

不同群体轨道交通出行时空演化特征及与建成环境的关系:基于武汉市的纵向分析*

Spatiotemporal Evolution Characteristics of Rail Transit Travel across Different Population Groups and Their Relationship with the Built Environment: A Longitudinal Analysis of Wuhan City

杨 红 李晶晶 严雪心 彭建东 YANG Hong, LI Jingjing, YAN Xuexin, PENG Jiandong

摘要 建设包容性的公共交通系统是交通强国战略的重要目标。然而,已有研究尚未充分揭示不同群体的公共交通出行需求及其与建成环境关系的差异。为此,以武汉市为例,通过轨道交通刷卡数据识别老年人、残疾人、通勤人员、中小学生及其他人群出行时空演化特征,并使用非平衡面板模型揭示建成环境对不同群体轨道交通出行的影响差异。结果显示,随着轨道交通网络的完善,老年人与残疾人出行频率增长显著,通勤人员与其他群体相对稳定,中小学生则略微下降。其次,建成环境对轨道交通客流的影响存在明显的群体异质性,其对同一群体轨道交通客流的影响在工作日与周末还存在一定的时间异质性。因此,需要制定差异化设施建设、精准化服务供给及包容性政策引导的“需求响应型”优化策略,才能有效助力包容性公共交通系统建设。

Abstract Building an inclusive public transportation system is a crucial objective of the national strategy to develop a strong transportation network. However, existing research has not yet fully revealed the differences in public transit demands among various groups and their relationships with the built environment. To address this gap, this study takes Wuhan as a case example, using metro smart card data to identify the spatiotemporal evolution characteristics of travel patterns among the elderly, disabled individuals, commuters, primary and secondary school students, and other groups. An unbalanced panel model is then employed to analyze the heterogeneous impacts of the built environment on metro travel demand across these groups. The results show that as the metro network expanded, travel frequency increased significantly among the elderly and disabled populations, remained relatively stable for commuters and other groups, and slightly declined for students. Furthermore, the influence of the built environment on metro ridership exhibited notable group heterogeneity, with additional temporal variations between weekdays and weekends for the same group. Therefore, to effectively promote inclusive public transportation development, it is essential to adopt demand-responsive optimization strategies, including differentiated infrastructure planning, targeted service provisions, and inclusive policy guidance.

关键词 城市轨道交通;不同人群;出行特征;建成环境

Key words metro; different population groups; travel characteristics; built environment

文章编号 1673-8985 (2025) 05-0129-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20250517

作者简介

杨 红

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室
博士后,博士

李晶晶

武汉市江夏区自然资源和城乡建设局
科员,硕士

严雪心

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室
博士后,博士

彭建东(通信作者)

武汉大学城市设计学院
教授,博士生导师,00006709@whu.edu.cn

0 引言

促进公共交通的发展被广泛认为是缓解城市污染、交通拥堵和交通不公平等城市病的解决方案^[1-2]。其中,城市轨道交通凭借其高效、环保、大运量等特点,已成为大都市公共交通

*基金项目:国家自然科学基金青年基金“时空异质视角下城市多模式公共交通竞合机理及规划响应研究”(编号52408090);教育部人文社会科学研究基金“建成环境对老年人公交及地铁出行的时空动态影响及适老化建成环境优化研究”(编号24YJCZH371);中国博士后科学基金特别资助“多群体活动需求导向下建成环境对公共交通出行的影响机制及规划响应研究”(编号381908)资助。

通体系建设的首选模式^[3-4]。然而,尽管轨道交通的快速建设引导了居民出行方式的转变,但不同人群对轨道交通的依赖程度和使用意愿存在显著差异。这种因年龄、身体状况等因素导致的行为规律差异尚未得到充分揭示,限制了轨道交通在实现交通公平和可持续发展中潜力^[5]。

随着轨道交通网络的快速扩张,其在重塑居民出行方式的同时,也引发了日益突出的交通公平性问题。交通公平本质上反映了交通资源在不同空间和群体间的分配^[6]。研究表明,建成环境能够通过影响交通资源的分配,调节不同区域的交通公平,并且这种调节效应存在显著的群体异质性差异^[7]。因此,揭示建成环境对不同群体出行行为的差异化影响,是破解交通公平性难题的关键。现有研究通常使用5Ds的框架对建成环境进行定义,即:密度(density)、多样性(diversity)、设计.design)、到交通站点距离(distance)与目的地可达性(destination)^[8]。然而,这些研究多探究建成环境对站点总体客流或通勤客流

的影响,较少考虑到老年人、残疾人及中小学生等群体异质性。但受身体和认知限制,这些群体对建成环境的感知可能更为敏感,因而基于总体客流或通勤客流的研究结论可能存在适用性偏差^[9]。另外,已有研究结果多基于截面数据获得,难以捕捉轨道交通建设与出行行为的动态演变过程。鉴于我国许多城市仍处在轨道交通快速发展阶段,获取长时间序列数据有助于获得更为严谨的研究结论,为未来规划实践提供科学依据。

综上所述,尽管国内外学者已围绕建成环境与出行行为开展了大量研究并取得了丰富研究成果,但仍存在以下3个主要局限:首先,研究视角多聚焦于单一群体的出行行为模式,而缺乏针对不同社会群体轨道交通出行的差异化特征的对比研究;其次,建成环境对不同人群的差异化影响尚不清晰;最后,基于横断面数据和方法的研究只能揭示特定时间节点下建成环境和出行行为的直接关联性,而无法揭示两者随时间的动态演变。

为弥补以上研究空白,本文以武汉市为

例,使用2014—2019年轨道交通刷卡数据进行研究。首先,基于轨道交通刷卡数据,将乘车人员划分为老年人、残疾人、通勤人员、中小学生及其他人群5大类。基于集计分析,了解不同群体出行特征的变化。随后,利用非平衡面板模型重点探索建成环境特征、轨道交通站点特征及社会经济属性特征对不同群体站点客流的影响,并总结归纳不同要素对不同群体客流影响的差异。最后,进一步探索在工作日和周末,不同要素对不同群体客流影响的差异。

1 研究设计

1.1 研究区域

本文以武汉市为研究对象,研究的时间范围为2014—2019年。武汉市是中国中部地区最大的城市,城市空间结构总体上可以划分为核心区、都市发展区及远郊区。武汉市的城市空间结构造就了武汉市出行强度总体呈现出沿轴线逐层减小的特征,加之受自然山水阻隔,武汉市陆地通道宽度仅为3—5 km,这种独特的“窄界面、强集聚”的客流特征,决定了大容量的轨道交通在城市内很受欢迎。图1显示了2014—2019年武汉市轨道交通的发展历程,轨道交通站点数量从2014年的58个发展至2019年的189个(换乘站点不重复计数),轨道交通网络已覆盖武汉所有行政区和功能区,助力武汉跻身“世界级地铁城市”。与轨道交通同步,全市常住人口由1 033.8万人增长至1 121.2万人,累计增长8.5%,年均增长率达1.6%,人口总量的持续增长为轨道交通客运需求提供了稳定基础(见图2)。

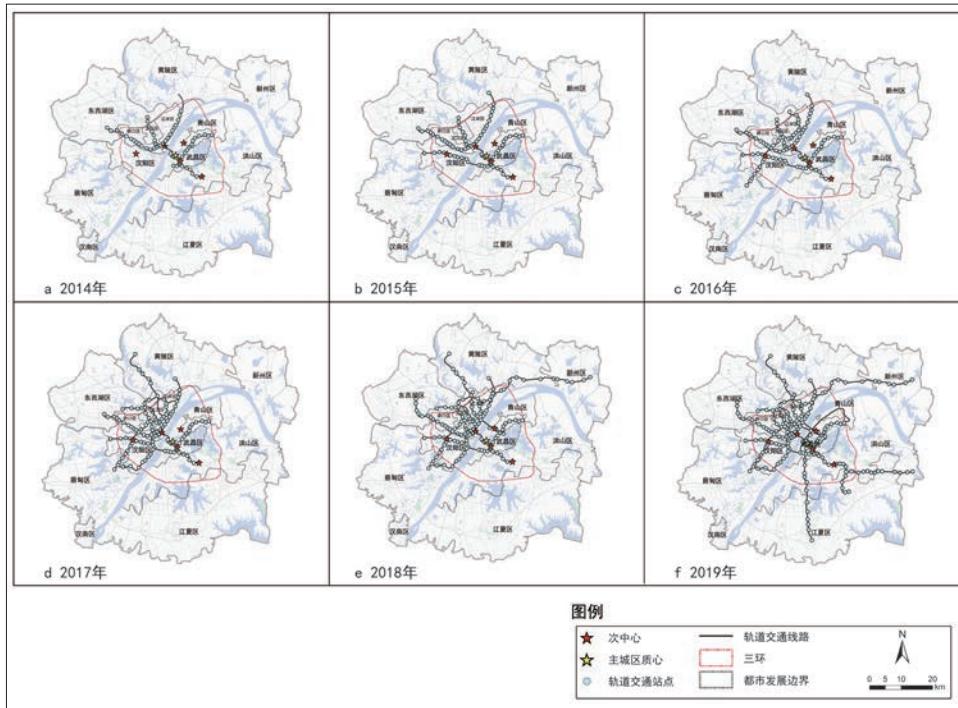


图1 研究区域
Fig.1 Study area

资料来源:笔者自绘。

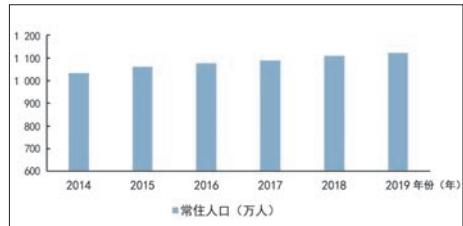


图2 武汉市历年常住人口
Fig.2 Wuhan permanent resident population by year
资料来源:笔者根据武汉市统计年鉴自绘。

1.2 研究数据与变量

因变量为2014—2019年每年3月非节假日连续一周的不同群体城市轨道交通站点客流量。基于城市轨道交通刷卡数据,经过数据清洗剔除无效记录后,构建了居民出行OD链的数据集,共包含9 675万条工作日数据和3 982万条周末数据。研究根据用卡性质分别提取老年人、残疾人、中小学生的出行OD链。参照已有研究,选择工作日出行时间间隔超过6 h且每周至少出现3次的规律性往返通勤模式作为识别标准^[10],筛选出通勤人员群体,其余出行者则归类为其他人员。从表1可以看出,老年人、残疾人及通勤人员工作日平均客

流高于周末,中小学及其他人群周末客流高于工作日。此外,不同群体站点平均客流量存在显著差异,其他人群客流量最大,中小学生及残疾人群体客流相对较小。

自变量考虑了轨道交通站域建成环境、城市轨道交通站点特征及社会经济属性特征3个维度的变量。其中,轨道交通站域建成环境主要考虑了“5Ds”要素,这是以往研究中主要考虑的影响要素^[11]。轨道交通站点特征则考虑了换乘站、终点站、出入口数、全局可达性、中介中心性、接近中心性这6个要素。此外,使用房价来表征居民的社会经济属性特征,这在以往的一些研究中被认为是影响居民

出行方式的重要影响因素^[12]。

1.3 研究方法

面板数据因兼具截面和时间维度信息优势,能够解决截面数据难以处理的问题,因而在现有研究中更加受到重视。面板数据的特点是研究时段内每个时期个体数量完全一致,但现实生活中常出现样本动态变化的情况,这种数据被称为“非平衡面板数据”或不完全面板。由于本文中轨道交通站点数量随着时间的变化逐步增长,故而使用非平衡面板模型可以得到更为准确的结果。参考以往研究^[13-14],非平衡面板模型的建模过程如下。

通常情况下,面板数据模型可以表示为:

$$Y_{it} = \alpha + \beta X'_{it} + \mu_i + v_{it} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T_i$$

式中: i 表示个体, t 表示时间。 N 为个体数, T 是时间序列的维度。 α 为一个标量, β 是 $k \times 1$ 的待估系数矩阵, X'_{it} 是第 k 个解释变量的第 i 个个体在时间 t 的观测值, 不可观测的随机变量 μ_i 代表个体异质性的截距项, v_{it} 表示随机误差项。面板数据通常有固定效应模型与随机效应模型两种处理方法, Baltagi等^[15]通过分析发现, 面板数据固定效应模型对于非平衡面板同样适用。对于随机效应模型, 非平衡面板数据方差分析有ANOVA方法、最小正态二次无偏估计值(MINQUE)和最小方差二次无偏估计值(MIVQUE)方法等。其中, ANOVA方法对回归系数的估计结果最好^[16]。参考以往研究^[17], 建立的非平衡面板模型如下:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 B_{it} + \beta_2 M_{it} + \beta_3 S_{it} + \mu_i + v_{it} \quad (2)$$

式中: Y 表示每年各城市轨道交通站点不同群体客流量; B 为城市轨道交通站点周边建成环境要素; M 为城市轨道交通站点特征; S 为乘客居民社会经济属性特征。

1.4 多重共线性检验

本文通过Hausman检验确定固定效应模

表1 变量设置及定义

Tab.1 Variable specification and definitions

	变量名称	变量定义	平均数	标准差
因变量	老年人工作日客流	轨道交通站点老年人工作日平均客流量/人次	1 518.228	1 253.554
	残疾人工作日客流	轨道交通站点残疾人工作日平均客流量/人次	180.920	155.641
	通勤人员工作日客流	轨道交通站点通勤人员工作日平均客流量/人次	3 696.192	3 189.479
	中小学生工作日客流	轨道交通站点中小学生工作日平均客流量/人次	207.320	235.605
	其他人群工作日客流	轨道交通站点其他人群工作日平均客流量/人次	22 640.903	22 497.887
	老年人周末客流	轨道交通站点老年人周末平均客流量/人次	1 337.628	1 110.487
	残疾人周末客流	轨道交通站点残疾人周末平均客流量/人次	156.619	140.886
	通勤人员周末客流	轨道交通站点通勤人员周末平均客流量/人次	1 664.235	1 436.068
	中小学生周末客流	轨道交通站点中小学生周末平均客流量/人次	202.632	238.015
	其他人群周末客流	轨道交通站点其他人群周末平均客流量/人次	25 585.193	30 205.225
自变量	常住人口数	轨道交通站域范围内常住人口数/人	28 873.414	24 905.344
	容积率	轨道交通站域范围内容积率	3.533	2.429
	土地利用混合度	轨道交通站域范围内土地利用混合度	0.725	0.163
	道路交叉口数	轨道交通站域范围内道路交叉口数/个	20.081	10.689
	餐饮设施数	轨道交通站域范围内餐饮设施数/个	292.904	326.151
	风景名胜地数	轨道交通站域范围内风景名胜地数/个	5.997	11.630
	公司企业数	轨道交通站域范围内公司企业数/个	148.145	160.354
	购物中心数	轨道交通站域范围内购物中心数/个	562.937	758.336
	科教文化机构数	轨道交通站域范围内科教文化机构数/个	101.910	106.463
	生活服务设施数	轨道交通站域范围内生活服务设施数/个	324.754	338.650
	休闲体育设施数	轨道交通站域范围内休闲体育设施数/个	54.445	58.260
	医疗设施数	轨道交通站域范围内医疗设施数/个	67.368	65.184
	到城市中心的距离	轨道交通站点到城市中心的距离/m	9 984.171	5 796.117
	到城市副中心的距离	轨道交通站点到最近城市副中心的距离/m	5 566.359	4 764.569
	停车场数	轨道交通站域范围内停车场数/个	78.481	80.540
	公交站点数	轨道交通站域范围内公交站点数/个	12.480	7.927
	站点开通时间	轨道交通站点开通时间/月	45.687	41.791
	换乘站	虚拟变量, 是=1, 否=0	0.084	0.277
	终点站	虚拟变量, 是=1, 否=0	0.084	0.277
	出入口数	轨道交通站点出入口个数/个	5.172	3.384
	全局可达性	轨道交通站点全局可达性, 利用Pajek计算	39.928	12.333
	中介中心性	轨道交通站点中介中心性, 利用Pajek计算	0.093	0.101
	接近中心性	轨道交通站点接近中心性, 利用Pajek计算	4.085	11.889
	房价	轨道交通站域范围内二手房交易均价/万元	1.521	6.288

资料来源:笔者自制。

型优于随机效应模型,同时F检验结果进一步验证了该选择。由于固定效应模型中会自动剔除不随时间变化的变量,因而考察变量中道路交叉口数、到城市中心的距离与到城市副中心的距离3个变化被自动删除了。在模型估计前,对保留的变量采用方差膨胀系数(VIF)检验多重共线性(见表2)。结果显示,最大VIF为5.43,平均VIF为2.57,均小于10,表明解释变量不存在严重的多重共线性问题。

考虑到道路交叉口密度、到城市中心的距离及到城市副中心的距离也是影响城市轨道交通站点客流的重要因素,故而使用Pearson相关系数探究3个变量与不同群体在工作日和周末城市轨道交通客流的相关性。通过表3可知,道路交叉口数对不同人群城市轨道交通客流在工作日及周末均呈现显著的正向影响,这对应现有大多数研究结果^[18]。此外,通过对比道路交叉口数对不同群体站点客流影响的相关性系数可以发现,道路交叉口数对残疾人轨道交通客流的影响最大,其次为老年人,且均远高于其他人群。这表明对残疾人及老年人而言,城市轨道交通站点可达性对其是

否选择轨道交通出行的影响大于其他人群,这与美国及英国等地针对残疾人及老年人的研究结果一致^[19-21]。城市轨道交通站点到城市中心的距离及到城市副中心的距离对不同群体轨道交通站点客流在工作日及周末均呈现显著的负向影响,这与现有研究一致^[22],城市中心及副中心仍占据城市就业、商业及娱乐的主导地位。通过进一步对比相关性系数可以发现,工作日轨道交通站点到城市中心的距离对不同群体轨道交通站点客流的负向影响均大于到城市副中心的距离的影响,这表明城市中心的吸引力度要强于城市副中心。

2 结果与分析

2.1 出行特征分析

2.1.1 出行客流演变特征

图3显示了2014—2019年武汉市不同群体在工作日和周末轨道交通站点平均客流的变化。在此期间,随着轨道交通线网由“工字型”向网络化转变,全市工作日平均客流由

184万人次增至473万人次,周末平均客流从207万人次增至485万人次。其中,2018年至2019年间轨道交通客流上涨最为显著,这是因为2018年武汉市轨道交通网络完成了环状结构的建设,网络出行效率提升最为显著,对客流的吸引力度也最大^[23]。从特定人群来看,所有群体轨道交通客流也呈现出显著的增长,但涨幅在工作日与周末存在一定差异。其中,受工作日工作的影响及周末部分人员无需工作,通勤人员工作日客流增幅显著高于周末^[24]。老年人与残疾人整体上也呈现工作日客流大于周末的趋势,但差异显著小于通勤人员。可能的原因是部分老年人与残疾人周末选择在家陪伴家人,因而轨道交通出行客流相对较低^[25]。相反地,中小学生周末客流则明显大于工作日。

2.1.2 出行频率演变特征

图4显示了不同群体2014—2019年在工作日和周末轨道交通出行频率的变化。其中,残疾人与老年人出行频率在工作日和周末均显著提升。这可能是由于轨道交通线网的不断

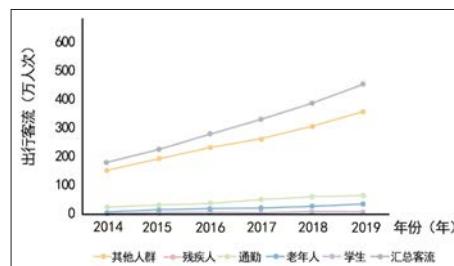
表3 Pearson相关系数结果一览表

Tab.3 Pearson correlation coefficient results

被解释变量	道路交叉口数	到城市中心距离	到城市副中心距离
老年人工作日客流	0.266**	-0.424**	-0.374**
残疾人工作日客流	0.387**	-0.336**	-0.350**
通勤人员工作日客流	0.122**	-0.456**	-0.441**
中小学生工作日客流	0.187**	-0.303**	-0.301**
其他人群工作日客流	0.157**	-0.379**	-0.375**
老年人周末客流	0.262**	-0.403**	-0.362**
残疾人周末客流	0.378**	-0.314**	-0.332**
通勤人员周末客流	0.168**	-0.425**	-0.426**
中小学生周末客流	0.211**	-0.367**	-0.341**
其他人群周末客流	0.122**	-0.316**	-0.328**

注:“**”表示在0.01级别(双尾),相关性显著。

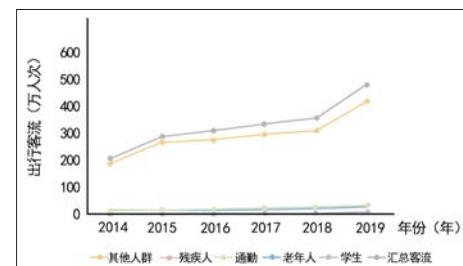
资料来源:笔者自制。



a 工作日各群体出行客流

图3 不同群体出行客流变化图

Fig.3 Passenger flow changes by population groups



b 周末各群体出行客流

资料来源:笔者自绘。

完善,使得目的地可达性大幅提升,加之武汉市对残疾人及老年人群体的优惠政策,大幅提升了残疾人与老年人轨道交通出行意愿。通勤人员与其他人群出行频率则相对稳定。其中,通勤人员在工作日和周末的出行频率分别稳定在2.15次与1.93次左右,这与工作日通勤人员刚性出行需求相关。相比而言,中小学生出行频率下降显著,这与武汉市轨道交通线网布局有关,2014年开通的轨道交通1号线、2号线与4号线联系了武汉市主要的学区,中小学生轨道交通出行以通学出行为主,因而出行频率相对较高。随着轨道交通线网覆盖率的不断提升,不同目的出行的比例逐渐上升,但出行频率逐步下降。

2.1.3 出行时刻演变特征

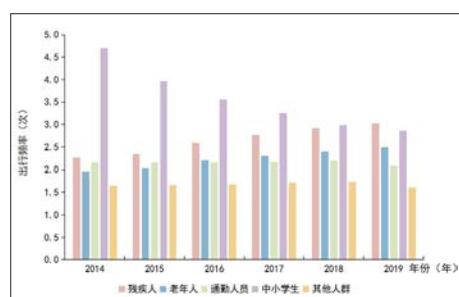
图5显示了不同群体2014—2019年在工

作日和周末轨道交通出行时刻的变化情况。虽然不同群体轨道交通客流在6年间不断增长,但由于居民出行具有高度的时空规律性^[26],因此出行时刻整体呈现类似的趋势。具体来看,通勤人员与中小学生在工作日呈现出显著的早晚双峰特征,通勤人员早高峰集中在7:00—9:00,中小学生集中在7:00—8:00,晚高峰则都集中在17:00—19:00,这一特征与工作日上班及上学时间相对应。在周末,通勤人员出行特征仍呈现早晚双峰特征,但其他时段出行人数显著增加。这是由于部分人员在周末无需工作或无特定时间的强制规定,进而导致其他时段出行人数上升。周末由于大部分中小学生无需上学,因而出行时刻呈无序分散分布。相比而言,残疾人与老年人在工作日出行时刻虽也具有一定早晚双峰特征,但出行时刻更为

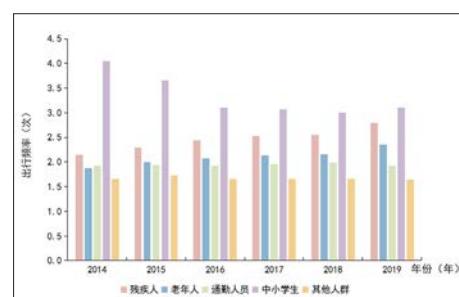
分散,整体上呈现出与城市早晚高峰错峰出行的特征。这可能是残疾人与老年人时间相对自由,出于安全考虑,大部分老年人选择避开城市高峰期。此外,残疾人与老年人在18:00以后轨道交通客流迅速下降,这表明残疾人与老年人更倾向于在白天出行,夜间出行较少。对其他人群,在工作日也呈现出一定双峰特征,在周末并无明显的早高峰,但仍存在短时期的晚高峰。

2.1.4 出行距离演变特征

通过不同群体轨道交通出行OD链,基于轨道交通线网数据,计算了不同群体在2014—2019年轨道交通站到站出行的实际距离。图6反映了不同群体平均出行距离的演变,从图中可以发现,其他群体出行距离最长,中小学生出行距离最短。不同群体整体均呈现周末出行距离大于工作日的特征,且随着轨道交通的不断完善,不同群体出行距离在工作日与周末均呈现稳步增长的趋势。从增长幅度来看,中小学生增长幅度最小,且工作日(979 m)增幅超过周末(651 m)。这表明随着轨道交通网络覆盖率的不断提升,越来越多的中小学生选择轨道交通进行通学出行。相比而言,其他群体出行距离增幅均超过2 000 m,且周末的增幅均大于工作日。工作日与周末出行的差异与青岛、南京等地的研究结论一致^[27-28]。在工作日,大部分群体受到工作、照顾家庭等因素的



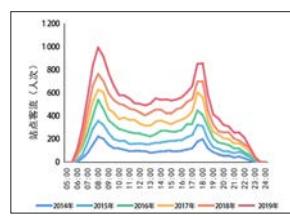
a 工作日各群体出行频率



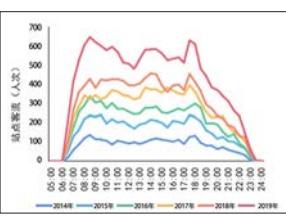
b 周末各群体出行频率

Fig.4 Travel frequency variation by population groups
资料来源:笔者自绘。

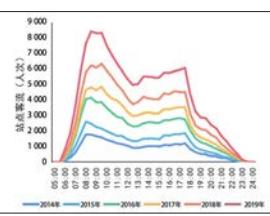
资料来源:笔者自绘。



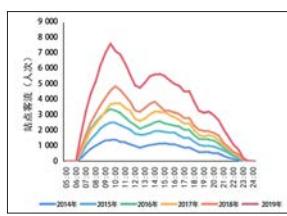
a 残疾人工作日



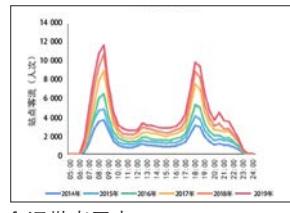
b 残疾人周末



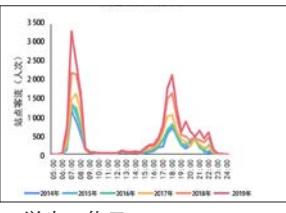
c 老年人工作日



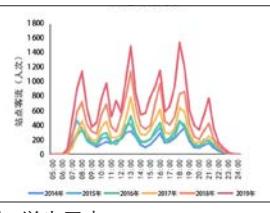
d 老年人周末



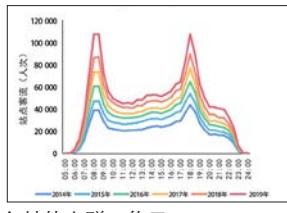
f 通勤者周末



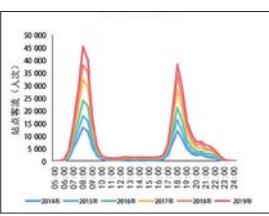
g 学生工作日



h 学生周末



i 其他人群工作日



j 其他人群周末

Fig.5 Travel time shift patterns by population groups
资料来源:笔者自绘。

资料来源:笔者自绘。

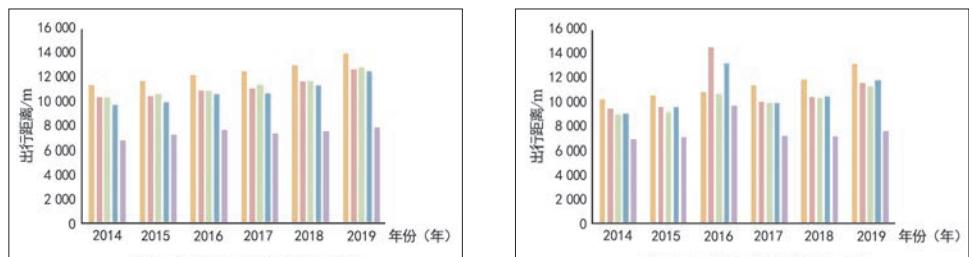
影响,出行范围受到一定限制,致使出行距离相对较短。在特定群体中,老年人在工作日及周末出行距离的增长幅度均大于通勤人员及残疾人。这证实了过往对老年人出行需求的判断,随着老年人受教育程度的提高及身体健康状况的改善,当今老年人的出行意愿比以往任何时候都要强烈^[29]。因此,在老龄化不断加剧的背景下,未来交通规划过程中,应重点考虑适老化交通设施的配置。相比而言,残疾人出行距离的增长幅度则较小,这可能是由于残疾人的生理特征的限制,使得残疾人活动范围相对较小^[30]。

2.1.5 出行时长演变特征

基于轨道交通出行OD链,通过个人进出轨道交通站点时间计算居民轨道交通出行时长,图7显示了不同群体在2014—2019年平均出行时长的变化特征。从图中可以发现,中小学生出行时长最短,其他人群出行时长最长,出行时长整体也呈现出周末大于工作日的特征。从出行时长的增幅来看,其他人群出行时长增幅最为显著,中小学生出行时长增幅最小。此外,通过居民出行时长的人数分布统计发现,2014—2019年间,所有群体80%以上的出行时长集中在45 min以内,这与北京、深圳等地轨道交通出行时间特征类似^[31-32]。出行时间预算理论(travel time budgets)虽然在过去存在长期的争议,但武汉市轨道交通出行时长的变化支持该理论,即人们愿意花在日常出行的时间往往是稳定的。即使在2014—2019年间,武汉市城市规模迅速扩张、轨道交通网络里程大幅增长、居民出行距离大幅增长,但出行时间增长较为缓慢,且都稳定在45 min以内。

2.2 建成环境对轨道交通站点客流的影响

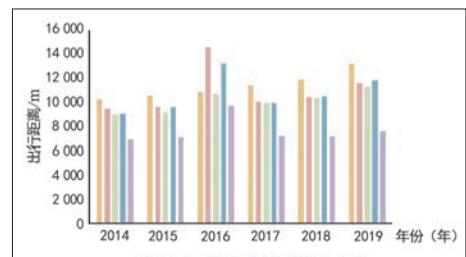
表4和表5给出了基于非平衡面板数据固定效应模型的各自变量对不同群体城市轨道交通站点客流在工作日和周末的回归拟合系数的结果。总体来看,所有模型R²均达到了0.85以上,R²Adjust也均在0.80以上,这表明所有模型结果拟合较好。



a 工作日各群体出行距离

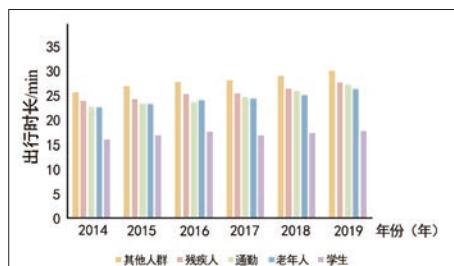
图6 不同群体出行距离变化图

Fig.6 Travel distance variation by population groups



b 周末各群体出行距离

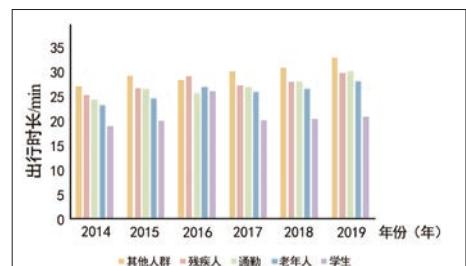
资料来源:笔者自绘。



a 工作日各群体出行时长

图7 不同群体出行时长变化图

Fig.7 Travel duration variation by population groups



b 周末各群体出行时长

资料来源:笔者自绘。

表4 工作日非平衡面板数据结果

Tab.4 Results for unbalanced panel data on weekdays

变量	模型1:老年人	模型2:残疾人	模型3:通勤人员	模型4:中小学生	模型5:其他人群
常住人口	0.041**	0.003	0.036	0.011**	0.771**
容积率	3.607	0.512	42.584	5.122**	86.989
土地利用混合度	-87.530	17.762	985.377	13.686	1 053.746
餐饮设施数	0.130	0.043**	0.604	0.090**	8.406**
风景名胜数	5.549	1.874	-27.214	-1.924	-286.431**
科教文化设施	-0.376	-0.088	5.604**	0.469**	-2.240
生活服务设施	-12.611	-0.964	228.382*	3.492	438.869
休闲娱乐设施	-41.063	-3.085	135.770*	-4.202	-19.333
公司企业	-0.102	-0.072*	1.737**	-0.127**	-6.495
购物中心	0.481***	0.071***	-0.333	0.028	-1.227
医疗设施	-0.710	-0.235	0.159	-1.264**	15.470
公交站点数	4.891	0.936	-11.743	0.289	-45.225
停车场	3.623***	0.464	6.979**	0.113	23.880**
换乘站	467.080***	47.942	149.993	78.302**	4 195.173***
始终站	-59.048	-10.331	189.211	-8.265	4 138.782**
出入口数	-5.094	0.365	-12.331	-2.607	559.684*
开通时间	172.826***	32.023***	693.988**	33.457***	3 842.299***
中介中心性	-436.664	-71.047*	-96.680	-102.062*	4 206.959
接近中心性	-0.824	0.127	-1.530	0.800*	-4.610
全局可达性	-21.619***	-2.879***	-8.510	-4.817***	-100.727
房价	-0.001	0.000	0.026**	-0.001	0.069
Cons	257.213	25.979	-2 501.675	-21.086	-16 894.030
R ²	0.937	0.933	0.933	0.934	0.957
R ² Adjust	0.914	0.908	0.908	0.910	0.942

注:“*”表示p<0.1,“**”表示p<0.05,“***”表示p<0.001。

资料来源:笔者自制。

表5 周末非平衡面板数据结果

Tab.5 Results for unbalanced panel data on weekends

变量	模型6:老年人	模型7:残疾人	模型8:通勤人员	模型9:中小学生	模型10:其他人群
常住人口密度	0.018	0.001	0.020	0.015**	1.142**
容积率	10.984	1.022	10.339	4.099	22.704
土地利用混合度	-162.697	14.770	208.050	-79.249	-3 469.693
餐饮设施数	0.388**	0.041**	0.405**	0.082*	16.264**
风景名胜数	4.737	2.605**	-0.450	3.089	-257.593
科教文化设施	-0.897	-0.117	1.583	0.464**	-13.598
生活服务设施	-14.482	-0.838	107.794**	-5.527	304.359
休闲娱乐设施	-18.746	-0.493	65.200**	-6.552	215.147
公司企业	-0.677**	-0.105**	0.214	-0.139	-22.342**
购物中心	0.388***	0.066***	0.213*	0.047*	-2.014
医疗设施	0.103	-0.183	-1.164	-2.464***	43.979
公交站点数	3.723	0.716	-1.267	-0.009	-42.326
停车场	1.822**	0.302***	3.073***	0.350*	-15.045
换乘站	409.489***	41.440***	168.346*	137.362***	4 069.397**
终点站	115.698	4.783	75.480	-4.748	7 856.056**
出入口数	2.841	0.318	-4.297	-10.985	593.646
开通时间	132.360***	27.929***	355.373***	16.461	4 418.530***
中介中心性	-386.418	-50.383	101.790	-194.755**	2 278.200
接近中心性	0.565	0.324	0.310	0.746	38.115
全局可达性	-21.823**	-2.533***	-14.376**	-5.700***	-250.028**
房价	0.000	0.000	0.009*	-0.001	0.048
Cons	1 014.224	77.913	-892.003	123.614	-15 604.370
R ²	0.938	0.928	0.932	0.872	0.957
R ² Adjust	0.915	0.901	0.907	0.826	0.941

注：“*”表示p<0.1，“**”表示p<0.05，“***”表示p<0.001。

资料来源：笔者自制。

从建成环境要素对不同群体站点客流的影响来看,不同要素对不同群体地铁客流的影响存在显著差异,对同一人群的影响在工作日和周末也呈现出一定差异。具体来看,常住人口密度对轨道交通站点客流总体呈现出显著的正向影响。其中,对中小学生及其他人群轨道交通站点客流在工作日和周末均存在显著的正向影响,对老年人工作日轨道交通站点客流也呈现显著的正向促进作用。相比而言,容积率与土地利用混合度则对大多数人群站点客流没有显著的作用。轨道交通站域范围内各种设施方面,餐饮设施数在工作日对残疾人、中小学生及其他人群站点客流具有正向显著促进作用,在周末对所有人群站点客流均具有正向促进作用。风景名胜数则对大多数群体站点客流影响较小。科教文化设施对中小学生客流在工作日及周末均呈现显著的正向影响,对通勤人员工作日客流也有正向影响。生活服务设施及休闲娱乐设施对通勤人员站点客流在

工作日及周末均具有显著的正向促进作用,对其他群体则没有显著影响。公司企业数对通勤人员工作日站点客流具有显著促进作用,对其他人群则不存在正向影响。购物中心在工作日对老年人及残疾人地铁客流具有正向影响,在周末对大多群体也具有显著正向影响。医疗设施数对不同群体站点客流没有显著的促进作用,对中小学生站点客流在工作日及周末均呈现显著的负向影响。此外,轨道交通站点周边停车场数对大多数群体站点客流具有显著的促进作用,但站域范围内公交站点数对不同人群站点客流没有显著影响。

轨道交通站点特征对城市轨道交通站点客流的影响在不同群体间及工作日和周末间也存在一定差异。具体地,换乘站点几乎对所有群体站点客流在工作日和周末均呈现显著的正向影响。终点站对其他人群在工作日和周末均呈现显著的正向影响,但对老年人、残疾人、通勤人员及中小学生等特定人群则无显著

的影响。出入口数量对其他群体工作日站点客流具有显著的正向影响,但对老年人、残疾人及中小学生等特定群体并无显著的正向作用。轨道交通站点开通时间总体上对不同群体工作日及周末客流均具有促进作用。轨道交通网络特征方面,中介中心性与接近中心性对不同群体站点客流没有显著的促进作用,全局可达性与大部分群体站点客流均呈现显著的负向影响。此外,社会经济属性特征方面,房价对通勤人员站点客流具有显著的影响,但对老年人、残疾人、中小学生及其他人群均没有显著的影响。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文使用2014—2019年轨道交通刷卡数据,系统分析不同群体轨道交通出行时空特征的变化,并利用非平衡面板数据模型建立纵向数据,探索建成环境对轨道交通站点客流的影响机制,深入挖掘建成环境要素在不同群体间以及在工作日和周末的差异。主要结论如下:

第一,各群体在轨道交通出行方面展现了显著的时空特征差异。随着轨道交通网络的完善,老年人与残疾人出行频率增长显著,通勤人员与其他群体相对稳定,中小学生则略微下降。在空间维度上,其他群体的出行距离最长,中小学生出行距离最短且增长幅度最小。值得注意的是,老年人在出行距离增长方面显著超过通勤人员及残疾人群体。在时间维度上,中小学生的出行时间最短且增幅最小,而其他人群的出行时长最长且增幅最为显著。这些发现系统揭示了城市轨道交通使用模式的群体异质性,为深入了解各群体的出行需求和行为特征提供了有力依据。

第二,建成环境要素对各群体轨道交通出行具有显著影响且存在群体异质性和时间差异。具体而言:科教文化设施对中小学生和通勤人员在工作日及周末的出行产生了积极影响;公司企业数主要影响通勤人员工作日的出行,而对残疾人、老年人、中小学生产生了一定的负面影响;购物中心对老年人及残疾人工作

作日的客流,以及所有人群的周末客流均具有显著正向影响。研究还发现,常住人口密度、交叉口密度、停车场数量、餐饮设施数对所有人群均具有显著的积极影响。值得注意的是,土地利用混合度、容积率、风景名胜设施数、公交站点数量、医疗设施数的影响并不显著。其中医疗设施数甚至对中小学生的出行产生抑制作用。这些发现深入揭示了建成环境要素与轨道交通出行行为之间复杂且多样的群体差异性关系,为实施差异化的城市空间规划和交通需求管理的精准施策提供了重要的实践指导。

第三,站点特征和社会经济属性的影响也存在群体异质性。具体而言,终点站仅对其他人群的工作日和周末客流产生积极影响;房价主要对通勤人员具有正向影响。换乘站作为轨道交通网络的关键节点,对所有人群的出行均产生了显著影响。而出入口数仅对其他人群产生显著正向影响,对老年人、通勤人员、中小学生甚至产生了负面效应。

3.2 讨论

鼓励不同群体使用轨道交通可以减少对汽车的依赖和交通拥堵等城市问题,从而提高交通公平性^[33]。本文以武汉市为例,聚焦于不同群体轨道交通出行时空特征及其与建成环境的互动关系。研究发现,建成环境等要素对各群体的轨道交通出行影响既具有共性特征,又存在显著差异。具体而言,常住人口密度、交叉口密度、停车场数量、餐饮设施数、换乘站对所有人群均呈现显著的积极影响,这为推行紧凑型开发、优化站点周边步行网络、完善停车换乘设施的布局、强化站点商业服务功能配套和提升换乘体验等干预措施提供了科学依据。同时,人口密度对各群体出行的积极影响也对交通系统的高效性、便捷性等方面提出了更高的要求。然而,与大多基于截面数据的研究不同的是,土地利用混合度、容积率、风景名胜设施数、公交站点数量对所有群体的影响并不显著。这一发现提示我们,在建成环境的优化过程中,应避免对单一指标的过度追求,而应建立动态适应的调控机制,持续调整和优化环境

干预策略^[34]。尤其值得注意的是,不同群体对建成环境要素的响应存在明显差异,因此需要采用“需求响应型”的优化策略,以实现差异化设施建设和服务供给。例如,老年人、残疾人等交通弱势群体对换乘站、道路交叉口设施的依赖显著高于普通人群。因此,优化站域范围内的步行环境并完善无障碍设施,尤其是换乘枢纽的相关设施,对于增强轨道交通对这类群体的吸引力、建设包容性轨道交通至关重要^[35]。同时,针对中小学生群体在轨道交通出行中受企业设施和医疗设施布局负面影响的问题,在规划中应尽量避免在大型医院或企业聚集区的影响范围内布局教育设施,以减少对学生出行的潜在干扰。这些发现为制定差异化的交通政策、建设更具包容性的轨道交通系统提供了重要启示,也凸显了基于群体需求特征实施精准化环境干预的必要性。

基于面板数据,本文探究了不同群体轨道交通站点出行的时空变化特征及其与建成环境的关系,为优化站域建成环境、提升交通公平提供了更为细致的参考。然而,研究还可以进一步拓展和深化。具体而言:可以更加细致地划分站域范围,深入解析不同空间尺度下建成环境要素对轨道交通出行的差异化影响;同时,可以探索不同群体轨道交通出行与建成环境之间的非线性关联,以更准确地揭示两者间复杂的关系。此外,还应重点关注轨道交通与站域建成环境的交互作用,深入分析这种交互作用如何影响不同群体的出行行为。这些深入的研究将为优化站域建成环境、提升交通公平提供更为全面和细致的参考。■

参考文献 References

- [1] FU F, JIA X, ZHAO Q, et al. Predicting land use change around railway stations: an enhanced CA-Markov model[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 101: 105138.
- [2] 夏正伟, 张烨, 徐磊青. 轨道交通站点区域TOD效能的影响因素与优化策略[J]. 规划师, 2019, 35 (22) : 5-12.
XIA Zhengwei, ZHANG Ye, XU Leiqing. Influencing factors and improvement strategies of TOD performance in rail transit station area[J]. Planners, 2019, 35(22): 5-12.
- [3] AN D, TONG X, LIU K, et al. Understanding the impact of built environment on metro ridership using open source in Shanghai[J]. Cities, 2019, 93: 177-187.
- [4] 张艳, 曹康, 何奕苇, 等. 土地使用与轨道交通的空间适配探讨——深圳地铁2号线的实证分析[J]. 城市规划, 2017, 41 (8) : 107-115.
ZHANG Yan, CAO Kang, HE Yiwei, et al. Discussion on spatial match between land use and rail transit: a case study of Shenzhen subway line 2[J]. City Planning Review, 2017, 41(8): 107-115.
- [5] BEILER M O, MOHAMMED M. Exploring transportation equity: development and application of a transportation justice framework[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 47: 285-298.
- [6] 张军, 王桐远. 城市交通系统发展的公平性研究及其实证分析[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37 (3) : 258-263.
ZHANG Jun, WANG Tongyuan. Study on fairness of urban transportation system development and empirical analysis[J]. World Sci-Tech R&D, 2015, 37(3): 258-263.
- [7] 张莉杰, 董俊武, 王艳慧. 公共交通资源配置空间公平性评价及其影响机理分析——以武汉市主城区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39 (4) : 63-71.
ZHANG Lijie, DONG Junwu, WANG Yanhui. Spatial equity evaluation and influence mechanism analysis of public transportation resource allocation: a case study of the main urban area of Wuhan[J]. Geography and Geo-Information Science, 2023, 39(4): 63-71.
- [8] 黄建欣, 龚蔚霞, 张金林, 等. 城市轨道交通站点周边建成环境对地铁客流量的影响研究——以深圳市为例[J]. 上海城市规划, 2023 (6) : 47-54.
HUANG Jianxin, GONG Weixia, ZHANG Jinlin, et al. Impact of built environment of urban rail transit stations on metro passenger flow: a case study of Shenzhen[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2023(6): 47-54.
- [9] 杨林川, 唐祥龙, 刘吉祥. 积极应对人口老龄化战略下适老化出行的建成环境研究[J]. 上海城市规划, 2022 (1) : 156-162.
YANG Linchuan, TANG Xianglong, LIU Jixiang. Examining the built environment suitable for the elderly's travel under the background of the national strategy "actively addressing population aging"[J]. Shanghai Urban Planning Review,

- 2022(1): 156-162.
- [10] 任鹏,彭建东,杨红,等.武汉市轨道交通站点周边地区职住平衡与建成环境的关系研究[J].地球信息科学学报, 2021, 23 (7) : 1231-1245.
REN Peng, PENG Jiandong, YANG Hong, et al. Relationship between jobs-housing balance and built environment in areas around urban rail transit stations of Wuhan[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(7): 1231-1245.
- [11] EWING R, GREENWALD M, ZHANG M, et al. Traffic generated by mixed-use developments—six-region study using consistent built environmental measures[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2011, 137(3): 248-261.
- [12] 崔叙,喻冰洁,杨林川,等.城市轨道交通出行的时空特征及影响因素非线性机制——基于梯度提升决策树的成都实证[J].经济地理, 2021, 41 (7) : 61-72.
CUI Xu, YU Bingjie, YANG Linchuan, et al. Spatio-temporal characteristics and non-linear influencing factors of urban rail transit: the case of Chengdu using the gradient boosting decision tree[J]. Economic Geography, 2021, 41(7): 61-72.
- [13] DENG Y, ZHAO P. The impact of new metro on travel behavior: panel analysis using mobile phone data[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2022, 162: 46-57.
- [14] DONG S, WANG Y, WANG C, et al. Discovering the nonlinear association between the built environment and metro ridership: global and local perspectives[J]. Cities, 2026, 169: 106561.
- [15] BALTAGI B, SHU J. Spatial dynamic panel data model with interactive fixed effects and time-variant endogenous spatial weight matrices[J]. Econometrics and Statistics, 2025[2025-10-18]. <https://doi.org/10.1016/j.ecosta.2025.09.004>.
- [16] POTTS D, WEIDENSAGER L. ANOVA-boosting for random Fourier features[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2025, 79: 101789.
- [17] 许志榕.上海市职住关系和通勤特征分析研究——基于轨道交通客流数据视角[J].上海城市规划, 2016 (2) : 114-121.
XU Zhirong. Study on job-housing relationship and characteristic of commuting in Shanghai: based on the perspective of rail transit passenger flow data[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2016(2): 114-121.
- [18] 崔叙,喻冰洁,梁朋朋,等.基于“客流—用地”的城市轨道交通站点类型识别与空间再平衡研究——以成都市为例[J].现代城市研究, 2021 (7) : 68-79.
CUI Xu, YU Bingjie, LIANG Pengpeng, et al. Urban rail transit station type identification and job-housing spatial rebalancing based on passenger flow and land use: taking Chengdu as an example[J]. Modern Urban Research, 2021(7): 68-79.
- [19] ALLAHVIRANLOO M, LE PRIOL E. 1985 - A methodology on quantifying spatial-temporal disparities in travel behavior of mobility-impaired travelers with non-disabled travelers: case studies of London and New York[J]. Journal of Transport & Health, 2017, 5: S31.
- [20] SCHMÖCKER J D, QUDDUS M A, NOLAND R B, et al. Mode choice of older and disabled people: a case study of shopping trips in London[J]. Journal of Transport Geography, 2008, 16(4): 257-267.
- [21] CAO X, MOKHTARIAN P L, HANDY S L. Neighborhood design and the accessibility of the elderly: an empirical analysis in Northern California[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2010, 4(6): 347-371.
- [22] ZHAO J, DENG W, SONG Y, et al. What influences metro station ridership in China? Insights from Nanjing[J]. Cities, 2013, 35: 114-124.
- [23] PENG J, CUI C, QI J, et al. The evolution of rail transit network structure and impact on travel characteristics: a case study of Wuhan[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(11): 789.
- [24] 杨红,申犁帆,胡议文,等.老年人地铁出行时空特征及与建成环境非线性关系——以武汉市为例[J].地理科学进展, 2023, 42 (3) : 491-504.
YANG Hong, SHEN Lifan, HU Yiwen, et al. Spatial and temporal characteristics of elderly people's metro travel behavior and its non-linear relationship with the built environment: a case study of Wuhan City[J]. Progress in Geography, 2023, 42(3): 491-504.
- [25] FENG J, DIJST M, WIJSINK B, et al. Elderly co-residence and the household responsibilities hypothesis: evidence from Nanjing, China[J]. Urban Geography, 2015, 36(5): 757-776.
- [26] 陈小鸿,周翔,乔瑛瑶.多层次轨道交通网络与多尺度空间协同优化——以上海都市圈为例[J].城市交通, 2017, 15 (1) : 20-30.
CHEN Xiaohong, ZHOU Xiang, QIAO Yingyao. Coordination and optimization of multilevel rail transit network and multi-scale spatial layout: a case study of Shanghai metropolitan area[J]. Urban Transport of China, 2017, 15(1): 20-30.
- [27] SHAO F, SUI Y, YU X, et al. Spatio-temporal travel patterns of elderly people – a comparative study based on buses usage in Qingdao, China[J]. Journal of Transport Geography, 2019, 76: 178-190.
- [28] FENG J. The influence of built environment on travel behavior of the elderly in urban China[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 52: 619-633.
- [29] 汪光焘,王继峰,赵珺玲.新时期城市交通需求演变与展望[J].城市交通, 2020, 18 (4) : 1-10.
WANG Guangtao, WANG Jifeng, ZHAO Junling. Evolution of urban travel demand in the new era[J]. Urban Transport of China, 2020, 18(4): 1-10.
- [30] PARK K, ESFAHANI H N, NOVACK V L, et al. Impacts of disability on daily travel behaviour: a systematic review[J]. Transport Reviews, 2023, 43(2): 178-203.
- [31] ZHOU M, WANG D, GUAN X. Co-evolution of the built environment and travel behaviour in Shenzhen, China[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 107: 103291.
- [32] HUANG J, LEVINSON D, WANG J, et al. Tracking job and housing dynamics with smartcard data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(50): 12710-12715.
- [33] LUCAS K. Transport and social exclusion: where are we now?[J]. Transport Policy, 2012, 20: 105-113.
- [34] ZHU H, PENG J, DAI Q, et al. Exploring the long-term threshold effects of density and diversity on metro ridership[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 128: 104101.
- [35] 孙超,王波,张云龙,等.基于通用设计思考的深圳市无障碍交通体系规划探索[J].城市规划学刊, 2012 (3) : 63-69.
SUN Chao, WANG Bo, ZHANG Yunlong, et al. A preliminary study on barrier-free transport system in Shenzhen based on universal design concepts[J]. Urban Planning Forum, 2012(3): 63-69.