

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.02.007

基于面板数据分析的城市轨道交通网络客流影响规律研究

石庄彬, 刘小庆, 钱乾, 何明卫, 刘阳

(昆明理工大学交通工程学院, 昆明 650051)

摘要: 针对我国城市轨道交通建设规模与客流效率之间不匹配的问题, 有必要深入了解并掌握网络客流影响规律, 提升客流量水平。然而, 由于缺乏纵向数据的对比, 对社会经济因素、网络结构特征等与客流量间的相互关系研究仍不够深入。为实现城市轨道交通资源的合理利用, 提高核心竞争力, 厘清网络结构、经济人口等因素与客流量的关系, 采用2012—2020年的年度面板数据, 计算城市轨道交通站点网络的拓扑特征指标, 并建立时间固定效应模型, 试图探究城市轨道交通网络拓扑结构及其与城市布局耦合关系对客流量变化的影响。研究结果表明: 随着城市轨道交通网络的发展, 交通网络结构的复杂程度越来越高, 换乘枢纽站点不断增多, 对网络连接起到重要作用; 城市轨道交通网络拓扑变量的变化对客流量提升具有显著影响, 网络分布的致密化和区域枢纽化有助于提升换乘连接, 吸引更多客流; 耦合协调度对客流量变化影响显著, 轨道线网规划中需要因地制宜地考虑人口分布与线路布局的耦合关系。最后, 从轨道交通网络建设规划方面提出了相关政策建议, 以期城市轨道交通建设规划的相关政策制定提供理论依据。

关键词: 城市轨道交通; 复杂网络; 客流影响规律; 面板数据; 耦合协调度

中图分类号: U231.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2025)02-0046-07

Research on the Influence Mechanism of Passenger Flow in Urban Rail Transit Network Based on Panel Data Analysis

SHI Zhuangbin, LIU Xiaoqing, QIAN Qian, HE Mingwei, LIU Yang

(Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051)

Abstract: To address the mismatch between urban rail transit construction and ridership efficiency in China, it is crucial to understand and master the influence laws of network ridership and improve efficiency. However, due to a lack of longitudinal data, research on the relationships between socio-economic factors, network structure, and ridership remains insufficient. This study uses annual panel data from 2012 to 2020, calculates topological characteristics of the urban rail transit station network, and establishes a time fixed-effects model. The goal is to explore the topology of the urban rail transit network and its coupling relationship with urban layout effects on ridership changes, facilitating rational use of transit resources and improving core competitiveness. The results indicate that as the urban rail transit network develops, the complexity of the transportation

收稿日期: 2024-04-23 修回日期: 2024-08-03

第一作者: 石庄彬, 男, 博士, 副教授, 从事智慧城轨运营管理和优化、交通需求分析和网络演化等领域研究, shizhuangbin@kust.edu.cn

通信作者: 刘阳, 女, 博士, 副教授, 从事城市交通规划、交通系统供需平衡分析、出行行为决策建模等领域研究, kmliuyang@kust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52102378); 云南省基础研究专项(202401AT070373; 202201BE070001-052); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才专项(KKRD202202110, 2022)

引用格式: 石庄彬, 刘小庆, 钱乾, 等. 基于面板数据分析的城市轨道交通网络客流影响规律研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 46-52.

SHI Zhuangbin, LIU Xiaoqing, QIAN Qian, et al. Research on the influence mechanism of passenger flow in urban rail transit network based on panel data analysis[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 46-52.

network structure increases, and the number of interchange hubs rises, playing a crucial role in network connectivity. Changes in the topological variables of the urban rail transit network significantly enhance passenger flow; the densification of network distribution and regionalization of hubs help improve interchange connections and attract more passengers. The degree of coupling coordination significantly affects passenger flow changes; thus, the coupling relationship between population distribution and line layout should be considered according to local conditions in rail line network planning. Finally, this paper proposes relevant policy suggestions for rail transit network construction planning to provide a theoretical basis for urban rail transportation construction policy formulation.

Keywords: urban rail transit; complex network; passenger flow influence mechanism; panel data; coupling coordination degree

城市轨道交通系统具有低碳、准时、高效等优势,在提升城市公共交通供给质量和效率、缓解城市交通拥堵方面备受关注,对加强市内居民区、商业区、交通枢纽等客流密集区域的覆盖,规划建设城市交通走廊具有重要意义。随着城市轨道交通网络化运营规模扩大,运营里程增加,客流量整体呈现上升趋势,而客运强度却从 2012 年的 1.3 万人次/(km·d) 降到 2019 年的 0.71 万人次/(km·d)^[1],城轨交通客流效率是我们关注的重要问题。

诸多研究表明,交通网络结构的演化发展塑造了新型城市空间布局,深刻影响着城市发展进程^[2]。如今国内国际新形势对城市轨道交通的可持续发展也提出了新的更高要求。进入“十四五”期间,城市轨道交通将全面进入网络化发展阶段,行业面临建设、规划理念的转变。尽管我国城市轨道交通实现了形态上的“网络化”,但在提升服务能级和网络结构功能方面仍有不足。实现功能层面的“网络化”,解决逐线建设引起的协调问题,避免频繁升级或改造,提高运输能力是亟需关注的重点。利用复杂网络理论对交通网络的研究越来越多,但现有研究多集中在航空流、高铁流空间网络^[3,4],对城市轨道交通网络结构与客流关系的研究较少且并不全面。现有研究主要存在两个不足:一是大多采用截面数据分析,缺乏对网络属性等因素的考虑,限制了对网络客流需求生成规律的深入理解^[5];二是主要关注交通网络的全局特征,缺乏微观角度的探讨^[3]。

作为以城市服务为主的交通方式,城市轨道交通网络不同于航空、高铁及传统铁路网络,它更依赖城市空间规划,注重城市内外的连通和市域层级结构的形成^[6]。因此,为进一步分析城市轨道交通网络对客流的作用,本研究采用 2012—2020 年的年度面板数据,计算城市轨道交通站点网络拓扑特征指标,分析不同规模城市的网络结构,并建立时间固定效应模型,探究包括网络结构在内的多种因素影响下的客

流规律。

1 研究方法

影响城轨交通客流量的因素主要包括 4 类:城市社会经济变量(人均 GDP、常住人口)、其他交通方式可用性(机动车保有量、出租车总数)、人口密度-站点数量耦合协调度和网络变量(度中心性、紧密中心性、介数中心性)。其中,耦合协调度取对应年份下城市的平均值,网络变量取方差值。下面将详细介绍指标计算方法和影响规律建模方法。

1.1 网络模型构建及评价指标

网络结构在一定程度上决定了网络效率,探究城市轨道交通网络特征可为交通网络建设规划远景布局提供技术支撑^[7]。本文结合网络微观特征构建评价指标体系,以推演网络拓扑特征对客流量的影响。

1.1.1 节点度(Degree)

在无向图中,节点度指节点的邻边数量:

$$k_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n a_{ji} \quad (1)$$

式中, n 为网络中节点的总数量; i, j 为网络中节点的编号; k_i 为节点 i 的度; a_{ij} 为两个节点间直接相连的边数。

在交通网络中,节点度描述了一个节点在交通网络中的枢纽程度。平均度为所有节点邻边数量的平均值,表示网络整体连接水平;最大度为网络中所有节点邻边数量最大值。

1.1.2 中心性

1) 度中心性(Degree Centrality),指节点的度值与网络中所有节点的最大可能度值之比,公式如下:

$$C_D(i) = \frac{k_i}{n-1} \quad (2)$$

2) 紧密中心性(Closeness Centrality),反映了一个节点与最短路径上其他所有节点的邻近程度,用节点 i 到其他各节点平均距离的倒数来表示^[8]:

$$C_C(i) = \frac{n-1}{\sum_{\forall j \neq i} d_{ij}} \quad (3)$$

式中, d_{ij} 为从节点 i 到节点 j 的最短路径。

3) 介数中心性(Betweenness Centrality), 以经过某个节点的最短路径数来刻画节点重要性, 即所有经过该节点最短路径占总体的比值:

$$C_B(i) = \sum_{k \neq i \neq j} \frac{\sigma_{kj}(i)}{\sigma_{kj}} \quad (4)$$

式中, σ_{kj} 为经过节点 k, j 之间最短路径的数量; $\sigma_{kj}(i)$ 为经过 i 且为经过节点 k, j 之间最短路径的数量。

1.2 耦合协调度指标

耦合协调度用来衡量两个子系统间的协调性^[9]。本研究构建耦合协调度模型, 从供需动态耦合角度出发对人口密度和站点数量间的协调性进行分析:

$$C = 2 \times \sqrt{\frac{(U_1 U_2)}{(U_1 + U_2)^2}} \quad (5)$$

$$M = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (6)$$

$$D = \sqrt{CM} \quad (7)$$

式中, U_1 为人口密度; U_2 为站点数量; C 为耦合度; M 为综合协调指数; D 为两者的耦合协调度; α 和 β 表示权重, 参考以往研究取值为 0.5。耦合协调度的取值范围为 [0, 1], 其值越大表示耦合协调程度越好。

根据城轨交通网络数据和人口密度栅格数据(分辨率 1 km), 利用 ArcGIS 提取站点周围 5 km 范围内的站点数和人口密度, 并对所有站点数和人口密度逐年进行归一化处理, 以确保其在研究范围内具有可比性。利用公式(5)~(7)进一步计算得人口密度-站点数耦合协调度。

1.3 面板数据模型及相关检验

面板数据包含了截面和时间两个维度。设 $i=1, 2, \dots, N$ 表示截面个体; $t=1, 2, \dots, T$ 表示时间。面板数据模型的基本形式为:

$$y_{it} = f(x_{1it}, x_{2it}, \dots, x_{kit}) + u_{it} \quad (8)$$

为了避免伪回归并确保估计结果的有效性, 回归前需检验数据的平稳性。最常用的方法是单位根检验, 通过分析 t 值, 确定是否可以显著地拒绝时间序列不平稳的原假设(即 $p < 0.05$)。本研究所用面板数据横截面单元数量为 22($N=22$), 时间段数量为 9($T=9$), 是一个典型的短面板数据($N > T$), 一般不需进行单位

根检验。

面板数据模型一般包括 3 种形式: 混合估计模型、固定效应模型和随机效应模型。最优模型形式可通过 F 检验、BP 检验和 Hausman 检验来确定。

2 研究区域和研究数据

2.1 研究区域

近年来城市轨道交通发展迅速, 截至 2023 年年底, 中国内地共 59 座城市运营轨道交通系统, 运营线路 338 条, 总长度达 11 224.54 km, 其中新增线路长度 866.65 km, 共完成客运量 294.66 亿人次。随着城轨网络逐渐完善, 公共交通客运量分担比率持续上升^[10-12]。与此同时, 出租车数量和公共汽电车客运量明显下降且不同城市间存在差异。综合区域经济水平、城轨交通运营规模等因素, 选取 22 个城市作为研究对象, 包括: 北京、上海、深圳、南京、成都、重庆、杭州、西安、沈阳、大连、昆明、哈尔滨、无锡、郑州、南昌、南宁、合肥、石家庄、厦门、乌鲁木齐、温州、济南。

2.2 数据获取与处理

本研究选择 2012—2020 年城市的年度数据作为研究样本(在 2012 年之后开通轨道交通的城市, 数据从开通年份开始统计)。城市社会经济数据、其他交通方式、线网客流数据通过国家统计局及地方统计年鉴、各城市年度统计公报和城市轨道交通协会统计年报收集汇总获得。通过整理站点、线路的运营时间和连接关系, 形成邻接表和邻接矩阵, 并通过百度、高德等开源数据平台获取站点经纬度信息。人口密度数据来源于 World POP(<https://hub.worldpop.org>)网站。所有变量的描述性统计见表 1。

表 1 变量描述性统计

Table 1 Variable descriptive statistics

变量名称	均值	最小值	中位数	最大值
客流量/万人次	71 813.95	70.2	25 229.7	396 235.1
人均 GDP/万元	9.10	3.329 9	8.398 8	16.544 9
年末常住人口/万人	1 240.79	405.44	931.97	3 187.84
出租车总数/(辆/万人)	14.57	1.165 674	13.057 87	34.205 12
机动车保有量/(辆/万人)	2 416.13	811.888 9	2 433.446	4 100.144
接待海内外游客数/万人次	14 540.64	1 057.89	11 041.85	65 708.03

续表

变量名称	均值	最小值	中位数	最大值
年末运营里程/ km	197.49	17	121	834.2
耦合协调度 D	0.29	0	0.297	0.556 31
介数中心性 (方差)(VAR- C_B)	667 656.44	1	35 212.69	6 968 644
紧密中心性 (方差)(VAR- C_C)	0.00	0.000 210 3	0.000 579 2	0.035 648 3
度中心性 (方差)(VAR- C_D)	0.34	0.073 6	0.24	1.254 112
开通年限/年	9.58	1	7	37

为分析不同城市规模对客流变化的影响，根据

《国务院关于调整城市规模划分标准》^[13]并结合数据特点将其划分三类：超大城市(城区人口超过 1 000 万)、特大城市(城区人口 500 万~1 000 万)、其他(城区人口 500 万以下)。

3 结果分析

3.1 网络静态结构特征

为便于分析不同城市网络发展过程中的微观结构特征，根据运营时间不同分别选取北京(54 年)、深圳(16 年)、西安(10 年)、合肥(5 年)的站点信息构建网络，观察从 2012 年或开通起始年至 2020 年节点中心性的变化。以北京市为例，中心性在网络中的分布情况见图 1。

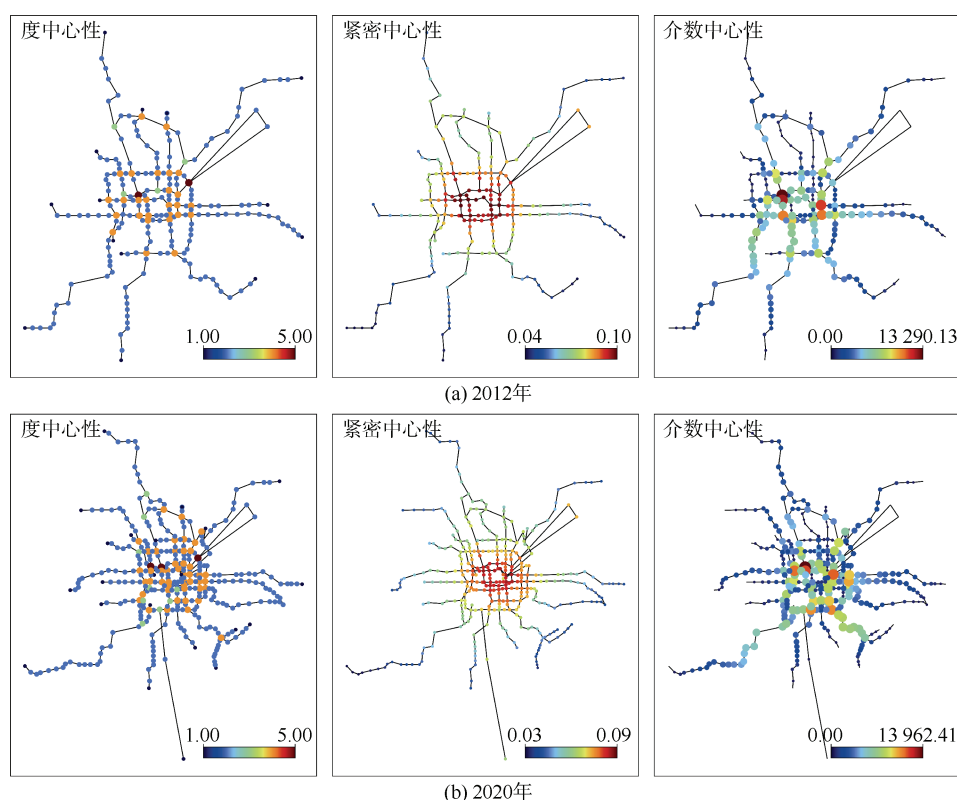


图 1 北京市 2012 年、2020 年城市轨道交通网络中心性空间分布

Figure 1 The spatial distribution of urban rail transit network centrality in Beijing: 2012 and 2020

1) 度中心性。不同运营阶段，网络度中心性存在相似性。整体网络中度中心性值为 2 的节点占比最大，网络中节点度值大于 2 的站点占比和最大节点度均呈逐年增大趋势。2016 年合肥仅开通运营 1 条线路，最大度为 2，到 2020 年最大度提升至 4；深圳节点度最大值从 $k_{imax}=4$ 上升至 $k_{imax}=8$ ，节点度超过 2 的站点在整体网络中占比由 11.01% 增加到 24.15%；北京 2012 年与 2020 年最大度值均为 5，但节点度大于 2 的站点占比明显增加。交通网络结构复杂程

度越来越高，承担“换乘枢纽”任务的站点不断增多。

2) 紧密中心性。紧密中心性的值在区间[0.00, 0.10]内，变化相对平稳。与度中心性、介数中心性相比，紧密中心性具有明显的空间连续性变化特征，呈现由中心向外围衰减的趋势。随着开通线路、站点数量的增多，城市中心区域站点的紧密中心性显著增加，线网中最短路径分布更加均匀，网络结构更紧凑，乘客出行候选路径增多。

3) 介数中心性。在交通网络中,介数中心性表示站点在最短路径中的贡献程度,是分担线路运力的重要体现。在开通初期,如 2012 年的西安和 2016 年的合肥仅开通 1 条线路,介数中心性处于较低水平。随着网络规模不断扩张,介数中心性分布逐渐形成中心辐射的形态,这意味着城市网络趋向于形成以少数重要节点为中心并承担大量客流的结构布局,能够在促进城市互联互通的同时增强网络的鲁棒性和稳定性,更有效地吸引区域客流。

3.2 客流规律分析

为便于对比分析,建立 4 个面板数据模型,因变

量为城轨交通总客流量。由于变量的量纲不同,建模过程中对部分解释变量和被解释变量取自然对数。此外,因度中心性、紧密中心性的方差值分布区间为[0, 1],故用公式 $\sigma'=\ln(\sigma+1)$ 进行变换;耦合协调度表示人口密度和站点数量的协调性水平高低,因此没有进行转化。

建模前进行多重共线性检验,剔除了不满足要求的变量后,各变量的 VIF 值均小于 10,表明变量之间无明显共线性。Model1~Model 4 中 F 检验和 Husman 检验均拒绝原假设,宜采用固定效应模型,以控制不可观测因素,保证结果的可靠性。本研究将开通时间作为固定效应进行回归,最终模型结果见表 2。

表 2 面板固定效应模型结果

Table 2 Results of Fixed Effects (FE) Models

变量	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
	β	T 统计量	β	T 统计量	β	T 统计量	β	T 统计量
ln(人均 GDP)	1.371***	5.583	0.540*	1.979	0.604**	2.238	0.484*	1.842
ln(年末常住人口)	1.245***	5.501	0.522**	2.181	0.252	0.948	-0.142	-0.455
ln(出租车总数)	0.565***	3.144	0.520***	3.268	0.309*	1.679	0.033*	0.176
ln(机动车保有量)	-0.473*	-1.779	-0.452*	-1.825	-0.399	-1.635	-0.549**	-2.318
ln(接待海内外游客数)	0.263**	2.197	0.185	1.578	0.312**	2.416	0.243*	1.979
ln(VAR-C _B)			0.192***	4.551	0.169***	3.943	0.255***	5.474
ln(VAR-C _C)			5.909	0.587	12.460	1.206	0.935	0.092
ln(VAR-C _D)			2.001***	2.720	1.938***	2.680	2.088***	2.860
D					1.911**	2.161	1.297	1.148
D*城市规模_2							0.213	0.283
D*城市规模_3							-2.457**	-2.458
截距项	-4.612*	-1.716	0.852	0.334	1.116	0.445	6.421**	2.277
N	145		145		145		145	
F	20.38		25.65		26.09		28.67	
R ²	0.887		0.916		0.920		0.931	
AIC(赤池信息量准则)	338.727 4		300.465 2		295.849 5		278.500 9	
BIC(贝叶斯信息量准则)	463.752 0		431.441 5		429.802 5		418.407 4	

注: *表示 $p<0.1$; **表示 $p<0.05$; ***表示 $p<0.01$ 。

结果显示,4 个模型的 R^2 都在 0.8 以上,拟合性能为: Model 1<Model 2<Model 3<Model 4, AIC 和 BIC 值依次减小。Model 1 中分析了人均 GDP、年末常住人口、出租车总数、机动车保有量、接待国内外游客总数对客流的影响。Model 2 相比 Model 1 拟合效果明显提升,说明网络拓扑特征增强了模型的解释能力,Model 3 在 Model 2 基础上增加耦合协调度变量,解释效果进一步提高。Model 4 拟合性能最佳,证明耦合协调度对客流量的作用受城市规模的影响。

根据表 2 中建模结果,计算了客流量对每个自变量的弹性,通过对 Model 4 中解释变量的系数进行敏感性分析,可以发现:随着机动车数量增加,客流量会减少,而随着其他 9 个自变量值的增加,城市轨道交通客流量会增加(D*城市规模_3 除外)。

人均 GDP、常住人口的增加会促进客流量提升,经济增长和人口增加是城轨交通发展的强大动力。出租车总数与客流量变化呈正相关,而机动车数量增长会抑制客流量。原因有两方面:其一,相对于步行和

骑自行车,出租车的速度优势扩大了城轨交通的服务区域。共享出租车作为共享经济在公共交通中的应用,结合了公共交通低成本和私家车灵活性的优点,在第一公里和最后一公里(FMLM)服务中具有优势。上班和上学乘客使用共享出租车,可以不必考虑停车或依赖他人接送,从而增加了公共交通的使用率,弥补了公共交通在FMLM环节上的不足。其二,在服务乘客出行方面,私家车与城市轨道交通方式两者不是一个完美的合作关系,而是存在较强的替代和竞争。已有研究证明,TOD似乎在影响发展中国家的出行选择方面发挥关键作用,减缓了小汽车保有量的增长。当共享出行公司(出租车、网约车)提供与城轨交通站点更高效可靠的连接服务时,公共交通乘客量增加,汽车出行份额减少。因此,如何改善城市轨道交通与其他交通方式的衔接,最大化运行效率是交通规划及管理者需要关注重要问题。

为研究城轨交通网络结构对客流量的影响,Model 2~Model 4引入介数中心性、紧密中心性、度中心性的方差值作为解释变量。介数中心性和度中心性的方差值增大都会促进客流量增加。方差值越大,站点对应的特征值越分散,表现在网络中是起到重要连接作用的关键站点数量越多。结合3.1节中的分析,网络中度中心性值为2的站点占主导地位,且在网络建设过程中与最大节点度的差距逐渐扩大,使得少数站点拥有较高的度中心性和介数中心性值,承担较多的客流,这表明网络的疏密程度会对客流量产生影响,枢纽化的结构能够促进客流量的增长。便捷的换乘也是乘客出行考虑的重要因素,站点紧密中心性的值越大,乘客越容易到达其他站点。现阶段的城市轨道交通规划建设中,大多数站点起到连接重要作用,因此,紧密中心性在回归结果中虽不显著,但对交通网络建设具有长远意义。

耦合协调度对客流量的作用受城市规模调节作用的影响。Model 3中耦合协调度的回归系数为1.911,这意味着人口密度与站点数量的协调性与客流量整体呈正相关关系。为探究不同城市规模可能存在的异质性,在Model 4中引入耦合协调度与城市规模分类变量的交互项,将超大规模城市作为参照组,补充解释耦合协调度与客流量之间的关系。结果显示,在特大规模城市中耦合协调度对客流量的正向调节作用($1.297+0.213=1.510$)略大于超大规模城市(1.297)。这是因为超大规模城市中心人口过于密集,导致轨道交通

客流拥挤无法承载更多的客流量以及向步行等非机动方式转移。而其他规模城市中耦合协调度对客流量表现出显著的负向调节作用($1.297-2.457=-1.160$),这可能是因为这一类城市的城轨交通目前多处于建设初期,传统高密度的交通小区中居民已形成稳定的小汽车出行依赖习惯。因此,规划者需要考虑城市规模的差异,针对不同规模合理规划适应当地居民出行需求的城市轨道交通网络。

4 结论

1) 社会经济发展水平和人口规模是影响城市轨道交通客流需求的重要因素。出租车、私家车同为小汽车机动出行,但对城轨交通客流量造成影响截然不同,分别表现出以合作和竞争为主的博弈关系。政府规划部门应该充分考虑城市的经济、人口特征等差异,将城轨交通建设与城市特征相结合,如旅游业为主的都市可打造旅游专线。改善城市轨道交通与其他交通方式的衔接,为乘客提供更便捷的出行方式,达到促进客流增长、提高客流效率的目的。

2) 从整体影响来看,网络结构对客流量存在明显的影响,关键站点在线网中有重要作用。城轨交通建设中交通规划者需要更加关注网络的高效连接,在提高网络整体可达性的同时,重视区域枢纽化,并结合城市空间功能划分、经济发展等进行线网结构布局的规划,实现网络致密化,改善城市轨道交通的多线换乘、同台换乘的便利性。

3) 人口密度-站点数量耦合协调度对客流的作用受城市规模影响。城市轨道交通规划设计师应关注不同城市规模下的人口密度与站点数量的匹配问题。根据城市规模采用合理的线路布局,灵活调整轨道交通制式和运营方式。对于人口密度高、规模大的城市,应加强与其他交通方式的衔接,调整运营策略,增设商业、文化、娱乐等服务,引入智能设备实时监测客流情况,提高运输效率和客流吸引力。对于规模较小的城市,线路布局以构建高效的都市走廊为主,提高网络度中心性、介数中心性水平,重点关注核心区和枢纽站建设,提高站点和线路密度,并考虑使用轻轨、有轨电车等中低运量制式,灵活运营。

本研究尚存在以下不足:①主要选择2012—2020年投入运营的网络进行研究,缺乏远期规划线网的内容;②关于人口因素的研究未考虑人口结构变化,如年龄结构、职业分布等;③其他交通方式的影响中未

包括非机动车出行,未来可进一步考虑共享(电)单车、公共自行车等接驳方式对轨道交通客流量的影响。针对以上不足,在未来研究中希望可以进行更加深入的探讨。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2019 年度统计和分析报告[R/OL]. (2020-05-18)[2024-04-23]. <https://www.camet.org.cn/xytj/tjxx/5133.shtml>.
- [2] 游悠洋, 杨浩然, 王姣娥. “高铁流”视角下的中国城市网络层级结构演变研究[J]. 世界地理研究, 2020, 29(4): 773-780.
YOU Youyang, YANG Haoran, WANG Jiaoe. The structure evolution of China's urban networks from the perspective of HSR flows[J]. World regional studies, 2020, 29(4): 773-780.
- [3] LI Hongchang, LI Junru, ZHAO Xiaojun, et al. The morphological structure and influence factors analysis of China's domestic civil aviation freight transport network[J]. Transport policy, 2022, 125: 207-217.
- [4] HE Dan, CHEN Zixuan, PEI Tao, et al. Analysis of structural evolution and its influencing factors of the high-speed railway network in China's three urban agglomerations[J]. Cities, 2023, 132: 104063.
- [5] 王方方, 李香桃. 粤港澳大湾区城市群空间结构演化机制及协同发展: 基于高铁网络数据[J]. 城市问题, 2020(1): 43-52.
WANG Fangfang, LI Xiangtao. Evolution mechanism and coordinated development of spatial structure of Guangdong-Hong Kong-Macao urban agglomerations: based on high-speed rail network data[J]. Urban problems, 2020(1): 43-52.
- [6] YANG Haoran, DU Delin, WANG Jiaoe, et al. Reshaping China's urban networks and their determinants: High-speed rail vs. air networks[J]. Transport policy, 2023, 143: 83-92.
- [7] ZHANG Mengyao, HUANG Tao, GUO Zhaoxia, et al. Complex-network-based traffic network analysis and dynamics: a comprehensive review[J]. Physica A statistical mechanics and its applications, 2022, 607: 128063.
- [8] SABIDUSSI G. The centrality index of a graph[J]. Psychometrika, 1966, 31(4): 581-603.
- [9] 薛锋, 何传磊, 黄倩, 等. 多式轨道交通网络的耦合协调调度[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2040-2050.
XUE Feng, HE Chuanlei, HUANG Qian, et al. Coordination degree of multimodal rail transit network[J]. Journal of Jilin university (engineering and technology edition), 2021, 51(6): 2040-2050.
- [10] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告[R/OL]. (2024-03-29)[2024-04-23]. <https://www.camet.org.cn/xytj/tjxx/14894.shtml>.
- [11] 侯秀芳, 冯晨, 燕汉民, 等. 2023 年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 10-16.
HOU Xiufang, FENG Chen, YAN Hanmin, et al. Overview of urban rail transit operational lines in Chinese mainland in 2023[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 10-16.
- [12] 韩宝明, 余怡然, 习喆, 等. 2023 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 1-9.
HAN Baoming, YU Yiran, XI Zhe, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations worldwide in 2023: a review[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 1-9.
- [13] 国务院. 关于调整城市规模划分标准的通知: 国发[2014]51号[A/OL]. (2014-11-20)[2024-04-23]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/20/content_9225.htm.

(编辑: 傅依萱)

封面车站设计理念

北京地铁3号线朝阳公园站位于北京市朝阳区,车站北侧为朝阳公园,南侧为棕榈泉国际公寓,西侧为既有14号线朝阳公园站。车站为地下二层(局部三层)暗挖岛式车站,地下一层为换乘层,地下二层为站厅层,地下三层为站台层,总建筑面积约2.4万m²。装修设计以“四季语林”为主题,灵感源自朝阳公园中四季变幻的树林景观。将树冠进行抽象处理,以独特的空间结构形式呈现,结合灯光的色彩变化,把自然生态的空间语言巧妙地置入到轨道空间之中,为乘客在地铁空间中增添轻松趣味。朝阳公园站艺术品以“城市下·树林上”为主题,充分考虑朝阳公园的城市属性,融合公园及周边环境,以树林、城市、阳光等元素为创作来源,抽象的城市剪影为前景,阳光透过树林温暖了城市,呈现出和谐共生的画面。让乘客感受到朝阳公园大自然的生机和宁静、放松的氛围。

北京城建设计发展集团股份有限公司 段俊萍 供稿