

上海市早高峰轨道交通缓挤的时空行为规划策略研究*——以轨道交通9号线为例

Study on Spatio-Temporal Behavior Planning Strategies for Alleviating Morning Peak Congestion in Shanghai's Urban Rail Transit: A Case Study of Metro Line 9

陈子浩 罗歆兰 王德 游智敏 周新刚 CHEN Zihao, LUO Xinlan, WANG De, YOU Zhimin, ZHOU Xin'gang

摘要 针对上海市严峻的轨道交通高峰客流拥挤问题,在时空行为规划框架下进行缓挤策略研究。以轨道交通9号线为例,利用智能卡数据模拟乘客出行时空轨迹,基于拥挤形成的时空过程视角识别轨道交通拥挤情况,划分拥挤类型,并追溯拥挤客流的来源与去向。同时,深入挖掘乘客的出行目的、出行规律和出行约束等出行特征。在此基础上,针对不同出行特征人群提出信息推荐、预约进站、调整上班时间以及转移就业岗位等时间、空间和行为策略,并定量评估策略实施的缓挤潜力,为治理城市轨道交通拥挤问题提供可借鉴的视角、方法和策略。

Abstract In response to the severe congestion problem during peak passenger flow in Shanghai's urban rail transit, this paper conducts a study on decongestion strategies under the framework of spatio-temporal behavior planning. Taking Metro Line 9 as an example, we use smart card data to simulate passengers' spatio-temporal travel trajectories, identify the congestion situation in urban rail transit, divide the types of congestion, and trace the sources and destinations of congested passenger flow from the perspective of the spatio-temporal process of congestion formation. At the same time, we deeply mine the travel characteristics of passengers, such as travel purposes, travel patterns, and travel constraints. On this basis, we propose temporal, spatial, and behavior strategies such as information recommendation, reservation for entry, adjustment of work time, and job relocation for different travel characteristic groups, and quantitatively evaluate the congestion mitigation potential of strategy implementation, providing perspectives, methods, and strategies for reference of managing urban rail transit congestion.

关键词 时空行为规划;时空过程视角;城市轨道交通拥挤;缓挤策略;轨道交通9号线

Key words spatio-temporal behavior planning; spatio-temporal process perspective; urban rail transit congestion; decongestion strategy; Metro Line 9

文章编号 1673-8985 (2024) 04-0132-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20240418

作者简介

陈子浩
同济大学建筑与城市规划学院
博士研究生

罗歆兰
同济大学建筑与城市规划学院
硕士研究生

王德 (通信作者)
同济大学建筑与城市规划学院
教授,博士生导师, dewang@tongji.edu.cn

游智敏
同济大学建筑与城市规划学院
硕士研究生

周新刚
同济大学建筑与城市规划学院
副教授,博士生导师

0 引言

城市轨道交通以其高效、经济、可持续等优势,成为全球众多城市缓解地面交通压力、提升出行品质的重要交通方式。但随着客流需求的急剧增长,某些站点、区段出现供给与需求极不平衡的状况,客流拥挤成为当前城市轨道交通面临的突出问题。这不仅严重降低了公共交通服务水平,增加了个体出行

*基金项目:国家自然科学基金课题“时空行为规划的框架、方法与实证研究”(编号52378069)资助。

的不确定性,还会促使居民向私人交通方式转移,不利于低碳交通与可持续发展,甚至可能引发踩踏、坠轨等事故,造成重大人员伤亡和公共安全危机^[1]。上海同样面临严峻的轨道交通高峰客流拥挤问题,1号线北段、9号线西段等区段在工作日高峰时段显著拥挤,车厢内立席密度最高超过10人/m²^[2]。为此,上海市针对局部拥挤站点采取了进站限流策略,但效果有限^①。其局限性在于,城市轨道交通站点(车厢)的拥挤并非单纯由进站客流集聚所导致,而是受到所有拥挤时段在站乘客的共同影响。对于车内拥挤,车厢内的立席密度显然与车厢内的途经乘客有关;对于车外拥挤,站台候车人数同样取决于车厢内的剩余容量,即途经乘客的数量。

笔者认为,拥挤客流具有不在场的形成原因和复杂的传导过程,对拥挤的认识与优化难以在拥挤发生的局部时空区段中实现。早在拥挤发生前,客流就已经于不同空间产生,并且将在拥挤发生后的不同时间到达不同空间。究其本源,乘客出发与到达的时间、空间,实际代表了城市中不同的功能与活动,这些功能与活动对乘客的出行行为进行了制约,使其必定在特定时间经过特定空间。不同客流因不同功能活动的制约汇聚于同一时空,当总流量超出最大承载能力时,便发生了拥挤(见图1)。因此,若要更深入、准确地认识拥挤现象,就必须还原拥挤客流中所有个体完整的出行时间、空

间及行为特征信息,对拥挤形成的全过程进行分析。

城市时空行为规划将影响城市空间问题的时间、空间和行为要素共同纳入,作为分析和解决问题的手段,避免“就空间论空间问题”的局限性^[3]。日益丰富的城市时空大数据和不断完善的数据挖掘方法,为时空行为研究及其规划应用提供了数据支撑和技术基础。通过对拥挤客流的全过程分析,掌握其时空行为特征与规律,便能从局限于拥挤区段的空间限流策略,拓展出面向全局的空间、时间、行为的多元策略。本文在时空行为规划框架下,利用记录乘客出行时空信息的公交智能卡数据,深入认识乘客轨道交通出行中时间、空间与行为特征及其互动关系,从行为引导、时间政策与空间管理3个方面进行轨道交通缓挤策略的探索性研究。

1 文献综述

若将完整的城市轨道交通缓挤研究分为拥挤认识分析与策略响应评估两个步骤,现有多数研究仅局限于其中一个环节,尚未有研究形成完整的问题分析和规划应用框架。

在对拥挤的认识上,宏观视角多认为线路沿线与站点周边的土地利用、开发强度、功能混合度对客流分布的影响较大^[4],微观视角则关注扶梯、安检、闸机等相关轨道交通设施的服务水平(通过能力)与站点客流密度的

关系^[5]。部分研究围绕个人出行行为的时空特征展开,例如出行目的的识别与描述^[6]、特定人群的行为规律和出行偏好分析^[7-8]以及不同约束对乘客出行行为的影响分析等^[9-10],但并未进一步探讨乘客出行过程、出行行为特征与拥挤客流的关系。

在缓挤策略的响应上,现有实践内容和手段措施可以归纳为以下5种情况。①客流控制,即直接限制某些拥挤站点在高峰时段的乘客进站流量^[11]。②协调时间制度,即以制度化手段调整公共设施开放时间,实现交通流的去同步化^[12]。例如法国雷恩时间办公室对学校各年级上课时间表进行错峰调整,以缓解地铁早高峰拥挤问题^[13]。③预约进站,即在控制站点总容量的前提下,允许乘客预先选择特定的进站时段,进而提前对出行需求进行合理分配,减少高峰时段拥挤并优化资源利用。例如疫情期间,北京市选取地铁大客流车站试点预约进站^[14]。④差别定价,即通过调整不同时段的交通出行成本以促进出行需求分散^[15]。⑤信息透明化与行为诱导,即通过提供更加精确的列车到站时刻表影响乘客到站时间,或绘制扭曲的地铁线路图影响乘客路线选择等^[16-17]。上述研究或实践证实了时间与行为手段对于解决空间问题的重要性,但多数研究仅关注时间、空间、行为干预的某一方面,尚未形成时间、空间、行为三位一体的联动方案。此外,还缺乏对策略适用行为特征的认识,无法针对性地判断不同缓挤策略的潜在作用对象。

2 研究对象、数据与方法

2.1 研究对象与数据

本文选取2016年9月上海市轨道交通9号线早高峰(7:00—10:00)的拥挤站点以及相关出行乘客作为主要的研究对象,部分分析过程涉及全网络站点及客流信息。2016年9月,9号线建成区段为松江南站至杨高中路段,共包含26个站点,高峰小时最高断面客流量达5.16万人次/h,在全市仅次于1号线与2号线^[18]。主要使用的数据为2016年9月1日至9月

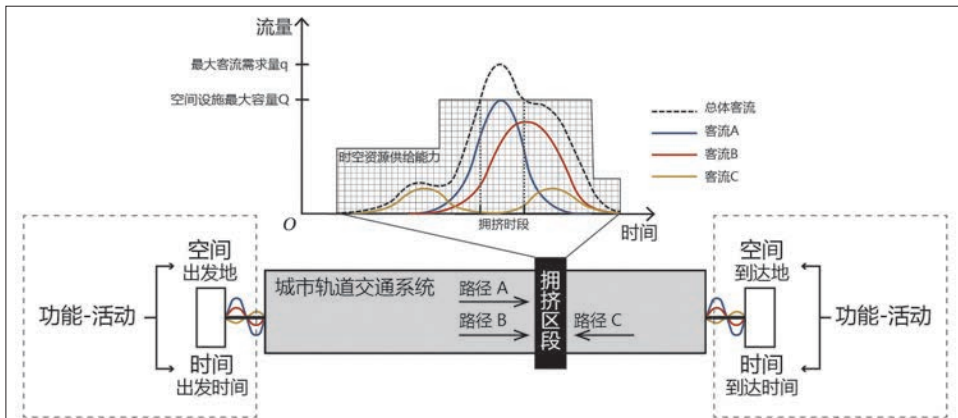


图1 城市轨道交通拥挤过程
Fig.1 Urban rail transit congestion process

资料来源:笔者自绘。

注释: ①《上海地铁9号线困境:限流还是挤》,详见澎湃新闻网https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1398099。

30日的上海公交智能卡数据 (SPTCC), 数据内容包括卡号、刷卡进站时刻、进站点、刷卡出站时刻、出站点、费用等信息。

2.2 技术路线

本文利用智能卡数据模拟乘客出行时空轨迹, 围绕线路拥挤特征和出行行为特征两个方面展开。对于前者, 首先识别地铁网络中的客流分布及拥挤情况, 之后根据不同在站乘客占比来判断拥挤主导类型 (进站、换入、途经), 并追溯造成拥挤客流的来源及去向, 进而明确对线路拥挤造成最大贡献的客流来源及目的地, 分析其与城市功能结构的关系。对于后者, 首先对一个月内的个体出行时空信息进行追踪, 以挖掘乘客的出行目的、出行规律与出行约束等出行特征, 之后对不同出行特征乘客的时间及空间分布情况进行分析。最后, 在深入认识拥挤特征及行为特征的基础上, 明确不同类型的缓解策略与不同特征的出行行为的对应关系, 针对不同作用对象 (时间、空间、人群) 提出信息推荐、预约进站、调整上班时间、转移就业岗位等缓解策略, 并定量评估策略实施后的缓解潜力, 以期缓解地铁高峰拥挤问题提供新的视角与方法 (见图2)。



图2 技术路线
Fig.2 Technical route

资料来源: 笔者自绘。

2.3 识别客流分布

本文根据2016年上海轨道交通线路构建网络拓扑模型, 利用Dijkstra最短路径算法, 模拟每对站点OD的出行路径, 并与智能卡数据中乘客个人出行OD进行关联, 得到每位乘客的出行路径。图3展示了非换乘乘客的一次完整轨道交通出行过程及其时间分配模式。乘客首先在进站闸机处刷卡, 之后前往站台等待上车, 等候时间为 t_w , 上车后到达目的站点下车, 车内时耗为 t_v , 最终在出站闸机处刷卡结束地铁出行, 前后两次闸机到站台的步行时间分别记为 t_0^{in} 和 t_0^{out} , 见式 (1)。

$$t_{(O,D)} = t_0^{in} + t_w + t_v + t_0^{out} \quad (1)$$

智能卡数据集记录了乘客在检票闸机处进站和出站的准确时间, 从所有具有相同“起点—终点”的非换乘乘客中, 找到出行时间最短的乘客, 将这些乘客所花费的时间记为 $t_{(O,D)}^{min}$, 即站点间最小出行时耗。由于本文使用了大量的数据, 可以认为这些最快的乘客到达站台后立即上车, 即其等候时间为零。同时, 由于列车在相同OD区段的运营速度较为稳定, 可以认为所有“起点—终点”相同的乘客车内时耗 t_v 近似相同。此外,《城市轨道交通设计规范》(DGJ08-109-2004) 要求进出站检票口与前往站台的楼梯、自动扶梯的距离分别不小于5 m、7 m, 说明一般情况下检票闸机与站台都是邻近布置。这保证了乘客在出发站和到达站的步行时间都在较小的时间范围内, 即使选择了不同的进出站闸机, 从闸机到站台的步行时间 t_0^{in} 或 t_0^{out} 也相差较小。

据此, 通过式 (2) 计算出所有非换乘乘客的个人等候时间 t_w , 由于非换乘乘客只在出

发站台候车, 可以进一步计算各出发站台的人均等候时间 (每30 min的时间间隔)。对于存在换乘行为的乘客, 认为其除出发站台外, 每经过一次换乘站点, 都会进行一次候车, 候车时间为该换入站台在该时段内的人均等候时间。

$$t_w = t_{(O,D)} - t_{(O,D)}^{min} \quad (2)$$

基于上述技术方法, 可以将任一乘客的出行时耗拆分成车外时间 (站台等候时间) 和车内时间两部分。首先识别其车外时间, 之后将乘客的车内时间按站间距离分配到各个途经站点上, 最后按30 min的时间间隔进行统计, 得到每30 min内不同站点不同方向的客流分布。

2.4 识别行为特征

本文从出行目的、出行规律性和出行约束性3个方面划分出行特征类型。出行目的反映乘客某次出行终点的活动类型与用地功能, 工作出行意味着该出行时间受某一上班时间的制约。若同一乘客在同一天连续两次轨道交通出行中, 首次出行到达站点与下一次出行的出发站点相同, 且首次出行到达时间与下一次出行出发时间间隔大于6 h, 则将其出行目的识别为工作出行, 否则识别为其他出行。出行规律性反映乘客某次出行是否于时空中周期性存在, 周期性出现的惯常出行对某一站点的拥挤贡献及实施策略后的效果都是较为稳健的。若同一乘客于月内每周工作日早高峰相同起讫点出行都超过3 d (工作日中过半的天数, 4周总计12 d), 则将其这一出行识别为惯常出行, 否则识别为随机

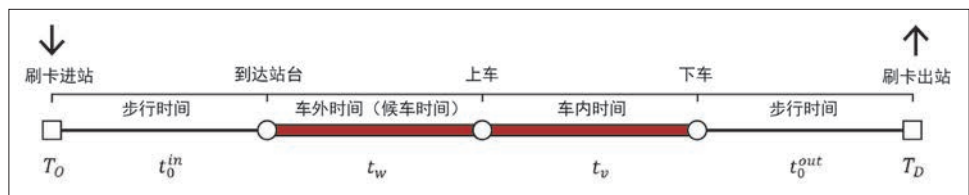


图3 轨道交通乘客出行过程及其时间分配
Fig.3 Passenger travel process and time allocation in rail transit

资料来源: 笔者自绘。

出行。出行约束性建立在出行规律性的基础上^②,反映乘客的惯常出行在时间上是否具有自调整的潜力,根据一个月内乘客惯常出行的出发、到达时间标准差将其分为刚性出行和弹性出行。将一个月内工作日早高峰进/出站时间标准差均大于30 min的惯常出行识别为弹性出行,将一个月内工作日早高峰进/出站时间标准差均小于10 min的出行识别为刚性出行。

3 上海轨道交通9号线的拥挤特征

3.1 拥挤时空特征

根据上述研究方法,识别早高峰(7:00—10:00)期间9号线在站乘客量(见图4),以反映该时段站点的拥挤程度。从时间变化上来看,全线在站乘客量从7:30开始迅速提升,于8:00—8:30期间达到最高峰,峰值约为前一时段的两倍,此时9号线的拥挤程度最高,8:30—9:00的在站乘客数量仍保持与峰值相

近的水平,9:00后人数大幅下降。从线路方向上来看,受早高峰向心通勤的影响,往中心城区方向(松江南站—杨高中路站)的在站乘客量显著高于往郊区方向(杨高中路站—松江南站),但往郊区方向徐家汇站—漕河泾开发区站在8:00—9:00同样保持较高的在站乘客数量。从空间分布上来看,在站乘客量高值区段主要集中在佘山站—徐家汇站,进入内环后在站乘客量明显下降。九亭站—漕河泾开发区站的高值持续时间最长,是9号线最拥挤的区段。

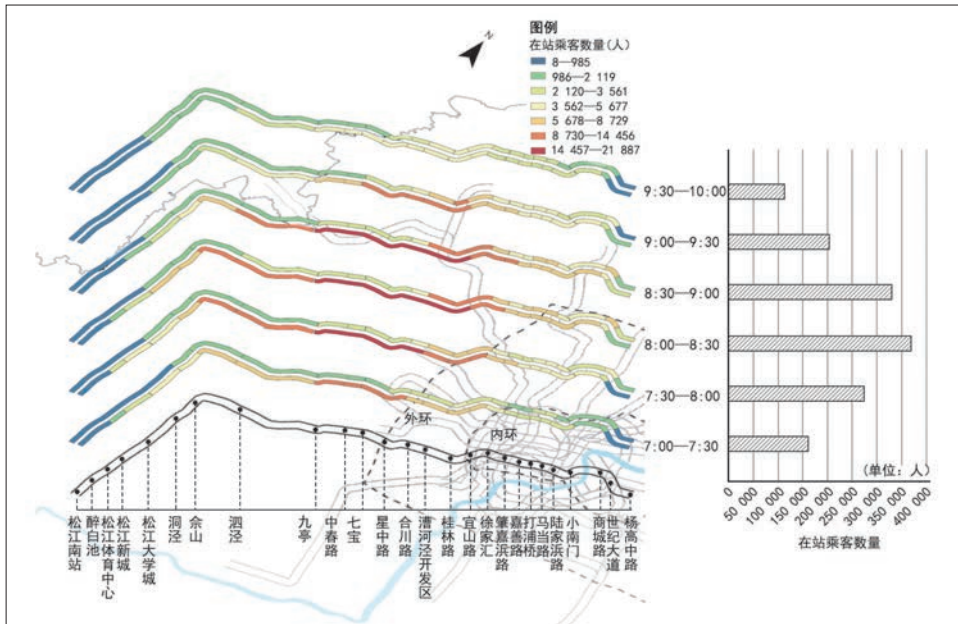


图4 早高峰在站乘客量分布及变化
Fig.4 Distribution and change of passenger volume at stations during morning peak hours

资料来源:笔者自绘。

3.2 拥挤主导乘客类型

在站乘客包含进站、途经、换入3种类型,3类乘客共同造成了拥挤。选取9号线早高峰最拥挤时段(8:00—8:30)对在站乘客类型进一步分析(见图5)。进站乘客主导站点主要为两个方向的首发站(松江南站、杨高中路站),其进站乘客占比均超过80%,但在随后站点迅速下降,全线多数区段不足20%。其中,往市中心方向的进站乘客影响明显强于往郊区方向,该方向除松江南站—松江新城站外,松江大学城站、佘山站—九亭站的在站乘客中进站乘客占比也相对较多(41%—60%)。换入乘客主要集中在世纪大道站(61%—80%)、徐家汇站(21%—40%)、陆家浜路站(21%—40%)等轨道交通换乘枢纽

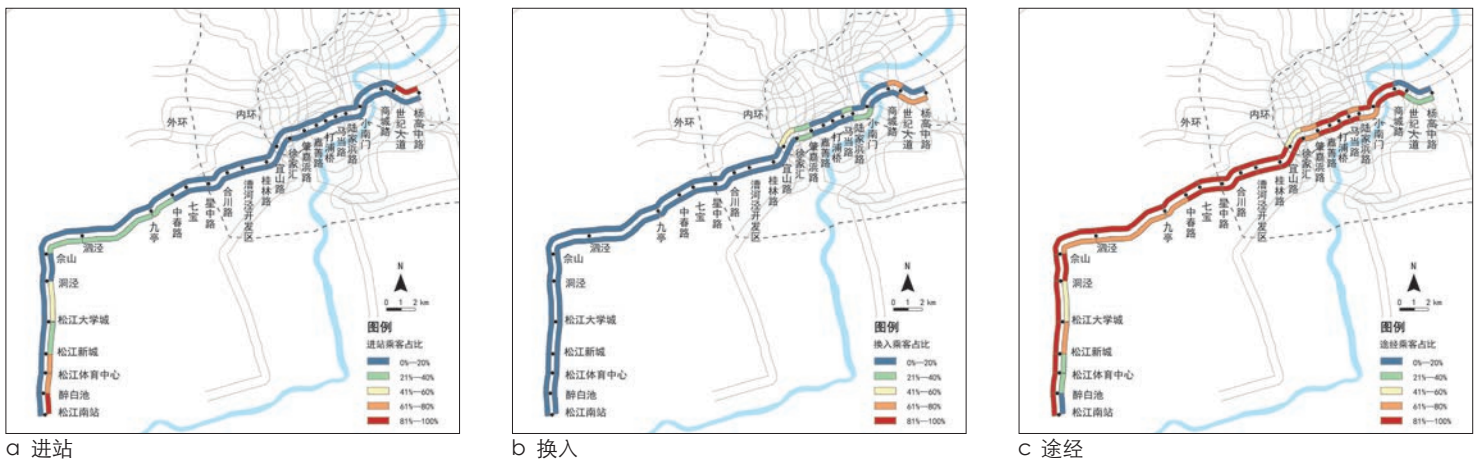


图5 进站、换入、途经乘客占比
Fig.5 Proportions of entering, transferring, and passing passengers

资料来源:笔者自绘。

注释: ② 受限于数据与方法,笔者在本文中所提出的“出行约束性”无法表示某一出行本质的“出行制约强度”,只能借由该出行在数据集中所表现出的“出发、到达时间的离散程度”来侧面反映该“出行制约强度”。

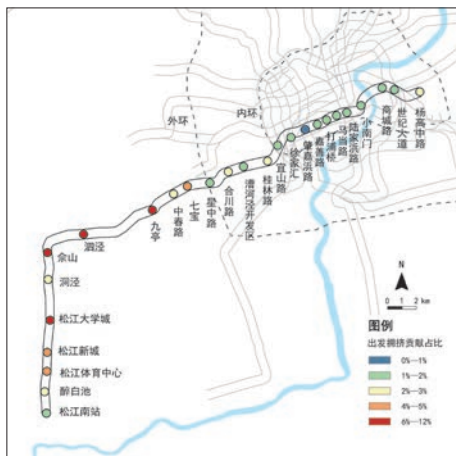
组站点。途经乘客是全线占比最高的在站乘客类型。往郊区方向除首发站外,途经乘客占比均超过80%,往市中心方向的途经乘客占比也大多超过60%,对于拥挤程度最高的九亭站—漕河泾开发区站,途经乘客占比高达80%。说明9号线绝大多数站点的拥挤,尤其是高度拥挤站点的拥挤,都是由途经乘客导致的。

3.3 拥挤贡献溯源

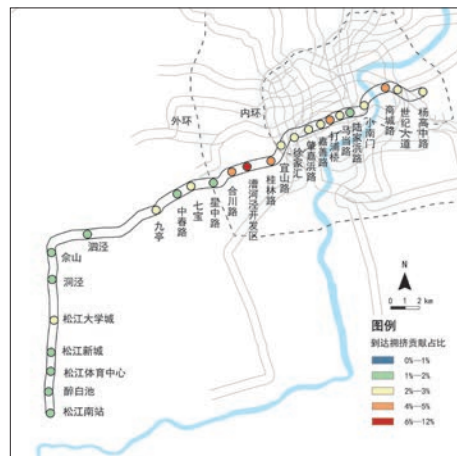
选取9号线早高峰最拥挤时段(8:00—8:30)对在站乘客的出发地与到达地进行溯源,统计各站点进站乘客与出站乘客在全体在站乘客中的占比,记为该站点的出发或到达拥挤贡献(见图6)。本文提出的溯源分析与按起讫点统计某一出发时间或到达时间出行量的OD分析不同。OD分析仅局限于出行的两个端点,不仅无法说明该OD造成了哪些时空区段的拥挤,更不能明确该OD对拥挤产生的贡献程度。而溯源分析针对某一拥挤时空区段的在站乘客,追溯其各自的出发地、出发时间以及到达地、到达时间,能够回答某处拥挤是由哪些时间空间产生并传导至此发生叠加的,进而明确哪些时间空间对系统性的拥挤做出了最大贡献,是一种从中间追溯两端的过程性的视角与方法。

从出发侧来看,外环外站点的出发拥挤贡献总体高于外环内站点。其中,外环外松江大学城、佘山站、泗泾站、九亭站为主要的出发拥挤贡献站点,出发拥挤贡献均在6%—12%,4个站点的出发拥挤贡献总和为36%。外环内站点的出发拥挤贡献基本在1%及以下。从到达侧来看,外环内站点的到达拥挤贡献总体高于外环外站点,且漕河泾开发区附近站点是最主要的到达拥挤贡献区段,漕河泾开发区站、合川路站、桂林路站的到达拥挤贡献总和为22%。此外,打浦桥站、商城路站的拥挤贡献也较高。外环外站点的到达拥挤贡献基本在1%及以下。

这一拥挤贡献特征与轨道交通9号线沿线职住功能的空间分布基本一致。松江大学



a 出发



b 到达

图6 站点出发、到达拥挤贡献

Fig.6 Contributions to congestion from departures and arrivals at stations

资料来源:笔者自绘。

城是上海市发展较早、较为成熟的大学城,承担重要的校园居住功能,佘山站、泗泾站、九亭站附近均为典型的大型居住社区,居住人口众多;漕河泾开发区是9号线沿线规模最大、就业岗位最多的产业园区,打浦桥站、商城路站位于城市中心,设施服务与就业岗位都较为丰富。因此,早高峰期间大量的通勤、寻求其他城市服务的人群从郊区站点出发,往中心城区方向涌入,途径中途数个站点,导致九亭站—漕河泾开发区站区段高度拥挤。在经过漕河泾开发区站等集中就业地后,大量乘客下车出站,在站乘客量迅速下降,拥挤程度减弱。

4 多情景的时空行为缓挤策略

4.1 行为特征与缓挤策略的对应关系

不同的缓挤策略作用于不同出行行为特征的乘客(见图7)。弹性出行乘客所受的时间约束较弱,具有自发调整出行时间的可能性,可以通过信息诱导、推荐出行计划等方式在一定的时间范围内引导其错峰出行。刚性出行乘客受时间制度的强约束,虽然难以自我调节出行时间,但当相关时间约束变更时,其出行行为的变化响应也是最为敏感的。例如刚性工作出行乘客的到达站点、到达时间与其就业地点和上班时间绑定,可以通过调整上班制度改变其出行时间,以避开高

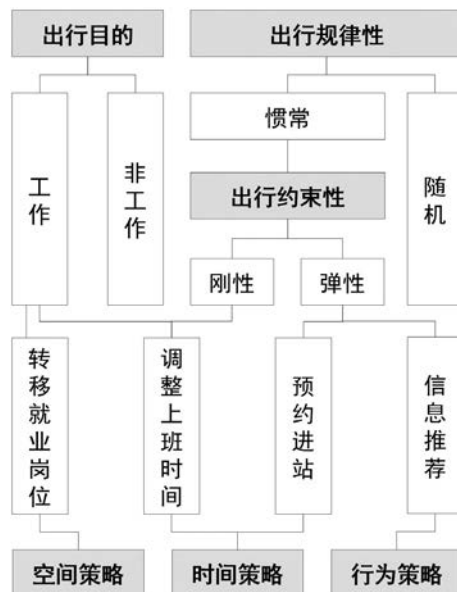


图7 行为特征与缓挤策略的对应关系

Fig.7 Correspondence between behavioral characteristics and decongestion strategies

资料来源:笔者自绘。

度拥挤的时段与区段。

4.2 轨道交通9号线出行行为特征

对轨道交通9号线早高峰各时段在站乘客的出行行为特征进行识别与分析(见图8)。在出行目的上,工作出行占比较高,呈先上升后下降的趋势,最高时段(8:00—8:30)约占77%。在出行规律性上,惯常出行与随机出行比例相近,7:00—9:00惯常出行占比较高,

最高时段 (8:00—8:30) 约占58%,随后随机出行占比上升,最高时段 (9:30—10:00) 约占76%。在惯常出行中,弹性出行与刚性出行之和约占50%, 7:00—8:00弹性出行与刚性出行的比例相近,随后弹性出行占比高于刚性出行。总的来说,拥挤最高峰时段 (8:00—8:30) 的出行主要为工作出行,惯常出行略高于随机出行,惯常出行中的弹性出行略高于刚性出行。

选取9号线早高峰最拥挤时段 (8:00—8:30) 进一步分析不同出行特征人群的空间分布特征 (见图9)。在出行目的上,往市中心方向的工作出行占比高于往郊区方向,占比最高区段为佘山站—漕河泾开发区站 (约80%)。在出行规律性上,惯常出行的空间分布特征与工作出行相似,往市中心方向的佘山站—漕河泾开发区站和陆家浜路站—杨高中路站占比较高 (约60%)。在出行约束性

上,往市中心方向内环以外的弹性出行占比 (约20%) 略高于刚性出行 (约10%),往郊区方向外环以内的刚性出行占比 (约20%) 略高于弹性出行 (约15%)。总的来说,不同出行特征乘客的数量变化与总出行量的变化相似,其占比构成也未表现出明显的空间分异性。

4.3 缓挤策略情景及潜力评估

本文选取9号线早高峰最拥挤时段 (8:00—8:30),结合该时段乘客的出行行为特征,针对性地提出多个场景下的缓挤策略,包括信息推荐策略、预约进站策略、就业地上班时间调整和沿线就业岗位转移的策略 (见图10)。

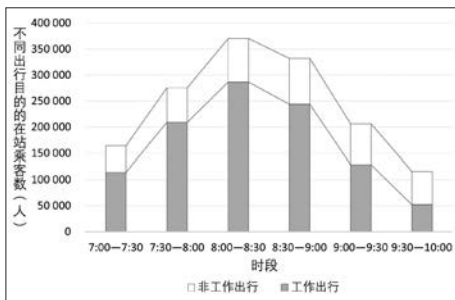
(1) 信息推荐

信息推荐的策略作用于轨道交通网络特定时段的全体弹性出行乘客,假设其均能在自己的弹性范围内调整出行时间、避开高度拥挤

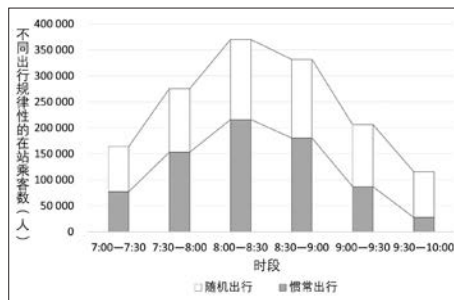
时段。根据前文所述弹性出行的识别规则,本文中弹性出行乘客的出行时间自调整范围至少为30 min。由于9号线早高峰7:30—8:00时段的在站乘客量明显低于8:00—8:30时段,认为弹性出行乘客自发将出行时间向前调整30 min是较为合理的。模拟策略实施后,9号线总在站乘客减少量约17%,往城市中心方向的减少量明显多于往郊区方向,且往城市中心方向内环外区段的减少量高于内环内区段,与往郊区方向相反。拥挤缓解程度最高的区段为松江体育中心站—漕河泾开发区站,在站乘客均减少约20%。

(2) 预约进站

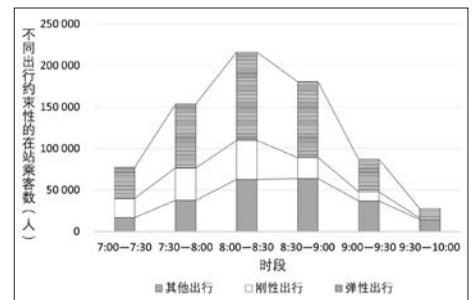
与信息推荐策略不同,预约进站策略只能作用于某一出发站点、某一出发时段的弹性出行乘客,该策略作用人群数量减少,但可行性更高。预约进站策略的重点在于确定适宜的站点与时段,选择对系统性拥挤产生最大



a 出行目的



b 出行规律性



c 出行约束性

图8 不同出行行为的时间分布特征
Fig.8 Temporal distribution characteristics of different travel behaviors

资料来源:笔者自绘。

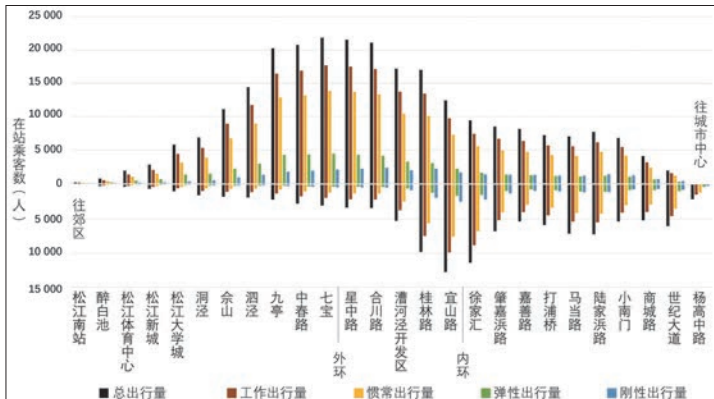


图9 不同出行行为的空间分布特征

Fig.9 Spatial distribution characteristics of different travel behaviors

资料来源:笔者自绘。

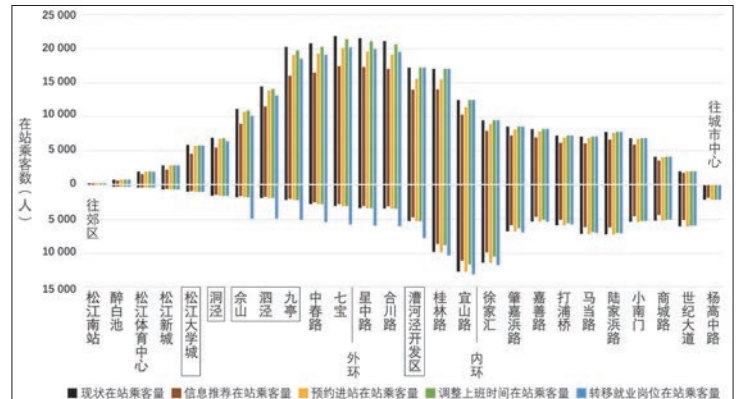


图10 缓挤策略潜力评估

Fig.10 Potential assessment of decongestion strategies

资料来源:笔者自绘。

贡献的出发站点与进站时段实施策略是最为高效、合理的。根据前文所述方法,计算9号线不同进站点与时段的弹性出行乘客对8:00—8:30的拥挤贡献,其中7:30—8:00的九亭、泗泾、佘山以及松江大学城站的出发拥挤贡献明显高于其他站点。选择上述4个站点及时段模拟策略实施后,9号线总在站乘客减少量约4.4%,往城市中心方向的减少量明显多于往郊区方向,且主要为内环外的区段,拥挤缓解程度最高约为8%。

(3) 调整上班时间

调整集中就业地上班时间的策略针对刚性工作出行,通过调整工作地的上班时间约束改变相应出行人群的出行时间,进而实现客流错峰。与信息推荐及预约进站的策略相比,调整上班时间的策略强制性更强,策略实施后的作用效果更加稳定。该策略同样需要明确对系统性拥挤产生最大贡献的集中就业地与上班时间。其中,8:00—8:30和8:30—9:00的漕河泾开发区站到达拥挤贡献明显高于其他站点,因此将漕河泾开发区8:30及9:00的上班时间向前调整30 min,模拟在站客流的变化。9号线总在站乘客减少量约2.3%,两个方向的客流拥挤程度都得到了缓解,往郊区方向拥挤缓解程度最高约为8%,往城市中心方向的高度拥挤区段缓解程度约为3%。

(4) 转移就业岗位

转移就业岗位的策略通过改变工作人群的出行路径优化客流分布。该策略作用于惯常工作出行人群,当就业地的区位变更时,其出行路径必然发生改变。根据前文分析可知,9号线的拥挤贡献特征与沿线职住功能的空间分布高度相关,交通服务供需矛盾的主要原因是长距离工作出行挤占了往中心方向的运力,车厢容量无法及时释放。因此,若在目前主要出发站点与到达站点之间寻找一些就业空间,在控制总就业岗位不变的情况下将部分长距离通勤的就业岗位转移至此,就能协调客流分布,缓解途经拥挤。洞泾镇位于松江大学城、佘山、泗泾、九亭等核心出发拥挤贡献站之间,新一轮总规将其定位为G60科创走廊示范引领

的人工智能科创小镇,以建成松江北部的科创和人才高地为目标。因此,本文假设漕河泾开发区50%的就业岗位转移至洞泾站,在保持原有上班时间不变的情况下,模拟调整后在站客流的变化。结果显示,9号线总在站乘客量基本保持不变,但在空间分布上发生了明显变化。往城市中心方向的在站乘客量减少,高度拥挤区段的拥挤程度缓解约8%,往郊区方向的九亭站—洞泾站区段在站乘客量大幅增加,但其原有客流量相对较少,新增后仍能保持较为合理的客流水平。

5 结语

本文以上海轨道交通9号线为典型案例,全面认识了城市轨道交通拥挤的时空分布特征和拥挤生成过程。研究发现,9号线最拥挤的时空区段为8:00—8:30的九亭站—漕河泾开发区站,拥挤客流主要由途经乘客构成。其中,松江大学城、佘山、泗泾、九亭站的进站乘客和漕河泾开发区站的出站乘客对9号线的系统型拥挤贡献最大,拥挤贡献分布明显与沿线职住空间结构相关。从出行目的、出行规律性、出行约束性3个方面划分乘客的行为特征类型,发现拥挤高峰时段主要为工作出行,能够进一步解释轨道交通9号线的拥挤成因:早高峰期间,大型居住社区的大量惯常工作人群进站上车后,经过长距离出行才能到达集中就业地,途经站点的列车容量几乎全被挤占,因此发生了高度拥挤。

在此基础上,本文针对不同出行类型的乘客提出了多情景的时间、空间和行为缓解策略。其中,行为引导策略作用于全体弹性出行乘客;时间策略包括干预出发时间的预约进站策略和干预到达时间的调整上班时间策略,分别适用于核心进站贡献站点的弹性出行乘客和核心到达贡献站点的刚性工作出行乘客;空间策略在控制就业岗位总量不变的前提下,合理转移部分就业岗位,优化惯常工作出行乘客的客流分布。经过模拟评估,不同策略均能在一定程度上起到缓解拥挤的作用。

总的来说,本文在时空行为规划框架下

提出了针对城市轨道交通拥挤问题的分析方法与缓解策略。一方面,可以提高传统缓解策略的效率与科学性,例如根据拥挤贡献为现有进站限流策略选择最适宜的站点和时段;另一方面,可以拓展新的缓解思路与方法,例如针对集中就业地实施上班时间的错峰调整、新增就业地转移岗位等。此外,策略实施后的拥挤潜力评估也为政策制定与实施的成本—效益计算提供了一定依据。但本文在策略评估与数据处理方法等方面仍存在一些不足。一是缓解策略的评估结果是理想状态下的最大缓解潜力,但在实际生活中,个体偏好、行为存在众多差异性与不确定性,因此策略实际作用效果必定与模拟评估的潜力有较大差距,策略实施所需要的经济与社会成本也应当进行科学合理的评估,否则将无法判断策略是否具有可行性。二是缓解策略的评估针对的是对某一静态时段切片内的客流变化,并未考虑策略实施后可能引起的复杂系统的动态变化。并且,缓解策略的评估只考虑了9号线单一线路的变化,未能判断局部调整优化后对轨道交通全网络造成的影响,某一区段拥挤的缓解可能会加剧其他区段的拥挤。此外,识别客流分布和各类出行特征的技术方法与指标还可以进行更深入的探讨与界定,以上不足将在后续研究中加以完善。

参考文献 References

- [1] 邹庆茹. 城市轨道交通网络高峰客流拥挤管控研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
ZOU Qingru. Research on peak-congestion control and management for urban rail transit network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [2] 王波. 上海轨道交通早高峰客流拥挤与居民通勤关系分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(7): 75-78.
WANG Bo. Relationship between the rush hour

passenger flow congestion and residents commuting in Shanghai rail transit system[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(7): 75-78.

[3] 王德, 胡杨. 城市时空行为规划: 概念、框架与展望[J]. 城市规划学刊, 2022 (1): 44-50.
WANG De, HU Yang. Urban spatial-temporal activity planning: concept, framework and prospect[J]. Urban Planning Forum, 2022(1): 44-50.

[4] 王亚洁. 国外城市轨道交通与站城土地利用互动研究进展[J]. 国际城市规划, 2018, 33 (1): 111-118.
WANG Yajie. International studies on the interaction between urban rail transit and land use of station areas[J]. Urban Planning International, 2018, 33(1): 111-118.

[5] 杨陶源, 吴海燕, 杨静, 等. 基于微观仿真的城市轨道交通车站设施服务水平研究[J]. 交通信息与安全, 2016, 34 (1): 123-129.
YANG Taoyuan, WU Haiyan, YANG Jing, et al. Development of the level of service for the facilities of urban rail transit stations based on microscopic simulation[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 34(1): 123-129.

[6] 赵鹏军, 曹毓书. 基于多源地理大数据与机器学习的地铁乘客出行目的识别方法[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22 (9): 1753-1765.
ZHAO Pengjun, CAO Yushu. Identifying metro trip purpose using multi-source geographic big data and machine learning approach[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(9): 1753-1765.

[7] CHU K K A, CHAPLEAU R. Augmenting transit trip characterization and travel behavior comprehension: multiday location-stamped smart card transactions[J]. Transportation Research Record, 2010, 2183(1): 29-40.

[8] LONG Y, LIU X, ZHOU J, et al. Early birds, night owls, and tireless/recurring itinerants: an exploratory analysis of extreme transit behaviors in Beijing, China[J]. Habitat International, 2016, 57: 223-232.

[9] WU Y, LU J, CHEN Y. Study of the influencing factors of urban rail transit travel behavior: a case study of Xi'an[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 744-746: 2049-2052.

[10] DIJST M, VIDAKOVIC V. Travel time ratio: the key factor of spatial reach[J]. Transportation, 2000, 27(2): 179-199.

[11] 史小俊. 地铁车站应对大客流的组织措施[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12 (10): 70-72.
SHI Xiaojun. Counter measures in passenger flow organization for metro station[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(10): 70-72.

[12] 陈子浩, 胡杨, 王德, 等. 欧洲城市时间政策的主要议题及相应实践[J]. 城市发展研究, 2022, 29 (11): 89-96.
CHEN Zihao, HU Yang, WANG De, et al. Main topics and corresponding practices of European urban time policies[J]. Urban Development Studies, 2022, 29(11): 89-96.

[13] 胡杨, 陈子浩, 王德, 等. 城市时间政策的西欧经验与启示: 实践评述、发展脉络与行动框架[J/OL]. 国际城市规划: 1-18[2024-02-18]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2022.449>.
HU Yang, CHEN Zihao, WANG De, et al. Urban time policies in western Europe: practice review, development context and action framework[J/OL]. Urban Planning International: 1-18[2024-02-18]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2022.449>.

[14] 王倩, 郭继孚, 葛昱, 等. 北京市轨道交通车站预约出行实践与思考[J]. 城市轨道交通, 2021, 19 (1): 89-94.
WANG Qian, GUO Jifu, GE Yu, et al. Practice and thoughts on reservation travel in Beijing metro stations[J]. Urban Transport of China, 2021, 19(1): 89-94.

[15] 田贵超, 张建同, 胡一竑. 基于乘客行为的城市轨道交通分时定价策略研究[J]. 上海管理科学, 2013, 35 (5): 77-83.
TIAN Guichao, ZHANG Jiantong, HU Yihong. Research on urban rail transit's time differential pricing strategy based on passenger behavior[J]. Shanghai Management Science, 2013, 35(5): 77-83.

[16] INGVARSDSON J B, NIELSEN O A, RAVEAU S, et al. Passenger arrival and waiting time distributions dependent on train service frequency and station characteristics: a smart card data analysis[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 90: 292-306.

[17] GUO Z, ZHAO J, WHONG C, et al. Redesigning subway map to mitigate bottleneck congestion: an experiment in Washington DC using Mechanical Turk[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 106: 158-169.

[18] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2016年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2017 (1): 20-36.
China Association of Metros. China metros annual statistical and analysis report, 2016[J]. China Metros, 2017(1): 20-36.

本刊2024年第3期(总第176期)勘误表

