

广州市城市轨道交通网络规划实施评估及建议

徐士伟, 叶树峰, 赵雪, 莫琼

(广州市交通规划研究院有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 随着粤港澳大湾区规划建设推进、广佛同城化提速、广州都市圈提质升级, 亟须对广州市城市轨道交通网络规划开展实施评估。回顾广州市城市轨道交通发展历程, 与北京、上海以及国外城市的建设速度、建设思路、客流特征等进行比较分析, 研判当前发展阶段和总体建设思路。从支撑城市空间结构、促进区域协同发展、在综合交通中的地位、客流特征分析、建设时序影响以及网络结构评估等方面对广州市城市轨道交通网络规划实施开展具体评估, 认为现状城市轨道交通网络满足现阶段城市发展和居民出行需求, 并起到引导城市发展作用。最后, 从加快都市圈轨道交通建设、加密中心城区网络、强化衔接线路建设、合理把握建设时序等方面提出下阶段广州市城市轨道交通建设规划实施建议。

关键词: 城市轨道交通; 规划建设; 实施评估; 区域协同; 网络结构; 建设时序; 广州市

Assessment on the Implementation of Urban Rail Transit Network Planning in Guangzhou

XU Shiwei, YE Shufeng, ZHAO Xue, MO Qiong

(Guangzhou Transport Planning Research Institute Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510300, China)

Abstract: With the progressive planning and construction of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, the acceleration of Guangzhou-Foshan integration, and the quality improvement and upgrade of Guangzhou Metropolitan Area, an assessment on the implementation of urban rail transit network planning in Guangzhou is much needed. Based on a review of the urban rail transit development in Guangzhou, this paper identifies the current development stage and overall construction concept through comparing Guangzhou with Beijing, Shanghai, and other international cities in terms of rail transit construction speed, construction scheme, and passengers flow characteristics. An assessment on the implementation of urban rail transit network planning in Guangzhou is conducted from several aspects: urban spatial structure support, regional coordinated development, functionality in comprehensive transportation, passengers flow characteristics, construction scheduling impact, and network structure. The existing urban rail transit network meets current urban development demand and residents' travel demand, and plays a guiding role in urban development. Finally, the paper provides suggestions on the implementation of urban rail transit construction planning in the next stage, including accelerating the construction of rail transit in metropolitan areas, increasing rail transit network density in central urban areas, strengthening the construction of connecting lines, and properly controlling the construction scheduling.

Keywords: urban rail transit; planning and construction; assessment on implementation; regional coordination; network structure; construction time scheduling; Guangzhou

收稿日期: 2021-09-10

作者简介: 徐士伟(1975—), 男, 山东滕州人, 硕士, 教授级高级工程师, 轨道交通所所长, 主要研究方向: 轨道交通规划。E-mail: 390353624@qq.com

0 引言

广州市1989年启动地铁1号线规划建设, 至2022年3月, 已建成由15条(段)线路组成的城市轨道交通网络(含市域快速轨道交通、地铁, 不含有轨电车), 总长约

589.3 km(含广佛线全线), 全国排名第三, 仅次于上海市和北京市。

随着粤港澳大湾区规划建设大力推进、广佛同城化进入深水区、广州都市圈提质升级, 广州市城市轨道交通建设速度将持续加快。根据《广州市轨道交通线网规划

(2018—2035年)》，广州市城市轨道交通网络规模将达到53条线路，总长超2 000 km。为此，有必要对标国内外先进城市，理性研判广州市城市轨道交通建设速度、建设思路和客流特征，综合分析城市轨道交通在广州市社会经济发展、城市规划建设、公共交通引导等方面发挥的作用，对城市轨道交通网络的客流演变、建设时序、网络结构进行系统评估和经验总结，提出广州市下阶段轨道交通规划建设的实施建议。

1 广州市城市轨道交通发展回顾

1.1 建设规划及网络形成历程

广州市城市轨道交通建设规划分为四个阶段(见图1)。1)2005年之前，城市轨道交通按照独立线路申报立项，合计获批3条线路，共计74.78 km，以后分批次申报建设规划。2)第一期建设规划及调整，《广州市城市快速轨道交通近期建设规划(2005—2010年)》及《广州市城市快速轨道交通近期建设规划调整(2009—2012年)》获批12条(段)线路，总长216.22 km，功能以服务主城区出行及强化外围机场、铁路枢纽集疏运为主。3)第二期建设规划，《广州市城市轨道交通近期建设规划(2012—2018年)》获批7条(段)线路，总长228.9 km，形成“十字+环”网络骨架，支撑人口、产业向外围区疏解，支持战略发展平台建设。4)第三期建设规划，《广州市城市轨道交通第三期建设规划(2017—2023年)》获批10条(段)线路，总长258.1 km，新建中心城区加密网络，建设

18号线和22号线两条高标准市域快速轨道交通(以下简称“市域快轨”)。至2023年，广州市将形成由18条总长超800 km线路组成的城市轨道交通网络^[1]。

广州市城市轨道交通网络形成大体分四个阶段(见图2和表1)：

1) 2003年及以前为缓慢发展期。通过建设十字形轨道交通1号线、2号线缓解中心城区交通拥堵，解决客流输送问题。城市轨道交通作为新型出行方式逐步得到通勤、通学群体的认可，集聚效应初显。由于网络规模小、服务范围有限，平均乘距仅为5.3 km、客运强度较低。

2) 2004—2010年为建设起步期。开通支撑天河区城市建设及广佛同城、近郊枢纽集疏运的线路(轨道交通3号线、4号线、5号线、8号线等)。网络规模达到8条线路共236 km，网络化效应明显，客流增速显著，达到400万人次·d⁻¹。通过线路间换乘有效扩大了网络可达范围，平均乘距增长1倍，客运强度虽有波动但总体呈上升趋势。

3) 2011—2014年为建设平台期。城市轨道交通建设趋于平缓，客流进入培育期，客运量和客运强度稳步上升，换乘系数和平均乘距变化不大。

4) 2015年后步入快速发展期。逐步开通支持城市空间向远郊拓展的轨道交通9号线、14号线(14号线支线)、21号线、4号线南延线、13号线一期等线路，实现区区通轨道。郊区线的建设拓展了城市轨道交通出行的可达性，平均乘距进一步增加。郊区线路沿线开发强度低，客流仍需较长的培育期；

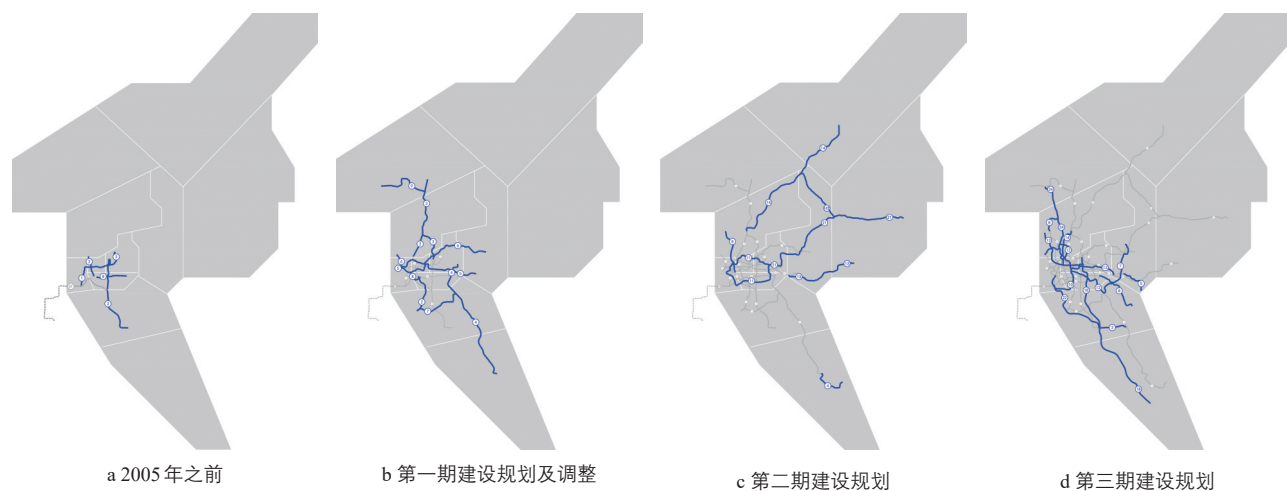


图1 广州市城市轨道交通建设规划历程

Fig.1 History of urban rail transit construction planning in Guangzhou

资料来源：根据文献[1]绘制。

部分郊区线或郊区线首通段未引入中心城区，郊区客流进出中心城区需要换乘1次以上。随着郊区线规模不断加大，网络整体客运强度逐渐下降，换乘系数不断增大，平均乘距不断拉长。

1.2 与国内外城市对比分析

从城市轨道交通网络形成历程来看，东京市域(郊)铁路^①建设早于地铁，早期以货运功能为主，联系中心城区与外围区域。二战后伴随城市重建、人口向中心城区回流，东京启动地铁建设，2010年，东京都区部(540 km²)建成13条总长357.5 km的地铁网络^[3]。同时东京都提出首都圈基本计划，通过改造和新建至今形成超2 000 km的市域(郊)铁路网络，有效解决了长距离出行问题，支撑都市圈发展。

相比之下，中国城市轨道交通发展起步晚且没有丰富的既有铁路网络作为基础，以新建地铁线路为主，建设布局由中心城区向外围逐渐拓展，系统制式和网络层次相对单一。截至2020年底，北京、上海优先建成超过650 km的地铁网络，两市市域(郊)铁路均处于起步阶段。上海市金山铁路由既有货运铁路改建而来，运营里程约56.4 km；北京市利用既有铁路资源开行市域(郊)铁路4条，运营里程400 km^[4]。相比东京多层次轨道交通系统，广州、北京、上海等城市市域快速轨道交通网络尚处于起步阶段，规划建设任务任重而道远。

广州市城市轨道交通规划建设与中国其他超大城市进行相比具有以下特征：

1) 建设速度。广州市城市轨道交通建设规划启动年份与上海相近，但批复里程与上海有一定差距。上海起步早且经历了快速建设期，目前建设速度有所减缓；成都相对起步较晚，但近5年建设速度加快，仅4年时间建设了413 km地铁线路(见表2)。

2) 网络布局。北京、上海、成都等城市均已建成地铁环线，形成“环+放射”式网络布局，支撑切向和轴向客流出行，广州地铁环线仍在建设中。

3) 客运强度。北京、上海、广州等城市地铁建成网络与客流需求基本匹配，成都建设适度超前，客运强度不高。广州城市轨道交通网络规模全国排名第三，客运强度位列第一。广州市持续增长的客流需求与轨道交通建设速度的矛盾较为突出，主要表现为

轨道交通走廊3号线、5号线长期超负荷运行，导致网络整体客运强度较高；平均乘距比上海和北京少2~3 km，原因在于目前阶段广州郊区线路开通数量少、开通时间晚。

4) 车站覆盖率。北京首都功能核心区(92.5 km²)轨道交通车站800 m半径人口和就业岗位覆盖率达85%^[5]，上海内环以内(114 km²)轨道交通车站800 m半径面积覆盖率达86%。广州主城核心区(239 km²)轨道交通车站800 m半径人口覆盖率为60%，仍有提升空间。

2 城市轨道交通规划实施评估

2.1 对城市空间结构的支撑

从城市轨道交通网络对城市公共服务中心和城乡体系^②等重要节点的支撑来看，现状城市轨道交通已实现次级及以上公共服务中心与中心城区、南沙副中心和五大外围综合城区等城乡体系节点覆盖(见图3和图4)。

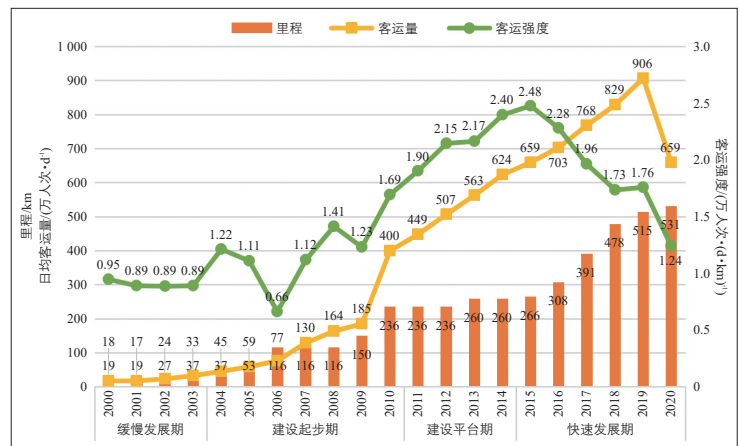


图2 广州市城市轨道交通网络和客流发展历程

Fig.2 Development of urban rail transit network and passengers flow in Guangzhou

资料来源：根据文献[2]绘制。

表1 广州市城市轨道交通网络阶段性客流特征指标

Tab.1 Characteristic indicators of phased passengers flow of urban rail transit network in Guangzhou

| 年份 | 客运量/ (万人次·d ⁻¹) | 客运强度/ (万人次·km ⁻¹ ·d ⁻¹) | 换乘系数 | 平均乘距/ km |
|-------|--------------------------------|---|------|-------------|
| 2003年 | 33 | 0.89 | | 5.3 |
| 2010年 | 400 | 1.69 | 1.65 | 10.8 |
| 2014年 | 624 | 2.40 | 1.67 | 11.5 |
| 2019年 | 906 | 1.76 | 1.79 | 13.8 |
| 2020年 | 659 | 1.24 | 1.83 | 14.4 |

资料来源：根据文献[2]整理。

中心城区、空港、科学城、白鹅潭、广州南站、创新城、科学城等公共服务中心有2条以上城市轨道交通线路支撑。南沙副中心和五大外围综合城区至少有1条城市轨道交通线路支撑其与中心城区联系，其中广州空港城内部建成轨道交通9号线提供组团内部服

务。新型城镇主要位于城市外围，发挥促进城乡均衡发展的功能，现阶段城市轨道交通覆盖较少。2021年9月轨道交通18号线开通和2022年3月轨道交通22号线开通后，中心城区与南沙副中心、番禺南部创新城联系时长均可控制在30 min内，中心城区与其

表2 超大城市轨道交通建设规划和实际建设线路

Tab.2 Rail transit construction plan and constructed lines in megacities

| 城市 | 启动年份 | 已批复建设规划网络里程/km | 实际建设网络里程 ^[6] /km(截至2020年底) | 建设完成度/% | 客运量 ^[9] /(万人次·d ⁻¹)(2020年) | 客运强度 ^[9] /(万人次·(km·d) ⁻¹)(2020年) | 平均乘距 ^[6] /km(2020年) |
|----|-------|------------------------------|---------------------------------------|---------|---|---|--------------------------------|
| 上海 | 1990年 | 1 154 (2023年) ^[7] | 693.8 | 60.1 | 779 | 1.07 | 16.27 |
| 北京 | 1965年 | 1 034 (2021年) ^[8] | 653.0 | 63.2 | 626.9 | 0.78 | 17.16 |
| 广州 | 1989年 | 845 (2023年) ^[9] | 531.0 (含广佛线) | 62.8 | 660.2 | 1.24 | 14.35 |
| 成都 | 2005年 | 684 (2024年) ^[10] | 518.5 | 75.8 | 399.2 | 0.72 | 13.37 |
| 深圳 | 1998年 | 645 (2022年) ^[11] | 410.9 | 63.7 | 479.4 | 1.13 | 13.23 |

注：2020年受疫情影响客运强度有所下降，但各城市相对排序变化不大。
资料来源：根据文献[6-11]整理。

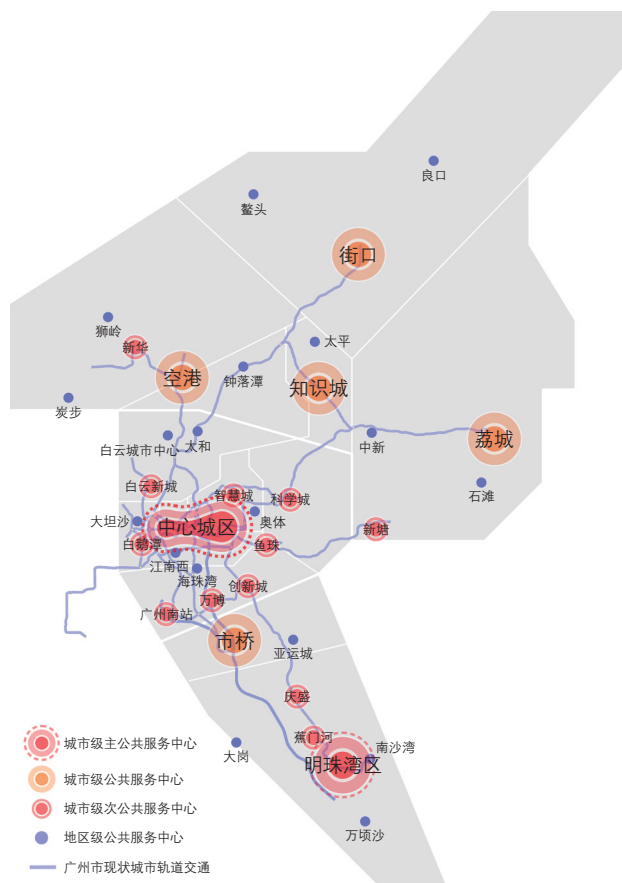


图3 城市轨道交通与公共服务中心耦合分布

Fig.3 Coupled distribution of urban rail transit and public service centers

资料来源：根据《广州市国土空间城市总体规划(2021—2035年)》草案绘制。

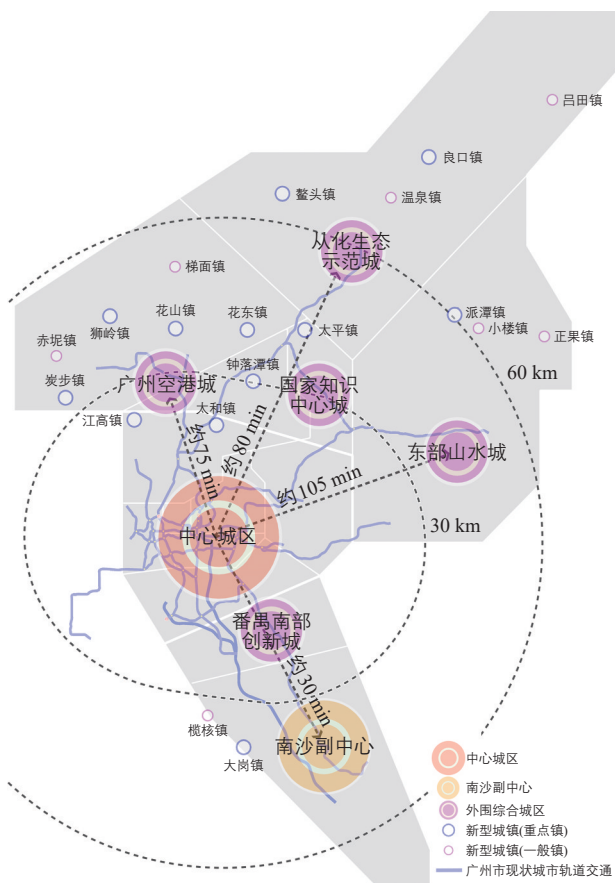


图4 城市轨道交通与城乡体系耦合分布

Fig.4 Coupled distribution of urban rail transit and urban-rural system

资料来源：根据《广州市国土空间城市总体规划(2021—2035年)》草案绘制。

他外围综合城区间则需1 h以上，联系效率有待加强。

从城市轨道交通网络与客流走廊的耦合分布来看(见图5)，中心城区范围内绝大多数客流走廊已实现城市轨道交通线路覆盖，仅有宝岗大道、广州大道、机场路、东风路、黄埔大道等客流走廊现阶段暂无覆盖，但可通过与走廊相距1 km以内的平行轨道交通线路服务，基本满足现阶段居民出行需求。从线路负荷情况来看，即使受疫情影响，2020年轨道交通3号线、5号线等骨架线路高峰断面客流量仍保持在4万人次·h⁻¹以上，其中3号线早高峰断面客流量超过5万人次·h⁻¹，满载率达120%，出现了超负荷运行的情况，服务水平有待提升，亟须建设平行线路分流。

从城市轨道交通网络对城市建设支撑来看，线路走向与建成区分布基本协调(见图6)，但仍有部分建成区缺乏轨道交通线路覆盖，如东部黄埔区、南部番禺区及白云区北部地区等。

综上，广州市现状城市轨道交通网络与城市重要节点、客流走廊、建成区多方面耦合度较高，能够较好支撑现阶段城市发展，但部分节点联系效率、大客流走廊的服务水平、建成区的覆盖范围等方面仍需进一步提升。

2.2 对区域协同发展的促进

在广州与周边城市融合发展进程中，广佛同城化已成为典型。2019年，广州、佛山两市间机动化出行量达176万人次·d⁻¹，占广州与粤港澳大湾区其他城市机动化出行总量的60%。其中，通勤机动化出行量为70万人次·d⁻¹，占两市机动化出行量的40%，与广州市内部出行通勤机动化比例(40.8%)相当。广佛通勤人口中，广州居住佛山就业的人口约占40%，佛山居住广州就业的人口占60%^[12]。

2010年以来，两市间基于广佛线的出行量逐年增加，2019年达到16万人次·d⁻¹，约为2011年的3倍，占广佛边界中段(佛山南

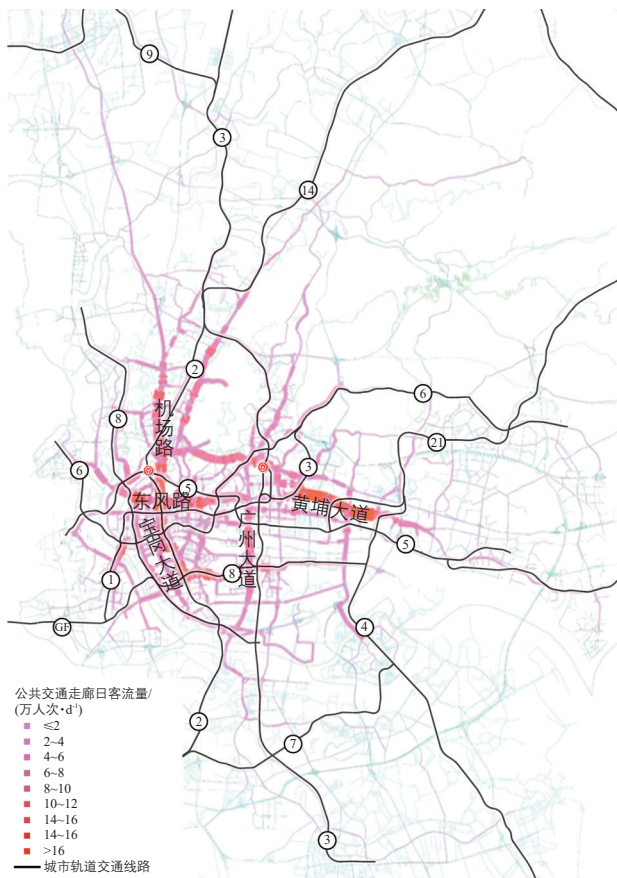


图5 广州市城市轨道交通网络与客流走廊耦合分布
Fig.5 Coupled distribution of urban rail transit network and passenger corridors in Guangzhou
资料来源：文献[1-2]。

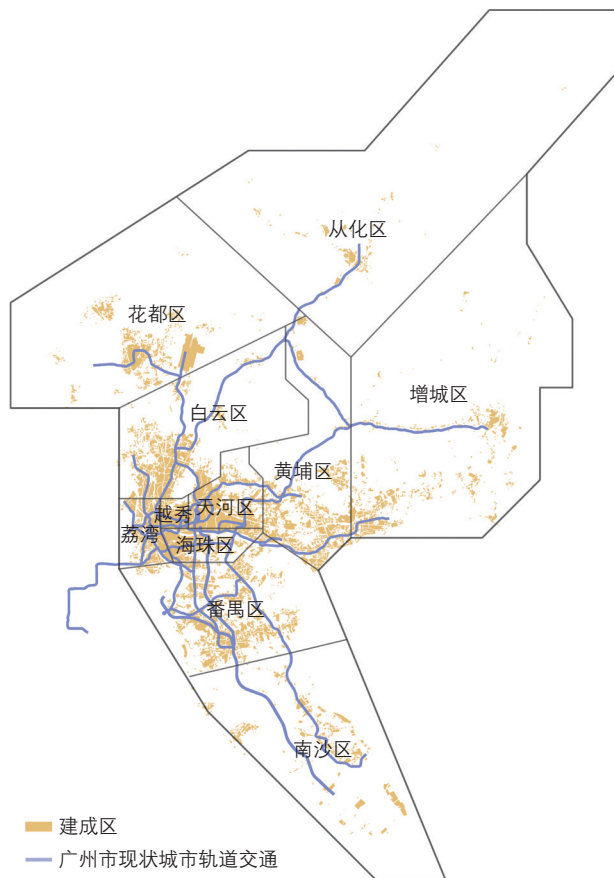


图6 城市轨道交通与城市建成区耦合分布
Fig.6 Coupled distribution of urban rail transit and urban built-up areas
资料来源：文献[1-2]。

海/禅城—广州荔湾/海珠)日均跨界机动化出行量的28%。广佛线方向不均衡系数仅为1.5, 低于广州境内番禺、白云、黄埔方向(3.0以上)线路。可见, 广佛线在促进同城化发展过程中, 双向通勤特征明显, 并非简单的居住蔓延带来的单向吸引, 体现了“双向对等”特征。

如图7所示, 广佛边界中段(佛山南海/禅城—广州荔湾/海珠)在轨道交通支撑下, 呈现连绵发展态势。相比而言, 穗莞边界与广佛边界区域皆处于广州都市圈30 km圈层以内, 具有相似的空间优势, 而穗莞边界出行强度较低, 出行生成区域分布较散碎, 除

狮子洋、东江等地理阻隔因素外, 其中不乏轨道交通衔接不足的问题。

2.3 在城市客运交通中的地位

1) 公共交通出行比例。

2010年以来, 随着城市轨道交通运营里程翻倍, 轨道交通占公共交通出行比例由30.3%增长至2019年的49.0%, 已占据公共交通主体地位, 超过《广州市城市总体规划(2011—2020年)》提出轨道交通占公共交通比例40%的目标。相比常规公共汽车交通(以下简称“常规公交”), 城市轨道交通更准时、舒适性更高, 常规公交部分客流向城市轨道交通转移现象合理。然而, 公共交通占机动化出行比例变化不大, 保持在45%左右, 与《广州市城市总体规划(2011—2020年)》目标有一定差距, 公共交通基础设施建设未充分体现提高公共交通出行分担率的效果(见图8)。

2) 客流波动规律。

从城市轨道交通出行目的构成来看, 通勤、通学等刚性出行约占50%, 与探亲访友、文娱等弹性出行需求相当。对比网络客流周波动规律发现(见图9), 北京和上海城市轨道交通客流呈现明显通勤特征, 非工作日与工作日客流总量差异明显, 而广州差异相对较小。从网络客流日波动规律来看(见图10), 北京、上海、广州3座城市均有明显早晚高峰特征, 但广州早晚高峰客运量比例低于其他城市, 平峰客运量比例则相反, 整体高峰系数更低, 客流时间分布更加均衡。可以看出, 广州居民对城市轨道交通出行方式接受程度高, 出行目的并非集中于刚性需求, 说明城市轨道交通的社会、经济效益均得到了更好发挥。

3) 与对外交通枢纽的衔接。

城市轨道交通已成为广州对外交通枢纽主要的集疏运方式。现有主要的铁路和航空枢纽各有1条及以上城市轨道交通线路衔接, 接驳比例均达到35%以上, 其中广州东站和广州南站超过50%(见表3)。

各枢纽间通过城市轨道交通基本可实现1 h以内互通, 其中交互需求量最大的广州站和广州南站间可实现30 min直达。但是, 广州南站作为主要高铁枢纽与白云机场间的联系时长超过1 h, 联系效率有待提升(见图11)。

综上, 广州市现状城市轨道交通可较好

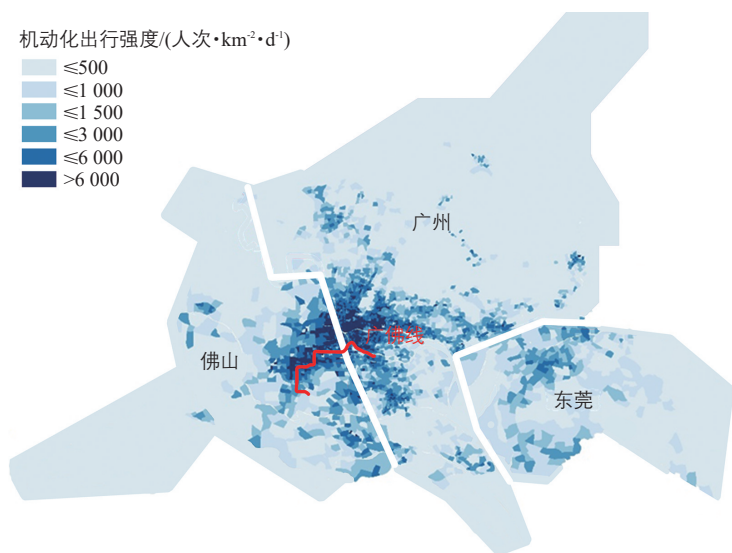
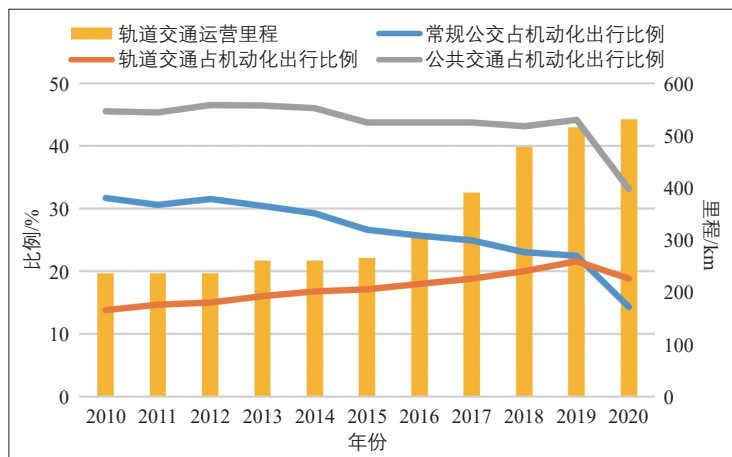


图7 广佛、穗莞边界机动化出行强度分布
Fig.7 Distribution of motorized travel intensity at Guangzhou-Foshan boundary and Guangzhou-Dongguan boundary
资料来源: 文献[11]。



注: 2020年受疫情影响, 公共交通出行分担率出现一定下降。
图8 城市轨道交通运营里程及其占机动化出行比例
Fig.8 Operating mileage of urban rail transit and its mode share in motorized travel
资料来源: 根据文献[2]绘制。

地满足居民各类出行需求，衔接城市对外交通枢纽，占据机动化出行重要地位、成为公共交通出行主体，但仍面临与常规公交协同发展，提升公共交通与私人机动化出行之间的竞争力的挑战。

2.4 客流特征分析

考虑2020年和2021年疫情影响，采用2019年客流数据^[2]进行分析(见图12)。整体来看，2019年广州市城市轨道交通网络客运总量为906万人次·d⁻¹，全国排名第三；客运强度为1.76万人次·(km·d)⁻¹、全国排名第一，总体客流规模处于较高水平。从客流分布和服务功能看，广州市城市轨道交通贯彻了兼顾效益与公平的理念，其中以客流输送为目的的市区线(如1号线、2号线、3号线、5号线、6号线、8号线等)效益良好，50%的线路里程承担全网87%的客运量，客运强度为2.96万人次·(km·d)⁻¹，其中1号线客运强度达5.5万人次·(km·d)⁻¹；以引导城市空间发展和土地利用开发为目的的郊区线(如9号线、13号线、14号线及其支线、21号线等)，50%的线路里程承担全网客运量不足13%，客运强度为0.45万人次·(km·d)⁻¹，客运强度低的原因在于广州市远距离通勤比例较低，居民轨道交通出行主要集中在中心城区约20 km范围内。

综上，广州市中心城区轨道交通线路有力支撑了现阶段居民出行需求；外围城区的轨道交通线路建设适度超前，客流处于培育期，轨道交通客流效益的发挥受沿线土地开发程度制约。

2.5 建设时序影响

受地区发展水平、财政资金等客观因素影响，城市轨道交通的建设时序对既有网络、线路本身、车站等将产生不同实施效果。

1) 郊区线路接入。

广州市于2017年开通轨道交通9号线和13号线、2018年开通轨道交通14号线，这3条郊区线实现中心城区与广州空港城、从化生态示范城、东部山水城等外围综合城区联系，并在高增站、鱼珠站、嘉禾望岗站分别接入既有轨道交通3号线、5号线、2号线/3号线。由于当前广州市通勤距离达30 km的客流不多，9号线早高峰由高增站换乘进入3号线的客流仅有4 000人次·h⁻¹，对3号线接入点两侧区间断面客流饱和度等级无明显

影响。然而，2号线、3号线嘉禾望岗站受14号线一期接入影响较大。此前虽然2号线、3号线客运量逐年上升，但嘉禾望岗站换乘比例常年稳定在53%，由于14号线沿线

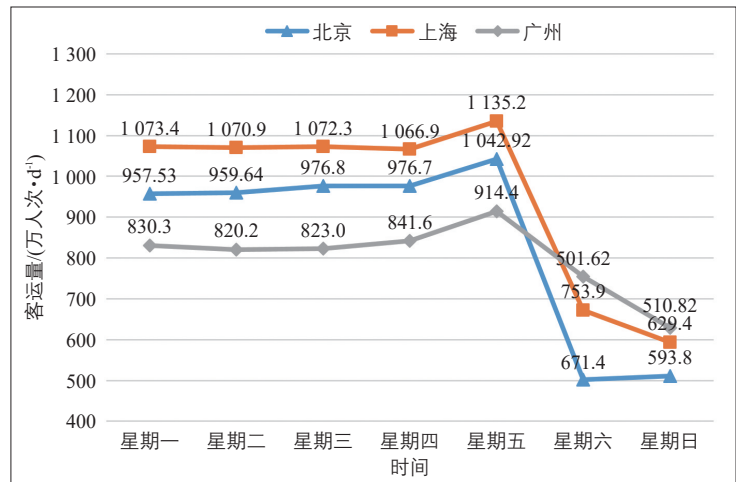
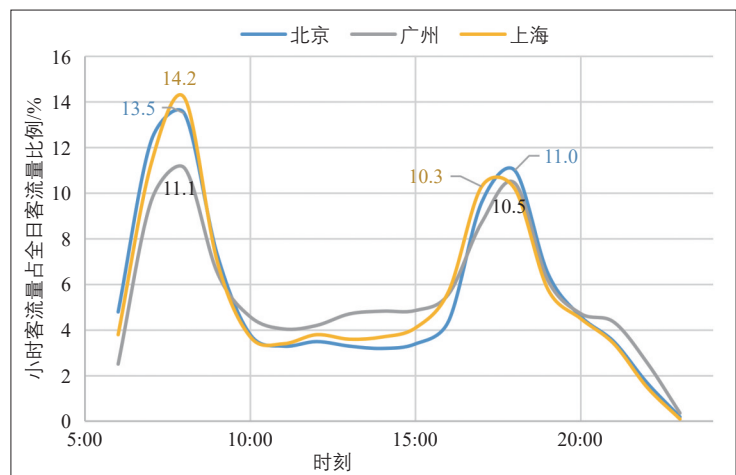


图9 超大城市轨道交通网络客流周波动规律

Fig.9 Weekly passengers flow fluctuation pattern of rail transit network in megacities

资料来源：根据各城市地铁集团2021年9月公布的客运量绘制。



注：北京和上海数据为2021年9月某工作日，广州数据为2019年全年工作日平均值。

图10 超大城市轨道交通网络日客流波动规律

Fig.10 Daily passengers flow fluctuation pattern of rail transit network in megacities

资料来源：根据各城市地铁集团提供客运量数据绘制。

表3 广州对外交通枢纽与城市轨道交通衔接情况

Tab.3 Connection between external transportation terminals and urban rail transit in Guangzhou

| 枢纽类型 | 名称 | 2020年日均旅客发送量/(万人次·d ⁻¹) | 衔接轨道交通线路 | 接驳比例/% |
|------|--------|-------------------------------------|----------|--------|
| 铁路枢纽 | 广州站 | 3.8 | 2号线、5号线 | 38 |
| | 广州东站 | 3.0 | 1号线、3号线 | 59 |
| | 广州南站 | 16.3 | 2号线、7号线 | 53 |
| 航空枢纽 | 白云国际机场 | 12.0(吞吐量) | 3号线北延段 | 44 |

资料来源：根据手机信令数据和广州地铁集团有限公司提供数据绘制。

白云区东北部及从化区乘客进入市中心必须通过嘉禾望岗站换乘2号线、3号线，导致车站换乘比例迅速提高至63%，客流对车站冲击较大。此外，不同于2号线、3号线1~5 min小间隔发车，14号线采用快慢车运营模式，发车间隔(8~35 min)差异导致嘉禾望岗站出现客流累积现象，给车站运营安全带来较大风险^[13]。

综上，广州市郊区线路以单点搭接形式接入中心城区既有线路，对既有线路整体客流影响不大，但对换乘站冲击较大，应慎重考虑衔接模式，并在先建线路中提前谋划预留站台空间。

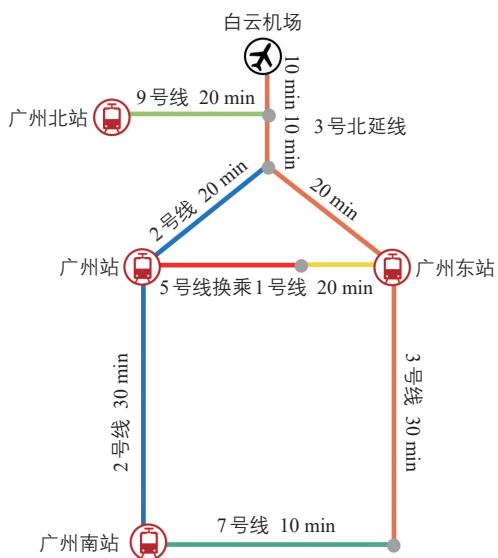


图11 广州市城市轨道交通衔接对外交通枢纽的时间
Fig.11 Connection timing of urban rail transit and external transportation terminals in Guangzhou

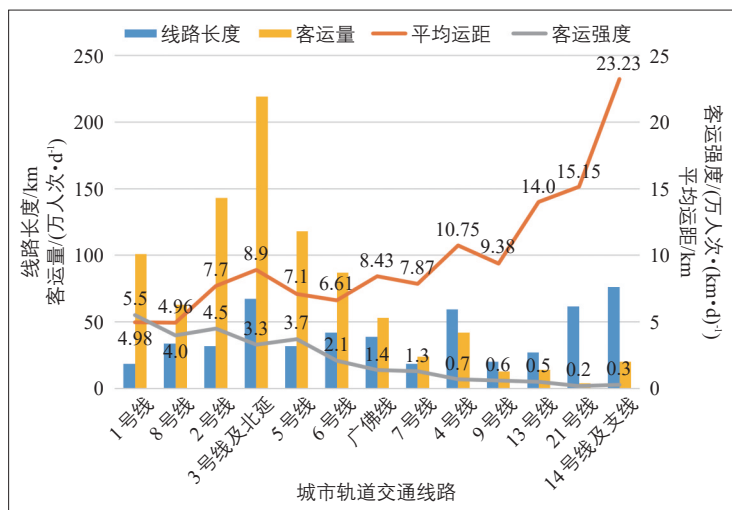


图12 广州市城市轨道交通线路里程及客流特征
Fig.12 Mileage and passengers flow characteristics of urban rail transit lines in Guangzhou

资料来源：根据文献[2]绘制。

2) 线路分段开通。

以广州市轨道交通6号线、14号线、21号线和广佛线为例进行分析。6号线一期位于中心城区，客流基础较好，开通2年客运强度达到2.5万人次·(km·d)⁻¹；二期向近郊区延伸，客运强度下降为1.6万人次·(km·d)⁻¹，但随着客流培育客运强度有一定回升(见图13)。广佛线向广州市中心城区延伸并建立多点换乘后，客运强度大幅提升。14号线支线开通早于主线，但独立于网络之外，开通初期日均客运量仅有1.6万人次·d⁻¹，直至主线开通才实现网络化运营，客运量有所提升。21号线类似，先开通远郊段，虽保证了网络化运营，但绕行距离过长、网络连接性较差；近郊段开通后直接进入中心城区，乘客出行时间减少50%，客运强度有小幅提升。

因此，城市轨道交通线路分段建设时，除沿线出行需求外，应尽可能考虑线路开通时段对分段开通线路与既有网络的连通关系的影响。

2.6 网络结构评估

最后回归网络结构本身，将广州现状城市轨道交通网络和已批复建设规划网络分别按照L空间拓扑规则构建网络结构图，形成以车站为节点、区间为边的拓扑结构。通过计算度、度分布和聚类系数3个指标来反映网络静态特征。

1) 节点度。

网络中与节点关联的边数为节点的度，度越大节点的重要性越高，度为奇数表明存在线路终止于此节点。广州现状网络节点最大度为5，为体育西站；规划网络节点最大度为6，包括西塍站和东湖站。

2) 度分布。

如表4和图14所示，现状与规划网络中度为2的节点比例较高，说明关联两条边的车站最多；其次是度为4的节点，即两线换乘车站较多。对比现状和规划网络的度分布，可以看到度大于2的节点比例提高，说明随着网络加密，换乘车站数量有所提升。度为3的节点是主要衔接外围接入线的车站，规划网络中度为3的节点比例有所下降，反映出随着既有线路二期工程建设，部分郊区线路不再以简单搭接的形式接入网络。同时随着部分新线路一期工程建设，度为5的节点比例有所提高。

3) 聚类系数。

网络内所有节点聚类系数的均值为网络

聚类系数，其中单个节点聚类系数等于所有与其相连的节点相互之间实际所连边的数量与可连出最大边数的比值^[14]，反映某个节点的邻节点也相互连通的可能性。计算可得广州现状网络聚类系数为0，说明现状网络各车站之间的相互联系较差。规划网络聚类系数为0.009；为了评估规划网络车站之间的联系效果，基于规划网络拓扑结构节点数和边数进一步生成100次对应随机网络，并求取随机网络聚类系数，可得100个随机网络聚类系数均值为0.005。规划网络聚类系数大于对应随机网络聚类系数，说明规划网络各车站之间的相互联系较好，但仍有提升空间。

4) 网络通达性评估。

通过线路分散指数可评估基于城市轨道交通网络结构的网络通达性。线路分散指数为每条线路的非换乘站到其他线路非换乘站的最少换乘次数总和(理想状态下，所有线路之间可互相换乘，线路分散指数为 $n(n-1)$ ，其中 n 为城市轨道交通网络线路数量)。网络通达性为理想状态下线路分散指数与实际线路分散指数之比，由于实际分散指数大于或等于理想分散指数，因此网络通达性指标值域为0~1，指标值越大，网络通达性越好。

广州市现状网络通达性为0.542，其中34%的线路可与其他线路直接换乘，47%的线路通过2次换乘可到达其他线路，3次换

乘主要集中于轨道交通14号线(为外围支线)与其他线路之间。随着广州市已批复建设规划中环线和中心城区加密线路建设的完成，网络通达性可达到0.665。

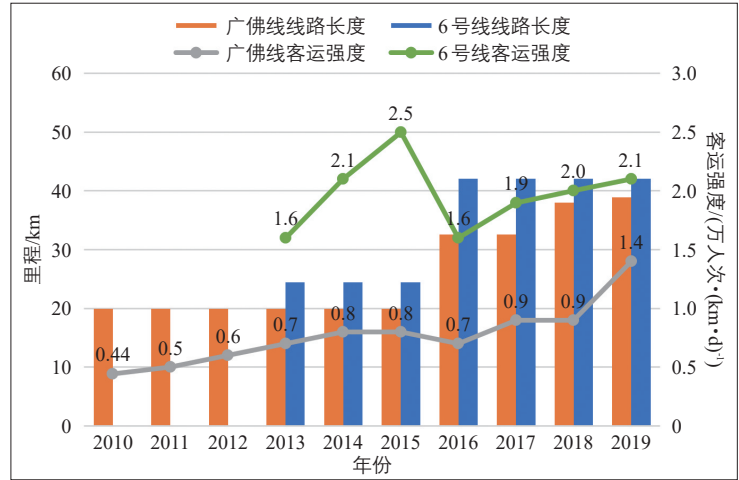


图13 城市轨道交通线路分段开通里程和客运强度

Fig.13 Section-based operating mileage and passenger intensity of urban rail transit lines

资料来源：根据文献[2]绘制。

表4 节点度分布

Tab.4 Node degree distribution

| 度 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------|-----|------|-----|------|-----|-----|
| 现状车站数量/个 | 14 | 189 | 13 | 20 | 1 | 0 |
| 所占现状车站比例/% | 5.9 | 79.7 | 5.5 | 8.4 | 0.4 | 0 |
| 规划车站数量/个 | 13 | 239 | 16 | 52 | 7 | 2 |
| 所占规划车站比例/% | 4.0 | 72.6 | 4.9 | 15.8 | 2.1 | 0.6 |

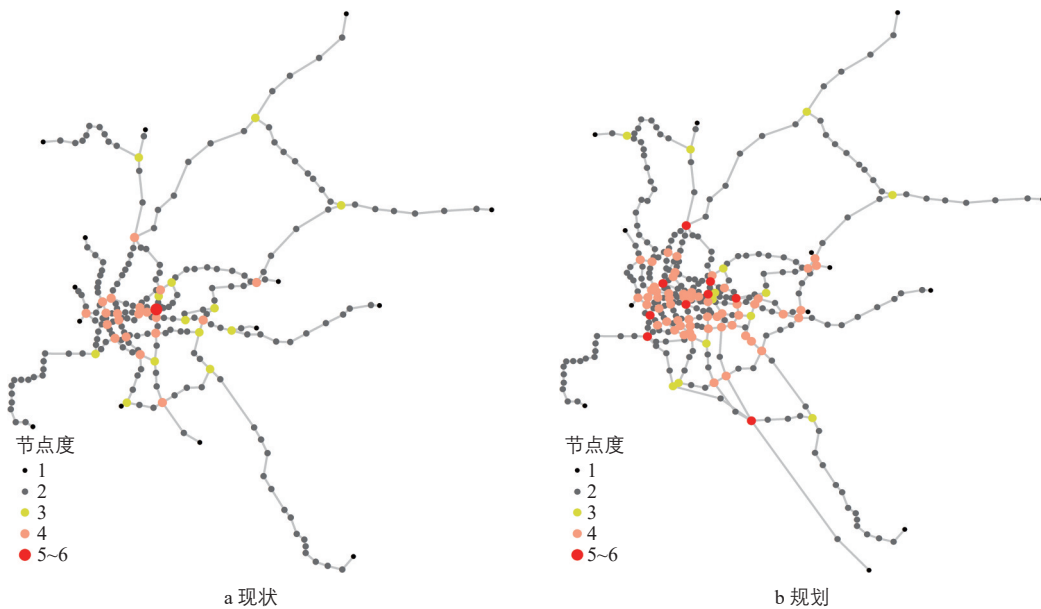


图14 节点度空间分布

Fig.14 Spatial distribution of node degree

资料来源：根据广州市现状城市轨道交通网络和已批复建设规划网络拓扑分析结果绘制。

3 新一轮城市轨道交通建设规划实施建议

3.1 加快推进都市圈轨道交通建设

随着粤港澳大湾区广州、深圳、珠江西岸三大都市圈格局的形成，广东省已明确广州地铁集团有限公司、深圳地铁集团有限公司分别承接广州都市圈、深圳都市圈的城际铁路建设与运营工作，未来以广州市为中心的都市圈多层次轨道交通将实现“一张网、一张票”公交化运营以支撑都市圈范围内通勤、商务出行。在广州市构建“中心城区、副中心城区、五大综合外围城区”的网络型国土空间新格局以及国家鼓励打造轨道上的都市圈新趋势下，广州市轨道交通建设应以增强市域空间组团联系和都市圈一体化发展为目标，加快推进市域快轨及城际铁路的实施，并考虑既有城际铁路、市域快轨以及新建都市圈轨道交通线路的互联互通^[15]。

一方面，在既有城际铁路、广州轨道交

通18号线和即将开通的轨道交通22号线基础上加快建成在建广清二期、琶洲支线、广佛东环等城际线路；推进已批复的《粤港澳大湾区城际铁路建设规划》佛山经广州至东莞城际(原规划广州28号线)、广州东至花都天贵城际(原规划广州18号线北延)、芳村至白云机场城际(原规划广州22号线北延)和广州南至广州站联络线等都市圈轨道交通线路实施，将城际铁路引入广州市中心，构建以广州市中心城区为中心向外放射的都市圈快速轨道交通体系。另一方面，推进广州境内22号线南延线、37号线、28号线支线等市域快轨近期建设，提升广州南沙、从化、增城与中心城区的联系效率。此外，为提升粤港澳大湾区广佛极点对外辐射能力，应同步推进广佛西环、广佛江珠城际近期建设。广州都市圈轨道交通近期建设建议如图15所示。

3.2 加密中心城区网络

过去30多年中，广州市城市轨道交通建

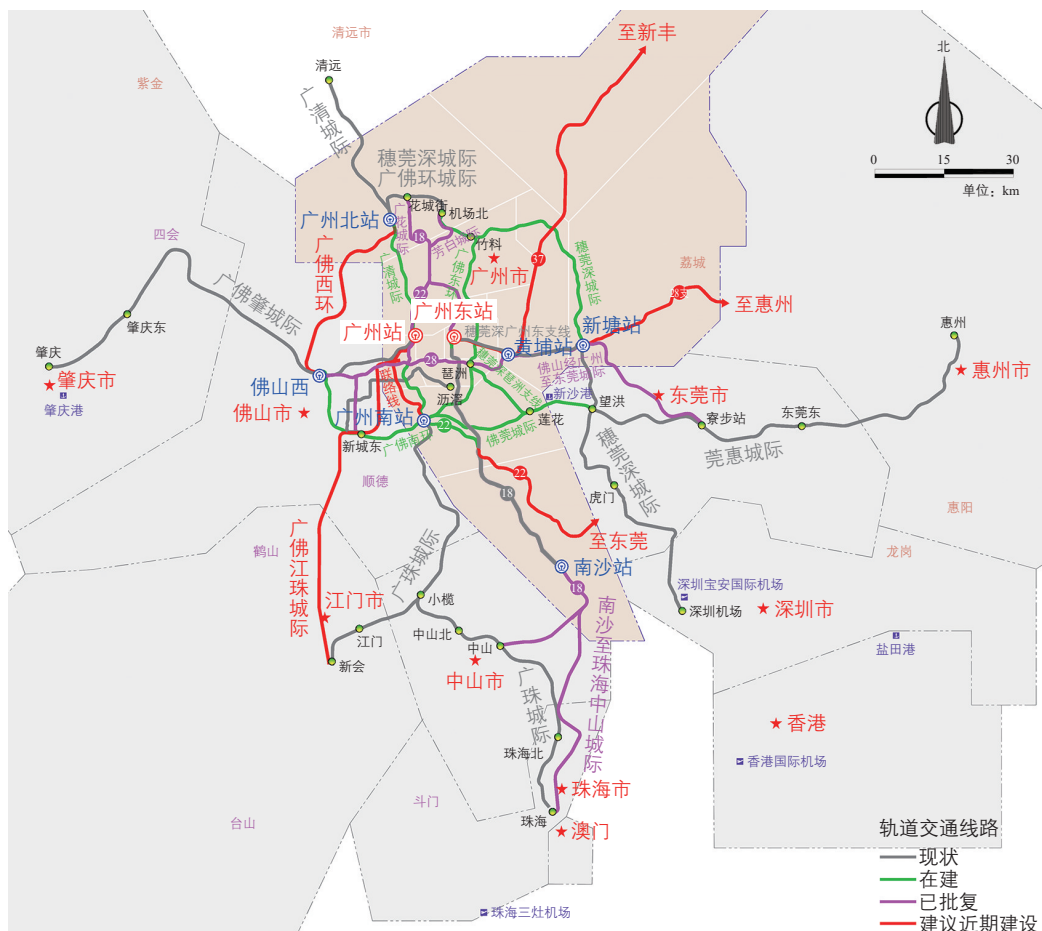


图15 广州都市圈轨道交通近期建设建议

Fig.15 Recommendations on near-term construction of rail transit in the Guangzhou Metropolitan Area

资料来源：根据《国家发展改革委关于粤港澳大湾区城际铁路建设规划的批复》(发改基础〔2020〕1238号)绘制。

设成效显著，在综合交通体系中占据重要地位，截至2020年底，中心城区已建成约300 km城市轨道交通线路，车站800 m半径范围实现47%人口覆盖，但对标北京、上海、巴黎、东京等城市仍有较大提升空间。当前，广州市正在推进建设11条(段)约280 km轨道交通线路，补充中心城区“X”形骨架，将轨道交通13号线、14号线直接引入中心城区覆盖中山大道、东风路走廊；建成地铁环线提高网络汇聚能力、改善换乘条件。至2023年底，中心城区网络规模将达到550 km，有效缓解既有轨道交通3号线、5号线客流压力。

随着广州国际金融城-黄埔临港经济区中央商务区(又称“广州第二CBD”)逐渐建成，广州东站、广州站和黄埔站等铁路枢纽改造和新建项目推进，大规模城市更新项目建设，以及人民日益增长的美好生活需要对城市轨道交通出行品质提出更高要求，中心城区轨道交通网络亟须进一步加密，实现客流走廊全覆盖，激发城市新活力。

因此，在既有和在建线路基础上，应推进规划东西向轨道交通25号线、南北向轨道交通26号线建设，构建中心城区又一“十字轨道骨架”，实现临江大道、广州大道走廊的覆盖。推进规划轨道交通19号线、23号线及10号线东延线近期建设，加密天河智慧城、黄埔开发区的轨道交通覆盖，从而巩固轨道交通在公共交通中的主体地位。广州市中心城区轨道交通近期建设建议如图16所示。

3.3 强化衔接线路建设

在与广州市接壤城市中，佛山市、东莞市与广州市中心距离最近(均在60 km内)、边界线最长(分别为197 km和99 km)，跨市出行需求日趋旺盛，2020年分别为176.3万人次·d⁻¹和46.1万人次·d⁻¹，占广州市与粤港澳大湾区城市出行总量的60%和16%。在《广州市国土空间总体规划(2021—2035)》提出广佛全域深度融合、穗莞一体化发展要求下，广佛、穗莞间轨道交通将朝着一张网发展，经协调已规划形成18条广佛衔接、6条穗莞衔接轨道交通线路；应借鉴广佛线在跨市轨道交通规划、建设和运营方面的成功经验，打破行政壁垒，协同推进跨市轨道交通线路建设，构建“中心直达、枢纽共享、边界融合、网络一体”的广佛、穗莞轨道交通

网络。

加快建成广州地铁7号线西延，推进已批复的佛山地铁11号线引入广州环线、佛山地铁4号线等线路实施，继续推进规划衔接线路建设。同时，在建设时序上进一步协同，如佛山地铁4号线近期将建成佛山段至广佛边界，应推进其东延至广州段线路纳入近期建设，促进轨道交通深度融合；东莞地

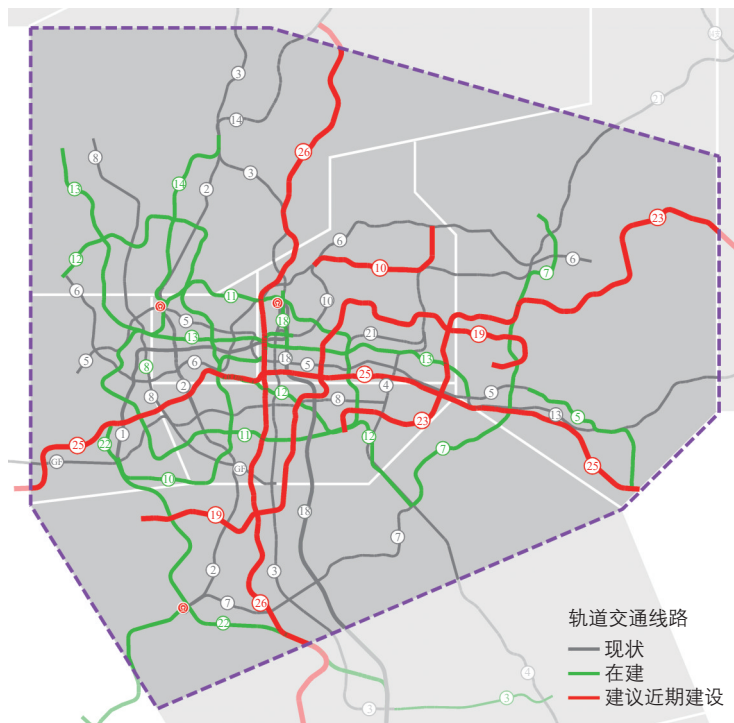


图16 广州市中心城区轨道交通近期建设建议

Fig.16 Recommendations on near-term construction of rail transit in the central urban areas of Guangzhou

资料来源：根据《广州市轨道交通线网规划(2018—2035年)》绘制。



图17 广佛、穗莞衔接轨道交通线路近期建设建议

Fig.17 Recommendations on near-term construction of Guangdong-Foshan and Guangdong- Dongguan connecting rail transit lines

资料来源：根据《广州市轨道交通线网规划(2018—2035)》《佛山市城市轨道交通线网规划修编》和《东莞市轨道交通网络规划(2035)》绘制。

铁1号线二期望洪至穗莞边界段应与广州规划的地铁25号线同步建成,构建穗莞中心间贯通线路(见图17)。

3.4 把握建设时序

城市轨道交通建设是一项长期、庞大的工程,在资金、人力、物力等客观条件有限的情况下,建设时序对于建设可操作性、运营效益乃至既有网络的整体运行影响巨大。广州既有地铁14号线一期开通对嘉禾望岗站带来的客流冲击和运营压力、14号线支线开通初期独立于网络之外、21号线先开通远郊段带来的绕行等问题,在后续建设中如何规避值得深入思考。郊区线路建设需要谨慎考虑,在重点地区通达的前提下,应优先开通发展成熟地区的路段,并通过不同线路分段建设、组合开通的形式使线路成网运营;在满足覆盖需求的同时,保证线路客流效益,使得前期投资尽快回收,也可避免接入型线路对车站的客流冲击。此外,考虑城市外围组团内部客流走廊量级不大,可在系统制式方面采用有轨电车、单轨等中运量轨道交通作为补充,打造多层次、多制式轨道交通系统。

4 结语

广州市现有城市轨道交通已基本满足当前阶段客流出行需求,占据公共交通主体地位,市民接受程度较高,处于从解决有无问题向追求品质化转变的关键阶段。但是,对标国内外城市轨道交通规划和建设成果,广州市轨道交通网络在车站覆盖、出行效率及与私人机动化出行的竞争力等方面仍然面临挑战。结合粤港澳大湾区一体化发展、培育和发展现代化都市圈、实现“老城市新活力”等要求,广州市轨道交通建设应重点从市域空间和都市圈发展支撑、轨道交通主体功能发挥、邻接城市轨道交通衔接等方面出发,推进建设都市圈轨道交通线路、中心城区加密线路以及广佛、穗莞衔接轨道交通线路,并合理把握建设时序,从而落实广州市交通发展战略要求,打造轨道上的广州都市圈。

注释:

Notes:

① 市域(郊)铁路提供城市公共交通服务,是城

市综合交通体系的重要组成部分,功能与市域快速轨道交通有重叠部分(服务中心城区与周边城镇、以通勤功能为主),因此也作为本文研究对象。

- ② 《广州市国土空间总体规划(2018—2035年)》草案,提出“中心城区-副中心-外围综合城区-新型城镇-乡村”城乡体系。中心城区包括荔湾、越秀、天河、海珠四区,白云区北二环高速公路以南地区、黄埔区九龙镇以南地区及番禺区广明高速以北地区,面积约1110 km²。五个外围综合城区包括国家知识中心城、广州空港城、东部山水城、番禺南部创新城和从化生态示范城(文章涉及《广州市国土空间总体规划(2021—2035年)》内容以最终批复为准)。

参考文献:

References:

- [1] 广州市交通规划研究院. 广州市轨道交通线网规划实施评估专题[R]. 广州: 广州市交通规划研究院, 2018.
- [2] 广州市交通规划研究院. 广州市交通发展年度报告(2000—2020年)[R]. 广州: 广州市交通规划研究院, 2020.
- [3] 苗彦英, 张子栋. 东京都市圈轨道交通发展及特征[J]. 都市轨道交通, 2015, 28(2): 126-130.
MIAO Y Y, ZHANG Z D. Development and characteristics of rail transit in Tokyo metropolitan circle[J]. Urban rapid rail transit, 2015, 28(2): 126-130.
- [4] 兰晓明, 祝建成. 浅谈北京市域(郊)铁路发展[J]. 城市轨道交通, 2021(2): 32-34.
- [5] 北京市人民政府. 首都功能核心区控制性详细规划(街区层面)(2018—2035年)[EB/OL]. (2020-08-30)[2021-09-10]. http://www.beijing.gov.cn/gongkai/guohua/wnggh/cqgh/202008/t20200828_1992592.html.
- [6] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2020年度统计和分析报告[R/OL]. 北京: 中国城市轨道交通协会, (2021-04-10)[2021-09-10]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/7647>.
- [7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于上海市城市轨道交通第三期建设规划(2018~2023年)的批复(发改基础(2018)1831号)[EB/OL]. (2018-12-11)[2021-09-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xgk/zcfb/pifu/201812/t20181219_1316143.html.

(下转第10页)