}$	$V_5 = \begin{cases} e^{-\frac{(v-28)^2}{45}} & if \\ e^{-\frac{(v-38)^2}{45}} & \end{cases}$	依据《2024年中国主要城市交通分析报告》中武汉市高峰25.0—30.0 km/h、平缓期车速30.0—45.0 km/h区间数据。参数设定为高峰时期平均车速为28 km/h,平缓期车速为38 km/h

注:(1) 受长度限制,这里if指的是if hour(stime)∈{7,8,17,18}表示:当出行记录的出发时间的小时部分属于7、8、17或18时,则判定该次出行处于拥堵时段,并触发相应的函数逻辑。(2) 指数函数 $f(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{k}}$,呈现对称钟形曲线,式中c控制函数的峰值位置,即该值为该种出行方式所对应的出行速度、时间、距离的隶属度概率的最大值,k控制函数的坡度和宽度,k越大函数曲线越平缓,覆盖范围越广。类似地,逻辑斯蒂函数 $f(x) = \frac{1}{1+e^{-a(x-b)}}$ 是一种S型曲线函数,式中b控制峰值参数,a控制函数的坡度。(3) 武汉市早高峰时段为7:00—9:00,晚高峰时段为17:00—19:00,常规公交运营时间为6:00—12:00(少数夜间公交未统计在内),地铁运营时间为6:00—11:30。因此设定出发时间在0:00—6:00内轨道交通及常规公交的综合隶属度为0。

资料来源:笔者自制。

点地区各交通方式关键影响因素,通过软聚类的方式捕捉数据的模糊边界与交集,综合交通方式构成和潜在驱动因素差异性交互关系细分站区类型,为制定差异化规划调节策略提供框架。

2 轨道站点地区居民出行交通方式构成差异

2.1 居民出行行为总体特征
 利用手机信令数据识别研究对象居民出

行起讫点、距离、时间等,汇总统计各站点居民2023年9月出行行为特征。从出行方式结构来看,轨道站点地区居民出行常规公交分担率和轨道交通分担率高于武汉市主城区平均水平,小汽车的出行分担率(29.25%)低于主城区平均水平。由于手机信令数据对250 m网格内位置移动识别不精准,研究仅测算站点地区居民超过250 m的步行和骑行行为,识别结果中步行分担率为11.73%,骑行分担率为17.47%。

2.2 轨道站点地区不同交通方式分担率差异

武汉市居民交通出行方式构成呈现显著的空间差异,慢行、常规公交、轨道交通和小汽车分担率在宏观变化趋势上相互关联,局部空间又呈现一定差异(见图2)。
 站点地区慢行平均分担率为28.8%,在13.0%—45.0%之间波动。汉口二环内区大量站点慢行分担率在35.0%以上,呈现显著的慢行出行聚集特征。在武昌和汉阳,慢行分担率较高的站点则是围绕着商业中心和高

表2 变量解释说明及描述性统计
 Tab.2 Variable definitions and descriptive statistics

变量名称		指标说明	平均值	方差	最小值	最大值
因变量	小汽车分担率	居民使用小汽车出行频次占总出行次数的比例/%	29.6	1.8	24.7	34.6
	常规公交分担率	居民使用常规公交地铁频次占总出行次数的比例/%	19.67	2.15	14.74	25.70
	轨道交通分担率	居民使用轨道交通频次占总出行次数的比例/%	22.94	3.56	11.76	34.52
	慢行分担率	居民慢行出行的频次占总出行次数的比例/%	27.8	5.1	13.5	45.2
建成环境属性	道路密度	站点地区道路长度与总面积之比/(km/km ²)	7.1	1.7	2.0	14.2
	公交站点密度	站点地区公交站点数量与总面积之比/(个/hm ²)	0.6	0.3	0.0	1.5
	商业设施密度	站点地区商业设施数量与总面积之比/(个/hm ²)	4.5	3.8	0.0	20.3
	就业密度	站点地区就业人口与总面积之比/(人/hm ²)	40.5	24.6	2.9	148.8
	居住密度	站点地区居住人口与总面积之比/(人/hm ²)	46.6	23.2	2.9	115.5
	功能混合度	利用POI数据计算站点地区土地利用功能信息熵	2.1	0.2	1.1	2.4
	距城市中心距离	轨道交通站点距离最近城市就业、公共服务复合中心的欧式距离/km	4.09	3.00	0.01	13.08
	度数中心性	反映站点可换乘数量/个	2.3	0.7	1.0	6.0
自变量 地铁站网络结构	接近中心性	站点与其他站点之间距离倒数的和,进行标准化	0.5	0.8	-1.3	1.9
	中介中心性	轨道交通网络所有最短路径中,站点位于最短路径上的频率,进行标准化	0.3	1.1	-1.1	3.6
	男性比例	站点地区男性人口比例/%	59.9	3.9	48.9	72.9
社会经济属性及人口特征	中青年比例	站点地区年龄位于18—40岁区间的人口比例/%	70.7	5.9	48.5	85.5
	老年人比例	站点地区老年人口(60岁以上)比例/%	15.8	4.5	5.6	43.9
	省外户籍人口比例	取身份证信息前两位计算站点地区户籍所在地不在湖北省的居民人口比例/%	28.1	6.2	17.3	52.2
	工作通勤距离	站点地区居民平均工作通勤距离/km	5.4	1.3	2.0	8.8
	月均话费	站点地区居民单月的平均话费额度/元	52.0	4.1	36.7	69.1
	平均房价	站点地区平均房价/(万元/m ²)	2.0	0.3	1.2	2.8

注:除道路密度外,表中“总面积”为扣除水域后的用地总面积。

资料来源:笔者自制。

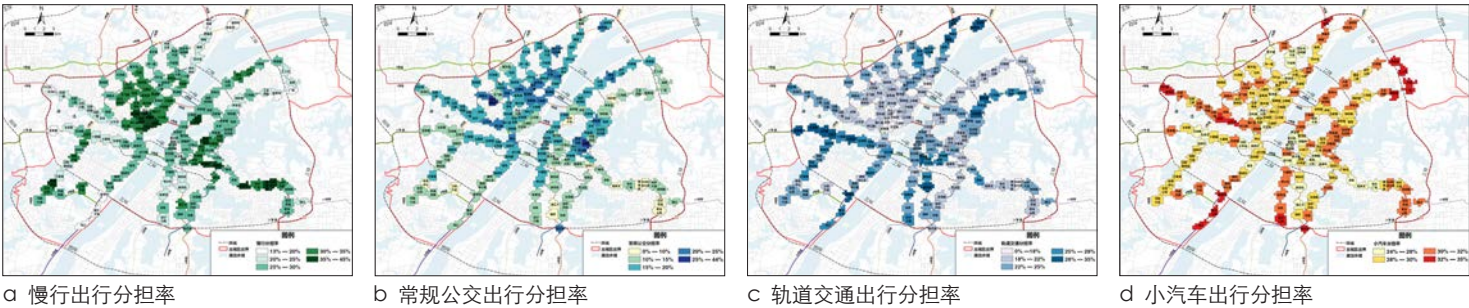


图2 不同交通方式分担率空间差异图
 Fig.2 Spatial variation map of modal share rate

资料来源:笔者自绘。

校散点状分布。轨交1、7、16号线尾端轨道站点慢行分担率不足20.0%，呈现低值集聚。局部差异来看，汉阳新兴商业中心王家墩站和产居结合的东风公司站表现出比传统中心钟家村站更高的慢行分担率；华中科技大学、湖北大学等紧邻高校的站点，居住人群慢行比例高。

站点地区常规公交出行分担率集中在15.0%—25.0%之间，平均为19.7%，空间上与慢行分担率间呈现负相关变化特征。分担率高值主要聚集在一环至二环范围内，同时沿长江、汉江的站点地区公交出行分担率相对较高，轨交16号线、武昌片区轨交2号线等末段站点地区分担率在15.0%以下。整体上常规公交出行分担率呈现向外围地区先递增再递减的趋势，在二环处常规公交出行分担率达到最高。

站点地区轨道交通出行分担率集中在12.0%—35.0%之间，平均为23.0%。18.0%以下分担率的站点主要集中在汉口核心商务区，以及如街道口、华中科技大学等靠近就业中心的站点。汉口区二环内、轨交5号线北侧沿江站点、街道口、光谷等周边站点其轨道

交通分担率集中在18.0%—22.0%之间。而外环末端站点轨道交通分担率最高，可达到28.0%—35.0%。武汉三镇中，汉阳轨道交通分担率最高。总的来看，距离城市区域中心越近，工作通勤出行距离越低的站点地区轨道交通分担率越低。

站点地区小汽车分担率均值为29.2%，略低于武汉市主城区平均水平30.0%。城市一环线范围内站点地区小汽车分担率基本低于30.0%。二环线圈层中，汉口片区、王家湾、光谷广场等城市中心片区站点小汽车分担率多低于28.0%。汉口中部轨道交通密集地区，小汽车分担率低的区域集聚连片。但黄浦路、三层楼、武胜路等滨江高品质居住片区小汽车分担率较高。二环以外，轨道站区居民出行中小汽车出行分担率多高于32.0%，轨道交通线路尾部站点最高，武昌高校周边站点、汉阳经济开发区站点小汽车分担率较低。

3 不同交通方式分担率影响因素分析

本文选取慢行、常规公交、轨道交通、小汽车出行分担率作为此次研究的因变量，分别建立多元回归模型，计算结果见表3。

轨道站点地区居民出行慢行交通分担率主要受到3方面要素影响。站点地区道路网密度越高、公交站点密度越高，居民采用慢行出行的比例越高。站点地区就业岗位密度具有显著积极影响，平均通勤距离增加会显著降低慢行出行比例，说明职住关系对慢行出行分担率有重要影响。居民社会经济属性也影响其慢行交通选择，居住在房价较高片区居民出行选择慢行交通比例降低，男性群体使用慢行交通比例较低，中青年人群采用慢行交通比例上升，外省人口集聚片区慢行分担率更高。

轨道网络结构特征显著影响站点地区居民出行轨道交通分担率，地铁接近中心性指标和站点中介中心性指标显著度高，说明轨道站点地区周边站点越密集，站点与其他站点通行越便利，同时居民使用轨道交通比例越高。而道路密度和公交站点密度表现出显著消极影响，这与过往研究发现不一致。主要原因包括：一方面，在轨道站点地区，轨道交通较常规公交更具竞争优势，故公交站密度影响减弱；而武汉市道路网密度和公交密度高的中心城区特别是旧城区，居民职住平

表3 多元回归模型分析结果
Tab.3 Multiple regression model analysis results

自变量	因变量							
	慢行分担率		常规公交分担率		轨道交通分担率		小汽车分担率	
	Est.	p-value	Est.	p-value	Est.	p-value	Est.	p-value
道路密度/%	0.342	0.028**	-0.001	0.993	-0.445	0.002***	0.103	0.260
公交站点密度/(个/hm²)	1.344	0.066*	0.176	0.699	-1.969	0.004***	0.449	0.299
商业设施密度/(个/hm²)	0.004	0.960	-0.031	0.582	0.088	0.289	-0.062	0.242
就业密度/(人/hm²)	0.091	0.000***	-0.038	0.000***	-0.046	0.002***	-0.007	0.472
居住人口密度/(人/hm²)	-0.033	0.030**	-0.006	0.503	0.043	0.002***	-0.004	0.647
功能混合度	-1.242	0.363	-1.305	0.129	4.559	0.000***	-2.013	0.014**
距城市中心距离/km	-0.120	0.263	0.190	0.004***	-0.170	0.092*	0.090	0.151
工作通勤距离/km	-1.971	0.000***	-0.236	0.149	2.346	0.000***	-0.139	0.367
度数中心性	-0.163	0.627	-0.155	0.463	0.182	0.562	0.137	0.494
接近中心性	0.014	0.974	-0.059	0.831	0.926	0.025**	-0.882	0.001***
中介中心性	-0.208	0.373	0.100	0.496	0.430	0.049**	-0.322	0.021**
男性比例/%	-0.347	0.000***	0.066	0.164	0.130	0.067*	0.151	0.001***
中青年比例/%	0.112	0.096*	-0.103	0.015**	0.029	0.638	-0.038	0.343
老年人口比例/%	-0.060	0.486	-0.006	0.905	0.026	0.743	0.040	0.433
省外户籍人口比例/%	0.135	0.003***	-0.063	0.026**	-0.059	0.161	-0.013	0.613
平均话费额度/元	-0.022	0.719	-0.013	0.737	0.021	0.715	0.014	0.699
平均房价/(万元/m²)	-3.766	0.000***	1.723	0.004***	0.834	0.348	1.209	0.033**
Adj. R²	0.803		0.558		0.646		0.460	

注：***P≤0.01；**P≤0.05；*P≤0.1；Adj. R²表示调整后R平方值。

资料来源：笔者自制。

衡更好、收入水平更高,轨道出行比例反而减低。另一方面,站点地区功能混合度越高,轨道交通分担率显著提升;站点地区居住人口密度对轨道交通分担率具有积极影响,而就业岗位密度具有轻微消极影响,长距离通勤居民使用轨道交通比例显著提升,说明轨道交通建设有助于提升居民远距离通勤公交分担率,而短距离通勤居民更偏向选择慢行交通。

站点地区居民常规公交出行分担率主要受两方面要素的影响。建成环境方面,距离城市区域中心距离越远,其常规公交出行分担率越高,而就业密度则反向影响出行分担率。人口属性方面,省外户籍人口和中青年群体较少采用常规公交出行,房价较高、收入水平偏高人群使用常规公交可能性提升。

空间环境要素中,功能混合度对于降低小汽车分担率具有积极作用。既往研究发现,提高公交站点密度、人口密度、就业岗位密度、

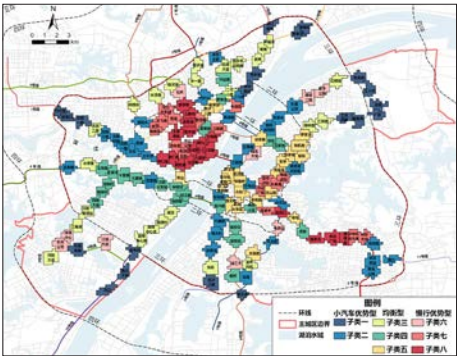


图3 不同类型站点空间分布图
 Fig.3 Spatial distribution map of different types of stations

资料来源:笔者自绘。

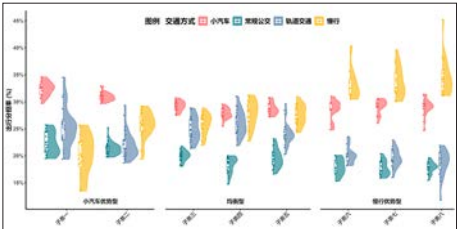


图4 不同类型站点地区出行分担率云雨图
 Fig.4 Raincloud plot of trip modal share rate by station area type

资料来源:笔者自绘。

商业设施密度等可降低小汽车分担率。笔者发现,在城市轨道站点地区,这些要素对小汽车分担率没有显著影响。但轨道站点在网络中的中介中心性及接近中心性对于降低居民小汽车使用比例具有显著积极作用。此外,人口属性方面,男性和高收入群体更偏好使用小汽车出行。

4 轨道站点地区出行方式调节策略讨论

利用上述分层聚类方法,对164个轨道站点地区开展聚类。首先,以站点地区小汽车、常规公交、轨道交通、慢行分担率为因子,将站点聚类得到3大类。然后,针对各个大类,再利用多元线性回归模型识别的关键影响因子,进一步聚类得到8个站点子类型。

第1大类为小汽车优势型站点, 30.0%—35.0%居民出行人次使用小汽车,慢行分担率均值为20.0%,主要位于二环以外轨道交通廊道。根据居民属性、空间环境特征等因子细分为2个子类。第2大类为均衡型站点地区,总体上各出行方式分担率居中,轨道交通分担率略高于常规公交分担率。该类站点数量最多,为69个,主要分布在汉阳三环内、汉口二环外及武昌滨东湖、环沙湖地区,可细分为3个子类型。第3大类为慢行优势型站点地区,呈现轨道交通和常规公交分担率低值聚集、慢行

分担率较高的特征。该类型站点约占26.8%,主要在汉口二环核心片及武昌主要商业中心集聚分布,部分站点在武昌、汉阳二环外散点分布,可细分为3个子类型。8个子类型站点空间分布见图3,不同交通方式占比见图4,空间环境和人口特征均值见表4,探讨差异化调节策略见表5。

5 结论

本文引入手机信令数据识别武汉市主城区轨道站点地区居民出行分担率构成和空间差异,分析不同交通方式分担率影响因素,基于城市轨道交通站点地区交通方式构成和关键影响因素构建站点地区分类框架并探讨差异化调控策略。研究主要得出以下结论。

(1) 从各个站点不同交通方式分担率结构差异上来看,慢行分担率与公共交通分担率均呈现此消彼长的竞争态势,而小汽车出行分担率空间差异性并不显著、可调节性较弱。从空间分布来看,武汉市轨道交通站点地区的交通方式构成与城市中心等级体系具有关联,高等级城市中心周边地区就业岗位和服务设施密集,居民步行分担率高值站区空间集聚,而轨道交通和常规公交资源未被充分利用;次级城市中心因轨道网络密度不高和站点功能

影响因子	小汽车优势型		均衡型			慢行优势型		
	子类一	子类二	子类三	子类四	子类五	子类六	子类七	子类八
道路密度/(km/km ²)	5.33	7.25	6.46	7.02	7.56	6.99	7.68	8.92
公交站点密度/(个/hm ²)	0.22	0.57	0.49	0.64	0.60	0.60	0.74	0.84
就业密度/(人/hm ²)	13.43	33.98	25.43	44.58	39.61	41.31	69.21	71.18
居住密度/(人/hm ²)	14.18	42.28	39.46	65.56	41.63	46.1	48.05	81.83
功能混合度	1.93	2.07	2.09	2.06	2.15	2.14	2.21	2.13
距城市中心距离/km	9.23	3.83	6.17	2.71	2.57	5.59	1.66	1.03
接近中心性	-0.44	0.44	0.11	0.78	0.97	0.15	0.86	0.99
中介中心性	-0.23	0.18	-0.14	0.62	0.54	-0.22	0.72	0.65
男性比例/%	66.01	59.80	59.10	58.77	58.93	59.35	59.21	58.04
中青年比例/%	67.90	70.89	72.36	71.75	69.11	74.62	68.76	71.64
省外户籍人口比例/%	26.64	27.22	24.63	25.98	28.61	32.08	36.57	28.15
通勤距离/km	6.84	5.44	6.36	5.67	4.78	4.85	4.26	3.76
平均房价/(万元/m ²)	1.62	2.06	1.75	1.92	2.32	1.87	2.36	2.08

资料来源:笔者自制。

表5 不同类型站点地区特征及调节策略表
Tab.5 Characteristics and regulation strategies for different types of station areas

大类	子类	特征	关键影响因素	调控策略
小汽车优势型	子类一	主城边缘、轨道交通尾端欠发展区;功能主要为旧村与产业区;低房价,中青年就业人口集中,男性比例高;道路密度、公交站点密度低,依赖小汽车通勤	站点网络中心性低,道路密度、公交站点密度低,男性比例高,通勤距离长	(1)配置轨道站点和住区、产业园区的接驳公交,在高峰时段设置定制公交,促进居民利用公共交通通勤出行; (2)完善道路网络,围绕轨道站点建设慢行路网和停车设施; (3)远期促进站点地区TOD开发,提升站区就业功能和生活服务功能,压缩出行距离
	子类二	位于二环外枝状轨道交通廊道;旧住区、高密度小区和商贸、物流等园区板块布局,功能混合度低;中青年、外来人口比例中高,就业密度中高,但部分人群职住空间不匹配,依赖小汽车出行	站点中介中心性低,单个站区功能混合度低,中青年人口比例高,平均通勤距离远	(1)伴随轨道网络结构优化,提升站点中介中心性,降低通勤交通轨道绕行系数; (2)利用园区、住区道路完善慢行网络,提高轨道站可达性; (3)结合旧园区更新和旧住区更新,提升就业吸引力,配建一定比例保障性住房,优化职住匹配度,抑制长距离小汽车通勤
	子类三	主城边缘中高密度居住区,道路网密度低且常规公交不完善;职住密度不均衡,中青年人口比例高,且通勤距离远;小汽车、慢行与轨道分担率均较高,常规公交分担率低	站点网络中心性低,常规公交站点密度低,男性比例高,中青年人口比例高,通勤距离远	(1)重点提升常规公交供给,改善片区公交服务水平; (2)加强居住区内部道路、出入口与城市道路衔接融合,提高步行可穿越性,改善大街区模式带来的轨道站点步行可达性差问题; (3)结合城市更新丰富就业、服务功能,提升产居融合度
均衡型	子类四	城市中间圈层,轨道站点网络中心性较高;多为高密度居住组团,散布中等密度就业岗位,但站区职住比低于2/3,功能混合度不高;大量居住人口利用小汽车、轨道实现通勤和生活交通出行	居住人口密度高而就业密度低,功能混合度不高,提升轨道交通分担率	(1)重点强化站区功能混合开发,引入高就业供给功能,完善片区商业、公共服务设施配套; (2)加密居住区步行网络,串联各居住组团和轨道交通站
	子类五	多位于武昌片区的次中心区,商业办公功能和高密度住区混合,功能混合度最高,居民通勤距离短,慢行分担率较高;虽然具有良好的轨道站点网络中心性和道路条件,但居住人口收入水平较高,偏好小汽车出行	功能混合度高,道路密度高,通勤距离低,房价高	(1)实施慢行优先政策,完善慢行网络,进一步提升慢行出行比例; (2)加强绿色出行宣传教育,促进公交出行; (3)倡导站区功能混合开发,进一步压缩通勤、生活出行距离
慢行优势型	子类六	主城区大型公共服务设施或教育科研机构驻地站点,站区内功能混合度高,工作、人口密度均衡,中青年及省外户籍比例较高;大量人口通过慢行满足出行需求,部分人口通勤距离远偏好小汽车出行,公交分担率低	距离城市中心远,站点网络中心性低,道路密度低,省外户籍比例高	重点加强大型单位内部公共交通、步行空间和轨道站点的衔接,促进通勤人群使用轨道交通
	子类七	多为汉口、武昌城市中心的高密度商务办公区,就业岗位密度高,功能混合度高,居民步行可满足交通需求;道路、常规公交和轨道站中心性均较为优越,居民可承担住房价格最高,偏好使用小汽车中远距离出行	路网密度高,接近中心性高,就业岗位密度高,功能混合度高,住房价格高	(1)实施慢行优先政策,完善慢行网络,进一步提升慢行出行比例; (2)加强绿色出行宣传教育,探索中心区小汽车限制政策,抑制小汽车出行量提升; (3)倡导站区垂直功能混合开发,进一步压缩通勤、生活出行距离
	子类八	汉口、武昌城市中心地带的高密度商住混合区,职住、服务高度混合,居住密度极高,通勤距离最短。虽具有优越的常规公交和轨道交通条件,但居民利用慢行交通可满足大量出行需求,高收入人群偏好使用小汽车	居住密度高、就业密度高,通勤距离短,住房价格高	(1)划定慢行优先区,优化高密度道路网络路权分配,完善慢行交通网络,提升街道空间环境品质; (2)高密度、功能混合开发,鼓励围绕商业设施和轨道站点构建立体化步行网络; (3)对居住密度高的住区,探索基于容积率奖励等机制的公服、绿地,改善居住环境,促进慢行出行

资料来源:笔者自制。

单一,轨道交通、小汽车、慢行分担率较为均衡;非中心地区,慢行交通占比随距中心距离的增加呈梯度递减、轨道和常规公交分担率逐渐提升。

(2) 城市空间中轨道网络发展水平和结构特征对所处站点地区的出行分担率结构具有显著影响。轨道交通站点的高接近中心性和高中介中心性显著促进了轨道交通的使用,换乘站及换乘站数量则未表现出显著影响。在其他影响因素中,功能混合度及工作通勤距离、居住密度、就业密度等职住关系

是影响轨道交通分担率的关键变量。在4类交通方式中,站区小汽车分担率主要受社会经济因素和轨道交通网络特征影响,慢行和常规公交出行分担率则更多受到建成环境和社会经济因素方面的影响,城市中心地区高密度、功能混合空间环境特征能够有效促进慢行出行。

(3) 基于居民交通方式构成,城市轨道交通站点可分为小汽车优势型、均衡型和慢行优势型3大类,小汽车优势型分布在城市外围轨道交通末端地区和新城区区域。均衡型

主要分布在城市中间圈层。慢行优势型主要围绕城市核心区域分布。驱动形成3大类站点地区的居民社会经济特征、空间环境特征等因素具有差异,可按照关键影响因素划分为8个子类型,在站点地区提质升级中采取差异化的绿色交通行为调节优化策略。

手机信令数据平台能够为研究提供全覆盖、动态性的数据支持,但由于空间颗粒度限制无法识别短距离慢行出行行为,笔者未能考虑居民在站区内的慢行出行行为,但分析结果对于探究站区居民中长距离出行方

式构成差异及机制仍有代表性。未来研究可以结合大数据与问卷调查数据,或深入分析单一类型站点地区的出行模式,为轨道交通站点区域的出行行为研究和政策制定提供更详尽的依据。

参考文献 References

[1] 胡敏. 轨道交通对城市空间布局的影响探析[J]. 现代城市研究, 2007 (11): 34-39.
HU Min. The effects of rail transit on urban spatial patterns[J]. Modern Urban Research, 2007(11): 34-39.

[2] CHATMAN D G. Does TOD need the T?: on the importance of factors other than rail access[J]. Journal of the American Planning Association, 2013(1): 17-31.

[3] TAO S, CHENG L, HE S, et al. Examining the non-linear effects of transit accessibility on daily trip duration: a focus on the low-income population[J]. Journal of Transport Geography, 2023(109): 103600.

[4] 黄晓燕, 曹小曙, 殷江滨, 等. 城市轨道交通和建成环境对居民步行行为的影响[J]. 地理学报, 2020 (6): 1256-1271.
HUANG Xiaoyan, CAO Xiaoshu, YIN Jiangbin, et al. The influence of urban transit and built environment on walking[J]. Acta Geographica Sinica, 2020(6): 1256-1271.

[5] LUND H, WILLSON R W, CERVERO R. A re-evaluation of travel behavior in California TODs[J]. Journal of Architectural and Planning Research, 2006(3): 247-263.

[6] SPEARS S, BOARNET M G, HOUSTON D. Driving reduction after the introduction of light rail transit: evidence from an experimental-control group evaluation of the Los Angeles Expo Line[J]. Urban Studies, 2017(12): 2780-2799.

[7] XIE L. Automobile usage and urban rail transit expansion: evidence from a natural experiment in Beijing, China[J]. Environment and Development Economics, 2016(5): 557-580.

[8] SUN B, ERMAGUN A, DAN B. Built environmental impacts on commuting mode choice and distance: evidence from Shanghai[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017(52): 441-453.

[9] BAUTISTA-HERNANDEZ D A. Mode choice

in commuting and the built environment in Mexico City. Is there a chance for non-motorized travel?[J]. Journal of Transport Geography, 2021(92): 103024.

[10] 刘美银, 王建伟. 考虑城市客运结构优化的城市轨道交通定价方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017 (3): 53-59.
LIU Meiyin, WANG Jianwei. Pricing method of urban rail transit considering the optimization of passenger transport structure[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017(3): 53-59.

[11] 郭亮, 贺慧. 城市交通结构优化与土地利用模式相关性的比较[J]. 城市规划学刊, 2009 (5): 77-82.
GUO Liang, HE Hui. Comparative study on the relevance of structural optimization of urban traffic and land-use patterns[J]. Urban Planning Forum, 2009(5): 77-82.

[12] CHATMAN D G. How density and mixed uses at the workplace affect personal commercial travel and commute mode choice[J]. Transportation Research Record, 2003(1): 193-201.

[13] 吴凡, 石飞. 城市路网布局结构对公共交通出行的影响研究[J]. 城市规划学刊, 2017 (4): 121.
WU Fan, SHI Fei. Effects of urban road network layout structure on public transportation trips[J]. Urban Planning Forum, 2017(4): 121.

[14] CHEN F, WU J, CHEN X, et al. Vehicle kilometers traveled reduction impacts of Transit-Oriented Development: evidence from Shanghai City[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017(55): 227-245.

[15] 吴娇蓉, 王洋, 余森, 等. 公共服务设施达标评价与出行结构关联分析[J]. 综合运输, 2020 (11): 10-15.
WU Jiaorong, WANG Yang, YU Miao, et al. Correlation analysis between the evaluation of public service facilities and the structure of travel[J]. China Transportation Review, 2020(11): 10-15.

[16] 宋小冬, 赵一夫, 庞磊. 住宅区道路可穿越对公共交通出行的便利性影响[J]. 上海城市规划, 2023 (1): 121-127.
SONG Xiaodong, ZHAO Yifu, PANG Lei. Road crossability in the residential area for convenience of transit trip[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2023(1): 121-127.

[17] 阚长城, 马琦伟, 党安荣, 等. 街区尺度下的通勤出行方式挖掘及其影响因子——以北京市为例[J]. 城市交通, 2020 (5): 54-60.
KAN Changcheng, MA Qiwei, DANG Anrong, et al. Commuting travel mode and its influencing factors at street block scale: a case study in Beijing[J]. Urban Transport of China, 2020(5): 54-60.

[18] 刘华斌. 手机信令数据背景下城市交通出行方式选择辨识方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

LIU Huabin. Urban transportation modes recognition based on mobile signaling data[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.