

深圳城市轨道交通线网规划实施效果评估

郭莉 徐旭晖 殷嘉俊

(深圳市规划国土发展研究中心, 518040, 深圳//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:城市轨道交通是带动城市发展和提升综合交通水平的重要抓手,但其建设和运营投资对财政也是巨大考验。目前,我国城市轨道交通整体上客流强度偏低,需对线网规划实施效果进行评估。**方法:**以深圳市 2007 年版城市轨道交通线网规划的目标与实施情况为例,从空间协同、综合交通和运营可持续发展 3 个维度构建了城市轨道交通实施效果综合评估指标体系;并基于城市轨道交通客流数据、用地与建筑以及产业布局数据,多维度多视角地对既有运营网络进行了综合评估。**结果及结论:**城市轨道交通设施存在不同程度的加站和延长现象,这进一步降低了运营速度,对外围中心区的带动作用不明显;城市轨道交通对人口疏散作用明显,但加剧了职住分离、加强了中心放射走廊,分流了常规道路公交客流,公交分担率提升有限;城市轨道交通与用地在开发强度和时序方面匹配度不够,普速线路过长,末端客流有限,影响轨道整体运营效益。为此,从网络结构、建设时序、产业功能、TOD(公交引导发展)等方面提出城市轨道交通与空间结构和用地功能相协调、客流可持续的规划建议。

关键词 城市轨道交通线网规划;实施效果评估;时空协同
中图分类号 U231+.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.028

Evaluation of Shenzhen Urban Rail Transit Line Network Planning Implementation Effect

GUO Li, XU Xuhui, YIN Jiajun

Abstract Objective: Urban rail transit serves as a critical catalyst for city development and enhances overall transportation levels. However, the construction and operation investments pose significant challenges to public finances. Currently, passenger flow intensity of urban rail transit in China is generally low, necessitating an evaluation of network planning implementation effects. **Method:** Taking the 2007 version of Shenzhen urban rail transit line network planning as example, a comprehensive evaluation index system for the rail transit implementation effect is established from three dimensions: spatial coordination, comprehensive transportation, and sustainable development of operations. Based on urban rail transit passenger flow data, land-use and building information, as well as industrial layout data, a multi-dimensional and multi-

perspective assessment of the existing operational network is carried out. **Result & Conclusion:** Urban rail transit facilities exhibit varying degrees of station additions and extensions, leading to further reduction in operating speed and an unclear driving force in peripheral central areas. While urban rail transit plays a noticeable role in population dispersal, it exacerbates job-residence separation, strengthens central radiating corridors, diverts bus passenger flow on regular roads, and achieves limited improvement in bus share. Urban rail transit and land-use exhibit insufficient compatibility in terms of development intensity and sequence. Lengthy normal-speed routes with limited terminal passenger flows impact the overall operating efficiency of the rail transit. To address these issues, planning recommendations are proposed from the perspectives of network structure, construction sequence, industrial functions, and TOD (transit-oriented development) to enhance coordination of urban rail transit with spatial structures and land-use functions, ensuring sustainable passenger flow.

Key words urban rail transit line network planning; implementation effect evaluation; spatio-temporal synergy

Author's address Shenzhen Urban Planning and Land Resource Research Centre, 518040, Shenzhen, China

自 2010 年以来,我国城市轨道交通规划和建设成果突飞猛进。截至 2022 年底,中国大陆地区(不含港澳台)共有 55 个城市开通了城市轨道交通运营线路 308 条,运营线路总长度达 10 287 km。相比 2000 年,开通城市轨道交通的城市增加了 10 个,线路增加了 64 条,地铁运营里程增加了 1 728 km,增加比例为 28%。城市轨道交通被公认是大城市优化空间结构、提高综合交通水平的重要抓手。城市轨道交通可提升土地价值。然而,除了北上广深和长沙、西安等城市外,大部分城市的客运效益均较差,全国城市轨道交通平均客运强度仅为 0.4 万人次/(km·d)^[1]。城市轨道交通普遍存在客运强度偏低、门到门时间可达性无法与小汽车竞争,对出行结构的改善效果不理想,对空间结构的优化作用

不明显、TOD(公交引导发展)实施效果不显著^[2]等共性问题。

城市轨道交通与城市协同发展的内涵核心,是指城市轨道交通与道路公交 2 个系统在空间、时间和功能维度的相互协调^[2]。北京、上海、广州、武汉等城市从城市轨道交通与空间协同发展等视角开展了城市轨道交通实施评估^[3-7]。深圳市多中心的空间结构以及较为明显的二元化产业及城市特征决定了深圳的城市轨道交通客流既有超大城市普遍特征,也具有一定的特殊性。本文基于城市轨道交通客流数据、用地与建筑及产业数据,从城市轨道交通优化空间结构、提升综合交通水平以及轨道可持续运营 3 个方面,对深圳市轨道交通网络实施效果开展评估,并提出规划对策。

1 深圳城市轨道交通设施评估指标体系

1.1 城市轨道交通规划与实施情况

深圳市轨道交通规划(2007 年—2030 年)(以下简称“深圳 07 版城市轨道交通规划”)与城市总体规划同步编制,其规划了 16 条总长 585 km 的城市轨道交通网络(见图 1)。其中,近期建设线路为 12 条,总长度 427 km。截至 2022 年底,07 版轨道交通规划的线路除外围区的外环线外,其他线路基本建成,运营里程已达到 547 km。与线网规划对比(见图 2),超前建成中部轴带局域线(现深圳地铁 10 号线(以下简称“10 号线”))和东部快线(现深圳地铁 14 号线(以下简称“14 号线”))。未完成线路为深圳地铁 8 号线小梅沙段以及 3 号线保税区段。此外,深圳地铁 2、4、5、6、7、9、11 号线(以下简称“2 号线”“4 号线”“5 号线”“6 号线”“7 号线”“9 号线”)均比原规划线路有不同程度的延长。西部快线 11 号线和东部快线 14 号线均增加了站点,即 11 号线站点数量从 11 站增至 19 站(线路长度增加了 4 km),14 号线从 13 站增至 18 站。快线加站降低了全程旅行速度,影响了中心区到外围中心区的时间可达性。

1.2 轨道交通网络评估指标体系

布局吻合、功能融合、空间契合是城市轨道交通与城市空间协同的主要发展目标^[4]。在进入网络化运营阶段后,客流效益也应作为评价深圳轨道交通发展的核心指标^[8-9]。深圳 07 版城市轨道交通规划建设目标主要包括三方面:①带动近期重点开发地区的建设和重点改善地区的改造;②实现核心

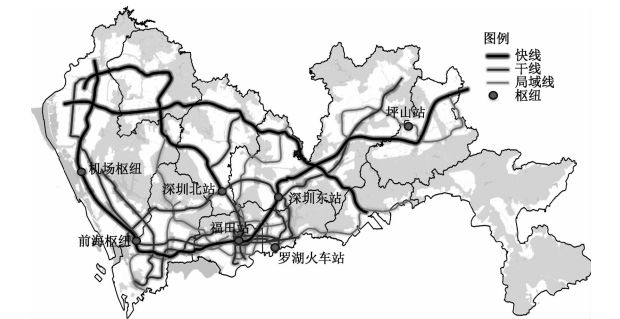


图 1 深圳 07 版城市轨道交通规划线网方案
Fig. 1 The shenzhen 2007 version of urban rail transit network planning



图 2 深圳现运营线与规划近期新建设线路对比
Fig. 2 Comparison between the current operating lines and the planned construction route for the near future

区与主要对外枢纽间的快速联系;③在主要交通走廊形成以轨道交通为骨干、与小汽车交通具有竞争力的公共交通体系,2020 年公交分担率占机动化 65% 以上,轨道交通占公交出行比例达到 50% ~ 55%。

结合文献及深圳市轨道交通规划建设目标,从空间协同、综合交通和可持续发展等视角构建深圳城市轨道交通实施效果综合评估指标体系,主要指标见表 1。

表 1 深圳城市轨道交通设施实施评估指标体系
Tab. 1 Evaluation index system of rail facility in shenzhen

目标	指标
空间协同:优化城市的多中心空间结构	人口岗位覆盖率;带动沿线发展率;用地结构优化率;提高中心区时间可达性率
综合交通:提升综合交通水平	与出行走廊契合率;轨道交通分担率;轨道换乘效率
可持续发展:注重和提高客流运营效率与效益	客运量与客运强度;出行距离与功能定位;客流高峰断面;站点客流量

2 城市轨道交通优化多中心空间结构

2.1 城市轨道交通的人口岗位覆盖密度

深圳城市轨道交通网络与全市人口岗位空间

分布的匹配度较高,基本实现了中心区和主要轴带的全覆盖。“中心网格+对外放射”的城市轨道交通网络形态契合了2010版“三轴两带多中心”的城市空间结构,线路基本覆盖了全市人口岗位高密度片区。现站点周边500 m的覆盖人口岗位密度为全国第一,高达4.6万人次/km²,远超北、上、广的3.4万~3.5万人次/km²^[10]。

深圳部分片区城市轨道交通建设时序与城市开发匹配度不高。南山科技园、宝安西乡以及深圳北站片区的线路覆盖不足,高峰期轨道交通压力大。而外围区段的线路建成快于城市开发,如6号线松岗段和10号线平湖段,其人口岗位密度低,轨道交通客流有限。

2.2 城市轨道交通带动沿线发展

深圳沿线人口增长速度快于非沿线。对比2010年,人口主要增长在核心区城市轨道交通沿线以及11号线、6号线和3号线外围区段。而居住建筑增量仅18%位于中心区,30%在都市核心区、52%在外围区。商业及办公建筑约一半增加在中心区,整体上中心区的职住分离加剧。工业建筑80%增长在外围区域,这与74%的私宅类建筑增量在外围区构成了平衡,外围片区职住平衡度高。

表2 中心区—外围中心公共交通与小汽车时间可达性对比

Tab.2 Comparison of time accessibility between public transportation and cars in central area-periphery center										
中心区	不同交通方式从外围中心到达中心区时间/min									
	光明中心		大空港		龙华中心		龙岗中心		坪山中心	
	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车	公共交通	小汽车
罗湖福田中心	64	48	84	43	35	23	63	33	106	57
前海南山中心	63	41	55	47	48	29	83	47	130	69

综上,城市轨道交通带动了沿线外围片区人口增长,也强化了既有中心放射走廊,支撑了总规提出的“三轴”的发展方向,但也带来了职住平衡加剧的问题。

此外,城市轨道交通建设时序与城市开发进度匹配度不够,科技园等重点片区城市轨道交通设施投入不够,而外围区普速线路延长对于带动城市发展作用有限,客流效益差。其次,快线引导城市用地结构优化及改善外围中心区可达性的优势明显,但在建设过程中,加站较多,使得既有轨道交通网络时间可达性未能达到目标值且难以与小汽车竞争。

2.3 站点用地结构优化

城市轨道交通站点周边容积率显著高于平均水平。根据现有建筑物普查数据统计,城市轨道交通站点周边500 m范围内的用地平均毛容积率为2.27,约为全市平均值(1.16)的2倍。

城市轨道交通站点周边用地结构明显优化。从2010—2019年,城市轨道交通站点500 m范围内工业及仓储用地占比从11.4%下降至7.6%,而商业及办公占比从19.3%提高至24.7%。

此外,快线对周边用地的带动和优化作用优于普线。城市轨道交通快线11号线开通3年,前海湾以北段站点500 m覆盖的居住和商办建筑量各增加了100万m²。而3号线北段(六约站—双龙站)开通3年,站点沿线建筑总量增加110万m²,居住建筑占比从71%提高至73%,城市轨道交通普线对用地优化作用不及快线。

2.4 外围中心时间可达性

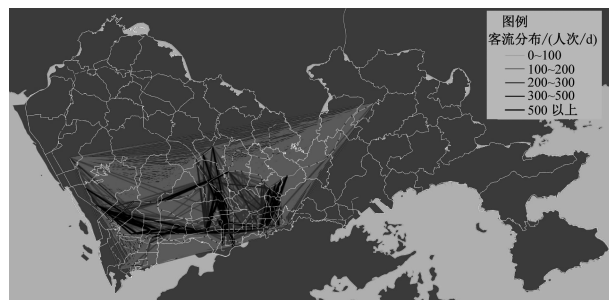
深圳07版城市轨道交通规划提出了城市内外围组团中心45 min通达的时间目标值(见表2)。由于线路加站以及网络换乘节点不足等原因,大多未能实现目标值。城市轨道交通相比小汽车时间可达性差距大,公共交通竞争力不足。

3 深圳城市轨道交通提升城市综合交通水平的分析

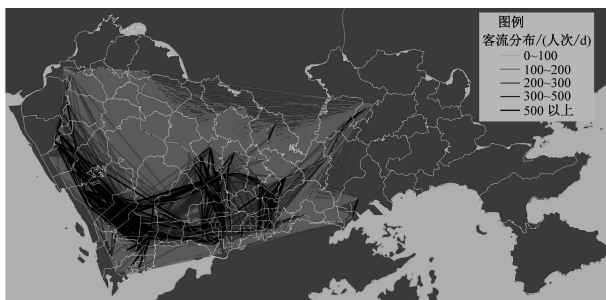
3.1 客流分布契合度分析

城市轨道交通客流与全市机动化出行分布契合度高,街道尺度的空间分布呈现双中心对外辐射特点。罗湖—福田中心区、南山—前海中心与都市核心区的交通联系强于外围地区。

城市轨道交通快线的辐射范围强度和范围明显强于普线。对比2014年与2020年的城市轨道交通客流分布情况,西部轴线长度和强度均增长明显,中部轴线次之,东部轴线相对缓慢(见图3)。普速线路如3号线辐射距离和强度明显不如西部快线11号线。



a) 2014 年站点客流起讫



b) 2020 年站点客流起讫

图 3 2014 年与 2020 年城市轨道交通站点客流空间分布对比

Fig. 3 Comparison of spatial distribution of passenger flow at urban rail transit stations in 2014 and 2020

3.2 出行方式结构优化

城市轨道交通在重点就业片区和关键走廊以及对外枢纽接驳中发挥了重要作用。早高峰进入市中心方向公共交通占比达 78%, 其中城市轨道交通占比高达 63%^[11]。城市轨道交通已成为对外枢纽接驳的主体, 火车站、机场、口岸等枢纽接驳中, 城市轨道交通分别占到 58%、28% 和 32%。

但常规公交与城市轨道交通“此消彼长”, 大公交体系整体竞争力不足。2020 年, 全市城市轨道交通、常规公交和出租车方式占机动化出行方式的 44%, 远未达到深圳 07 版城市轨道交通规划目标。新开通轨道线路乘客出行问卷调查也表明, 约 71% 的城市轨道客流来自常规公交。

3.3 换乘效率分析

深圳城市轨道交通换乘节点的客流组织设计较好, 换乘效率高。80% 以上客流的换乘时间控制在 3 min 以内。随着运营里程的增加, 城市轨道交通换乘系数从 2020 年的 1.62 提高至 2022 年的 1.77。

但核心区网络换乘节点不足, 又加剧了关键断面交通压力。“中心放射 + 半环线”的网络结构在一定程度上实现了外围换乘。但随着中心区重点就业片区的积聚和居住迅速外溢, 南山区—龙华区、南山区—光明区走廊客流量大幅增长, 5 号线半环线不能直达南山科技园等核心就业点, 龙华片区客流需进入中心区后再换乘至西向科技园, 既有设施应对不足。

综上, 深圳城市轨道交通客流出行分布与机动化出行分布一致, 并强化了中心放射的发展走廊; 在出行结构方面, 城市轨道交通占比大幅提高, 但公共交通整体分担率止步不前; 城市轨道交通换乘节点效率高, 但放射线路对中心区的多中心就业点

覆盖和网络换乘功能不强, 关键断面压力大, 网络韧性不足。

4 深圳城市轨道交通运营效益

4.1 客运量与客运强度

截至 2020 年底, 深圳城市轨道交通线路长度排名全国第五, 客运强度排名全国第二, 仅次于广州, 客流效益相对较好。但除 1 号线和 5 号线外, 其他城市轨道交通线路客运强度均低于 2 万人次/(km · d), 客流边际效应递减现象明显, 见图 4。

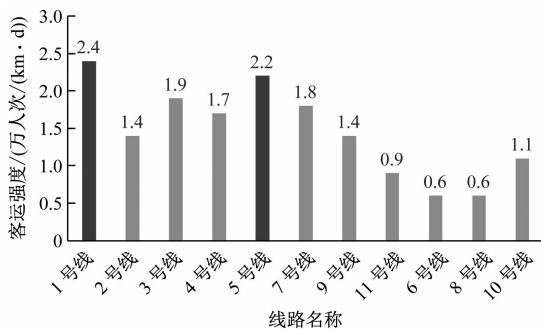


图 4 深圳城市轨道交通各线路客运强度

Fig. 4 Passenger transport intensity of Shenzhen urban rail transit lines

4.2 出行距离与功能定位

根据 AFC(自动售检票)数据以及城市轨道交通乘客出行调查数据分析, 深圳城市轨道交通平均运距为 13.9 km, 主要承担中长距离出行, 与其规划定位吻合。从出行时间分析, 80% 的乘客乘车时间为 40 min, 两端接驳时间约为 20 min。

城市轨道交通客流主要在中心区对外放射 25 km 范围内。一方面中心区对外放射城市轨道交通 1 h 可达范围基本在 25 km 内; 另一方面外围片区工业占比高, 慢行出行为主, 城市轨道交通需求不足。以 4 号线为例, 2020 年 4 号线从 20 km 延长至

30 km,但延长段全天客流量仅 6 万人次,占全线客流的 10%,客流强度大幅下降。

4.3 高峰断面客流特征

早高峰客流呈现高峰系数大、向心性和潮汐性强的特征,故运营压力大。中心放射线路客流潮汐性和向心性明显,如 1 号线、3 号线、4 号线和 11 号线,进关方向客流是出关方向客流的 1.6~2.9 倍,跨原二线关断面能力不足。中心区对外客流极小,高峰断面不足 8 000 人次/h,运能浪费严重。中心区内线路运能富裕,饱和度低。外围段客流尚未培育起来,客流量级大部分低于 5 000 人次/h,高峰断面客流量小。

外围就业中心可以平衡客流潮汐性。4 号线已开通 10 年,早高峰进出中心区方向客流比为 3:1。与之区位相似的放射线 10 号线 2020 年 10 月才开通,但由于串联了华为等产业片区,早高峰进出中心区客流比为 1.8:1,进、出中心区方向高峰断面分别为 3.8 万人次/h、2.0 万人次/h。

4.4 站点客流量

站点上客量排名前 30 的站点占全市客运量 48%,主要以换乘站、核心就业点、高密度居住点为主。进站客流量最大的站点集中在二圈层,且主要为城中村类型,早高峰排名前 20 的站点进站量占总量的 35%。出站客流量最大的为核心就业片区,出站客流量排名前 20 的站点占总量 43%。约 16% 的车站全天进出站量不足 1 万人次,远低于全市站均

水平(4.6 万人次/d)。

地铁客流在中心区就业点的积聚特征明显。中心区内核心就业片区岗位总数占全市 15%,早高峰轨道客流占全市轨道交通客流的 40%(见图 5)。虽然核心就业片区吸引了大量地铁客流,但主体为通勤客流。核心就业点之间的客流极为有限,就业点之间的客流仅占片区吸引客流的 8.6%。图 6 为核心就业片区早高峰吸引客流分布。

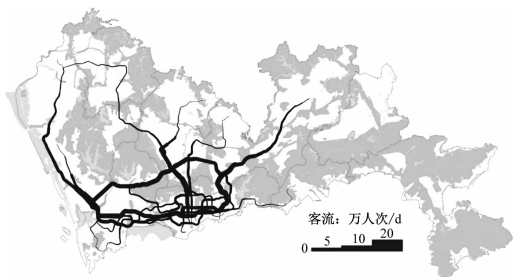
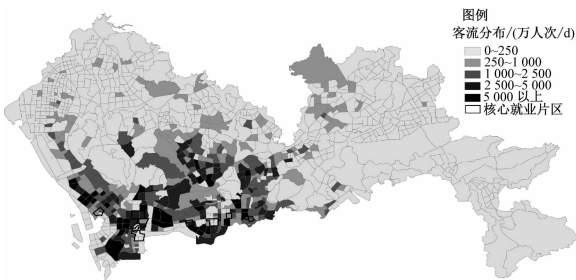


图 5 深圳城市轨道交通全天客流断面分布
Fig. 5 Distribution of whole-day passenger flow sections in Shenzhenurbanrail transit in Shenzhen urban rail transit

研究核心就业片区的就业岗位类型,发现计算机及信息传输业和金融业等创新性和高端服务业占比高的片区,轨道交通客流吸引辐射范围更大^[12],轨道交通出行分担率更高。金融业、软件和信息技术服务业从业人员轨道交通分担率分别达到 36%、30%,而人数占比最高的制造业人员轨道交通分担率仅 3%。



a) 核心就业片区早高峰出发地分布



b) 核心就业片区早高峰使用轨道交通方式通勤起迄

图 6 核心就业片区早高峰吸引客流分布

Fig. 6 Distribution of passenger flow during morning peak hours in the core employment area

5 结语

深圳市轨道交通四期线路建成后,其运营网络将达到 650 km。在人口和空间增长有限的背景下,城市轨道交通与城市结构的时空协同及城市轨道交通的可持续发展应成为城市轨道交通建设需要

考虑的关键因素。

1) 提高快线速度目标值,加强公共交通竞争力。深圳在全市层面具有多中心空间结构,在中心区也有多个高密度就业点。既有网络已无法适应“多心、多方向放射”的客流需求。因此,一方面需要优化网络,以实现多中心多方向快线网络换乘效

率提高;另一方面在时间目标值上,需考虑两端接驳时间以及换乘时间,内外组团中心出行目标值应设置在30 min以内。严格控制站点数量,构建覆盖全市域“一核多心网络化”中心体系的轨道快线骨干网络。

2) 分批分段建设普速线路,保障客流效益。从全市出行特征看,外围片区工业以及城中村占比高,职住平衡度高,出行距离短;且空间分布呈现组团化和网络化特征,长距离轴带出行比例小。因此,普速线路外围客流十分有限。建议结合城市发展分段建设放射性普速线路,在外围中心区构筑公共交通一体化枢纽,通过常规道路公交、共享单车实现城市轨道交通延伸覆盖功能。

3) 加大外围产业扶持力度,促进反向职住平衡及城市轨道交通效益提升。就业点之间城市轨道交通客流极为有限,应以服务通勤客流为主,串联中心区高密度就业片区与高密度居住点。建议加大对外围片区高新技术类产业扶持力度,支撑外围就业中心的培育,促进职住双向平衡,减少客流潮汐性,以提高城市轨道交通网络运营效益。

4) 重视培育多中心城市轨道交通网络换乘节点的韧性与便利性。城市轨道交通换乘系数随着城市轨道交通网络增加而不断提高,全网客流中进、出站在同一条线的客流占比仅为29%。未来城市空间结构逐步从“轴带”向“网络均衡化”发展,出行需求也呈现出“长距离轴带+组团间网络化”双重特征。目前,中心放射网络的换乘功能较弱,需要更加重视网络结构以及节点的换乘便利性。

5) 坚持城市轨道交通主导的TOD开发模式,实现土地高效益开发与财政可持续发展。产业功能和布局对城市轨道交通客流影响巨大,为促进公共交通与土地利用协调发展,应确立城市轨道交通引导城市更新及土地整备的存量开发模式。因此,一方面,结合周边城市轨道交通线路及站点能级,合理管控用地性质、开发规模以及建设时序;另一方面,优先选择商办建筑占比高的区域布设城市轨道交通站点,提高城市轨道交通客流效益。此外,在轨道交通条件好的片区优先布局计算机与信息传输业、金融业等科创和高端服务业产业,优化站城关系,以促进城市轨道交通可持续发展。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通2020年度统计

和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2021.

China Association of metros 2020 statistical and analysis report on urban rail transit in China[R]. Beijing: China Association of Metros, 2021.

[2] 李崇旦. 杭州市轨道交通TOD(交通引导发展)模式的探索与实践[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 1.

LI Chongdan. Exploration and practice of rail transit TOD mode in Hangzhou[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 1.

[3] 张纯, 夏海山, 于晓萍. 轨道交通与城市空间发展协同的时空响应研究: 以北京为例[J]. 城市规划, 2020, 44(5): 111.

ZHANG Chun, XIA Haishan, YU Xiaoping. Spatiotemporal response of synergy development between rail transit and urban space: a case study of Beijing[J]. City Planning Review, 2020, 44(5): 111.

[4] 茹祥辉, 杨志刚, 郑猛, 等. 超大城市轨道交通与空间协同发展策略: 以北京市为例[J]. 城市交通, 2022, 20(2): 21.

RU Xianghui, YANG Zhigang, ZHENG Meng, et al. Strategies for coordinated development of rail transit and urban space in megacities: case study of Beijing[J]. Urban Transport of China, 2022, 20(2): 21.

[5] 徐士伟, 叶树峰, 赵雪, 等. 广州市城市轨道交通网络规划实施评估及建议[J]. 城市交通, 2022, 20(2): 41.

XU Shiwei, YE Shufeng, ZHAO Xue, et al. Assessment on the implementation of urban rail transit network planning in Guangzhou[J]. Urban Transport of China, 2022, 20(2): 41.

[6] 张安锋. 上海城市轨道交通网络规划实施评估[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(6): 1.

ZHANG Anfeng. Evaluation of Shanghai rail transit network planning implementation[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(6): 1.

[7] 李玲琦, 邹芳, 杨墨照, 等. 武汉市城市轨道交通建设规划实施评估[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 9.

LI Lingqi, ZOU Fang, YANG Zhaozhao, et al. Implementation assessment of Wuhan urban rail transit construction planning[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 9.

[8] 孙小丽, 李玲琦. 武汉市城市轨道交通实施评估与“十四五”发展思路[J]. 城市交通, 2022, 20(2): 59.

SUN Xiaoli, LI Lingqi. Implementation assessment and development concept of urban rail transit in Wuhan during the 14th Five-year Plan period[J]. Urban Transport of China, 2022, 20(2): 59.

[9] 由效铭, 张宁, 宗传苓, 等. 都市圈轨道交通一体化融合发展研究[J]. 城市交通, 2022, 20(2): 66.

YOU Xiaoming, ZHANG Ning, ZONG Chuanling, et al. Integrated development of rail transit in metropolitan areas[J]. Urban Transport of China, 2022, 20(2): 66.

[10] 北京城建交通设计研究院有限公司. 中国城市轨道交通沿线发展态势年度报告2021年[R]. 北京:北京城建交通设计研究院有限公司, 2022.

Shenzhen Planning and Land Development Research Center, 2020 Shenzhen resident travel survey and analysis[R]. Shenzhen: Shenzhen Planning and Land Development Research Center, 2021.

(下转第173页)