

南京地铁通勤服务的空间范围和人群特征分析

于泳波

(南京市城市与交通规划设计研究院股份有限公司, 江苏 南京 210018)

摘要: 基于手机信令数据分析南京地铁通勤服务的空间范围和人群特征。首先, 分析了采用地铁通勤的居民职住分布总体特征, 并对比了地铁与其他交通方式通勤距离的差异。其次, 基于通勤乘客职住地点与地铁站的距离分布, 对南京地铁车站进行聚类, 得到每一类车站的服务空间范围特征。最后, 提取职住分布特征、通勤距离特征、居住地房价特征, 构建多元回归模型, 分析地铁车站服务人群特征。结果表明: 地铁车站的布局综合考虑了职住分布, 更接近就业岗位密集区; 尽管居住地在空间分布上相对分散, 但少数几个车站通勤进站客流量远超过其他车站; 就业岗位分布相对集聚, 但大部分车站通勤出站客流量相对均衡; 中心城区内车站通勤服务范围相对较小, 外围区域车站通勤服务范围相对较大; 规划中的地铁线路与车站可覆盖部分现状接驳距离较长的区域; 职住不在同一地铁车站服务范围、通勤距离超过6 km、小区二手房价格较低的居民使用地铁通勤的意愿更强。**关键词:** 城市轨道交通; 通勤服务范围; 聚类分析; 多元回归模型; 手机信令数据; 通勤距离; 南京市

Spatial Scope and Population Characteristics of Nanjing Subway Commuting Services

YU Yongbo

(Nanjing Institute of City & Transport Planning Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210018, China)

Abstract: Based on the analysis of mobile signaling data, this paper examines the spatial scope and population characteristics of Nanjing subway commuting services. Firstly, the overall characteristics of the job-housing distribution of subway commuting passenger are analyzed and a commuting distance comparison between subway and other travel modes is conducted. Secondly, all subway stations are clustered based on the distance distribution between commuters' job-housing locations and subway stations, and the service space range characteristics of each type of station are obtained. Finally, the distribution characteristics of job-housing distribution, commuting distance, and housing price of residence are extracted to build a multiple linear regression model, analyzing the characteristics of subway service commuting population. The results indicate that the layout of subway stations comprehensively considers the job-housing distribution, and has a higher spatial matching for job positions. Although residential areas are relatively dispersed in terms of spatial distribution, there are a few subway stations with much more volume of commuting passengers than others. Job distribution is relatively concentrated, but most subway stations have relatively balanced passenger volumes. The commuting service range of subway stations in the central urban area is relatively small, while commuting service range of stations in the peripheral areas is relatively large; the planned subway lines and stations can cover some areas with longer connecting distances. Residents whose job and residence are not in the service range of the same subway station, have a commuting distance exceeding 6 km, and live in areas with relatively low second-hand housing prices have a stronger willingness to commuting by subway.

Keywords: urban rail transit; scope of commuting services; cluster analysis; multiple regression model; mobile signaling data; commuting distance; Nanjing

收稿日期: 2023-04-11

作者简介: 于泳波(1992—), 男, 江苏南通人, 硕士, 工程师, 研究方向为交通规划、交通大数据挖掘、数据治理等, 电子邮箱 magic1992yu@163.com。

0 引言

地铁通勤服务的空间范围是指使用地铁通勤的居民,其居住地和工作地位置构成的空间集合;地铁通勤服务人群特征则是指使用地铁通勤的人群特性。既有研究大多采用固定距离(如800 m,1 000 m等步行可达范围)作为地铁站服务范围^[1-4]。在车站密度较高的主城区,车站1 000 m覆盖范围可以涵盖绝大部分乘客。然而,在一些尚未有地铁经过的区域,居住地与地铁站的距离较远,使用地铁通勤的居民需要通过其他方式与地铁接驳。因此,仅用1 000 m半径作为覆盖范围会漏掉不少乘客。本文旨在通过手机信令数据^[5-6],揭示地铁站未覆盖但又有较多需求的区域,为城市轨道交通线网规划建设与公共汽车接驳服务提升提供支撑。

同时,分析地铁通勤服务人群特征,从宏观上掌握哪些人群更倾向于使用地铁作为通勤工具,从而采取改善措施提升地铁服务水平和吸引更多乘客。

1 数据说明

本文使用的数据包括两部分:第一部分是2022年2月15日至3月14日南京移动手机信令数据,覆盖南京市域。该时段内,南京开通的地铁线路为1,2,3,4,10,S1,S3,S6,S7,S8,S9共11条线,175个车站。其中1号线北侧终点为迈皋桥,北延线尚未开通;S8线南侧终点为泰山新村,南延线尚未开通。以基站位置近似代替手机实际位置尽管存在一定的空间误差,但当基站密

度较大时,可以满足城市居民职住和出行空间研究的精度要求。第二部分是从贝壳网爬取的南京各小区二手房挂牌数据,经过融合处理,将房价信息落到GIS文件中,以便后续分析。

基于手机信令数据分析用户职住与地铁出行已有广泛研究,基于文献[7]职住分析的方法,获得74.1万个有稳定通勤行为的居民通勤与职住分布信息。有稳定通勤行为定义为:研究时段内20个工作日内,不少于15个工作日有从居住地前往固定工作地的出行行为。由于地铁具有地下专用基站,地铁出行可被较为准确地识别。基于文献[5]地铁出行识别的方法,识别出以地铁作为主要通勤方式的居民人数为9.4万人,占12.69%。

在对手机信令数据预处理过程中,为了进一步提高出行起讫点识别精度,计算修正后的手机起讫点位置

$$Loc = \frac{\sum_{i=1}^I du_i \times loc_i}{\sum_{i=1}^I du_i},$$

式中: I 为基站数/个,当基站数超过3时,选取接收到信号持续时长最大的3个基站,即 $I \leq 3$; du_i 为手机接收到基站 i 信号的持续时长/s; loc_i 为手机在起讫点停留时接收到信号的基站 i 的位置。下文分析起讫点与地铁站的距离时,均以此修正后的手机起讫点位置为基准。

2 职住分布总体特征

以地铁为主要通勤方式的居民居住地和work地热力分布如图1所示。地铁通勤乘客

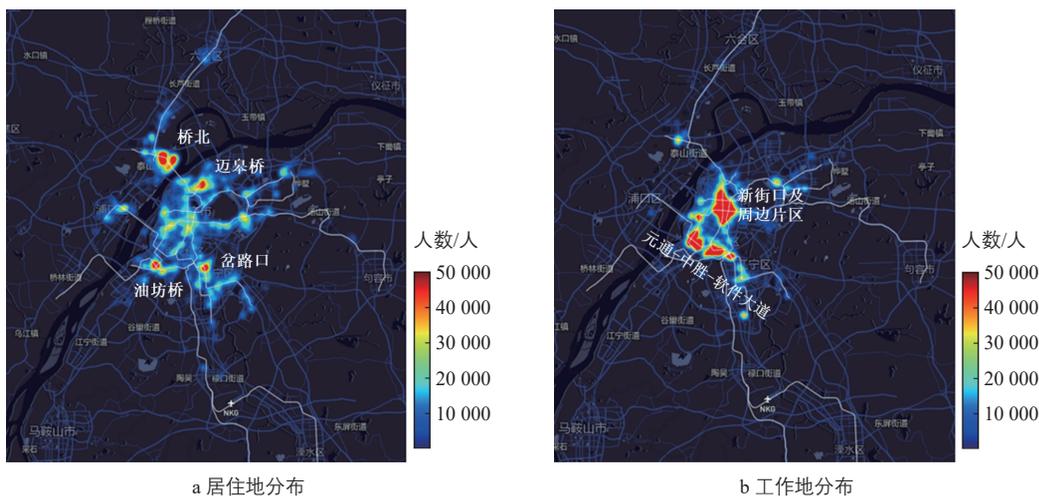


图1 南京地铁通勤居民职住分布

Fig.1 Distribution of job/housing locations of the residents commuting by Nanjing subway

的居住地集中在地铁沿线，分布相对分散，桥北、油坊桥、迈皋桥、岔路口等片区居住人口密度相对较高，主城区内部居住分布相对均匀。就业岗位分布相对集中，主要包括以新街口为中心、老城区中山路、中央路、中山东路沿线的面状分布就业中心，以及元通一中胜—软件大道的带状分布就业中心。

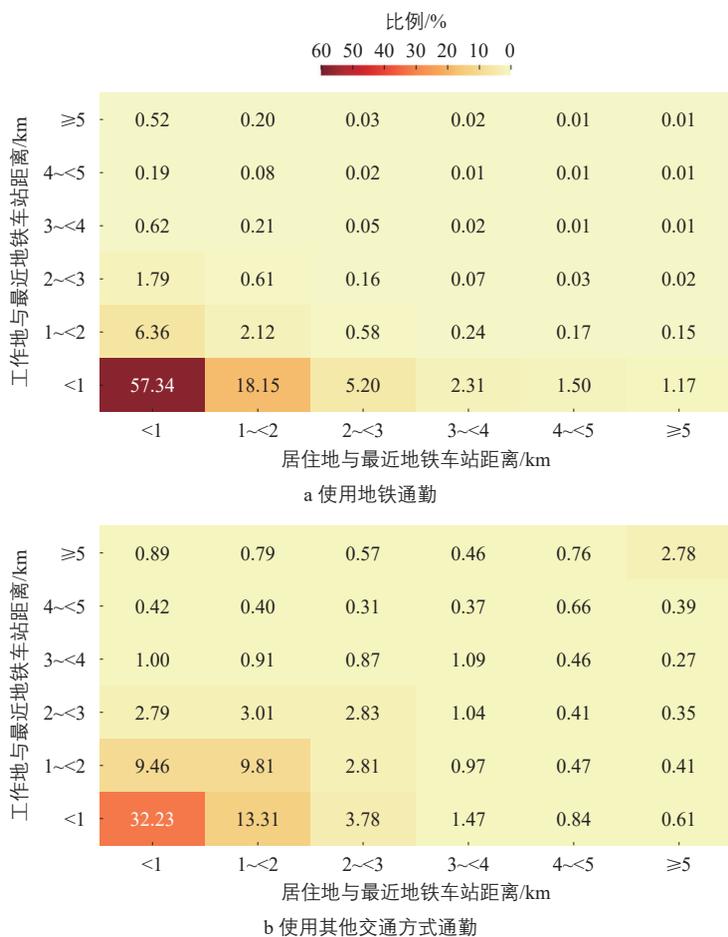


图2 居民职住点位与最近地铁站的距离分布
Fig.2 Distribution of the distance between residents' job/housing locations and the nearest subway station

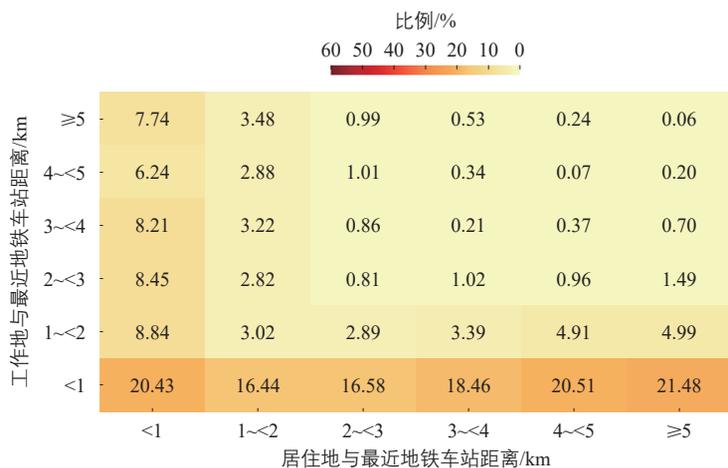


图3 不同职住点位与最近地铁站距离情况下使用地铁通勤的出行比例
Fig.3 Proportion of commuters using subway with different distance between job/housing locations and the nearest subway station

2.1 地铁车站覆盖范围内的职住特征

以各地铁站为圆心、不同距离为半径，得到各车站不同覆盖范围内职住分布比例。

使用地铁通勤的居民中，职住均位于地铁站1 km范围内的比例达到57.34%，至少一端在地铁站1 km范围内的比例达到95.15%，地铁站1 km范围覆盖就业岗位数高于居住人口数(见图2a)。使用其他方式通勤的居民中，职住与地铁站距离的分布相对均衡，职住均在地铁站1 km范围内的比例为32.23%(见图2b)。

图3为居住地与工作地不在同一地铁站覆盖范围的人群采用地铁通勤的出行比例。以12.69%为基准(样本数据中选择地铁通勤出行的居民比例)，当工作地在地铁站1 km覆盖范围内时，居民使用地铁作为通勤方式的比例均超过基准；而居住地在地铁站1 km覆盖范围但工作地不在时，使用地铁作为通勤方式的比例低于基准。

由车站覆盖范围内的职住特征分析可知：1)地铁站的布点综合考虑了职住密集区，更接近就业岗位密集区，这是因为城市轨道交通选线时对就业岗位的空间匹配更高。2)工作地或居住地与地铁站的距离对是否选择地铁通勤具有重要影响。对于大多数居民而言，职住至少一端接近地铁站是其选择地铁通勤的重要理由。3)居民对于居住地与地铁站距离的可接受度大于工作地与地铁站距离，一个可能的原因是居民更倾向于一出站就能快速到达工作地，而刚从家出发时，可以接受一段相对较长的前往地铁站的距离。

2.2 通勤距离特征

随着通勤距离增加，使用地铁通勤的居民占比呈现上升趋势。当通勤距离为3~6 km时，使用地铁通勤的居民约占9%；当通勤距离为6~9 km时，使用地铁通勤的居民约占22%；当通勤距离为9~12 km时，使用地铁通勤的居民约占33%；当通勤距离超过12 km时，使用地铁通勤的居民占比稳定在40%左右。由此可见，地铁在中长距离通勤中扮演着重要角色。

图4为地铁与其他交通方式通勤距离分布对比。随着通勤距离增加，采用其他方式通勤的居民人数占比降低，6 km以内占比最高，约为75%；采用地铁通勤的居民中，在3~<15 km范围内人数占比最多，约为71%。

3 地铁站空间服务范围聚类分析

由于职住均在地铁站1 km覆盖范围内的通勤人群仅占57.34%，依然存在着大量通勤乘客的职住分布在车站1 km覆盖范围之外，且不同区位车站服务的通勤乘客数以及职住与地铁站的距离均存在较大差异。为了探索车站实际服务的通勤乘客居住地、工作地与地铁站的距离特征，本文使用K-means算法对南京地铁全网车站进行聚类分析^[8]。

3.1 聚类方法

分别对通勤乘客居住地、工作地与地铁站的距离进行聚类。居住地与地铁站距离分布计算方法如下：

$$r_{h,d}^s = \frac{v_{h,d}^s}{\sum_{d \in D} v_{h,d}^s}$$

$$m_{h,d}^s = \frac{\sum_{s \in S} v_{h,d}^s}{N_s} \cdot \frac{1}{\max\{v_{h,d}^s, s \in S\} - \min\{v_{h,d}^s, s \in S\}}$$

式中： $v_{h,d}^s$ 为居住地与车站 s 之间距离范围 d 的人数/个； S 为全部车站构成的集合， $s \in S$ ； D 为距离范围的集合，包括 <500 m， $500 \sim <1\,000$ m， $1\,000 \sim <1\,500$ m， $1\,500 \sim <2\,000$ m以及 $\geq 2\,000$ m 5个元素， $d \in D$ ； $r_{h,d}^s$ 为范围 d 人数占全部范围 D 人数的比例/%； $m_{h,d}^s$ 为车站 s 覆盖范围 d 的居住人数在全部车站覆盖范围 d 的居住人数中的标准化值； N_s 为全部车站数量/个。

去向距离分布计算方法如下：

$$r_{w,d}^s = \frac{v_{w,d}^s}{\sum_{d \in D} v_{w,d}^s}$$

$$m_{w,d}^s = \frac{\sum_{s \in S} v_{w,d}^s}{N_s} \cdot \frac{1}{\max\{v_{w,d}^s, s \in S\} - \min\{v_{w,d}^s, s \in S\}}$$

式中： $v_{w,d}^s$ 为车站 s 与工作地 w 之间距离范围为 d 的人数/个； $r_{w,d}^s$ 为范围 d 人数占全部范围 D 人数的比例/%； $m_{w,d}^s$ 为车站 s 覆盖范围 d 的工作人数在全部车站覆盖范围 d 的工作人数中的标准化值。

采用轮廓系数来判断最佳聚类数。对于居住地与地铁站距离分布，聚类数为4时聚类效果最佳；对于地铁站与工作地的距离分布，聚类数为3时聚类效果最佳。

3.2 居住地与地铁站距离分布聚类结果

图5为基于通勤乘客居住地与地铁站距离分布的聚类结果，人群分布特征如图6所示。

第一类车站有5个，分别为天润城、柳洲东路、油坊桥、迈皋桥、双龙大道。这类车站的特征是平均进站客流量远高于其他类型的车站。居住地与地铁站距离主要分布在1 000 m范围内，占66.7%，500~<1 000 m区段占比略高于<500 m区段。该类车站是

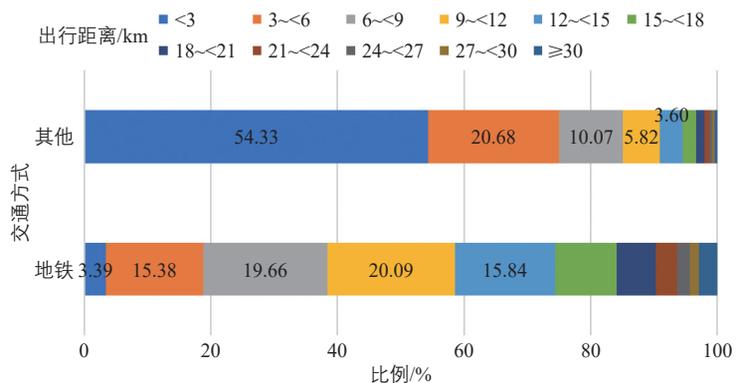


图4 地铁与其他交通方式通勤距离分布对比

Fig.4 Comparison on commuting distance distribution between subway and other travel modes

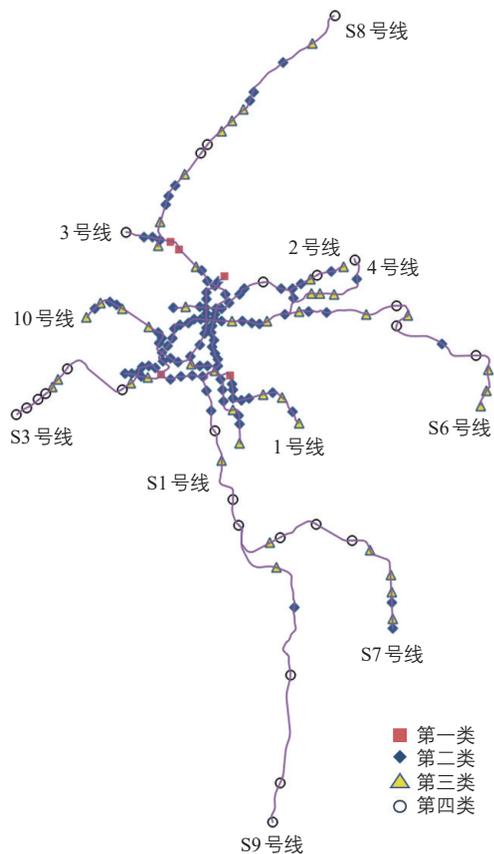


图5 居住地与地铁站距离分布的聚类结果

Fig.5 Clustering results of the distribution of distance between residential areas and subway stations

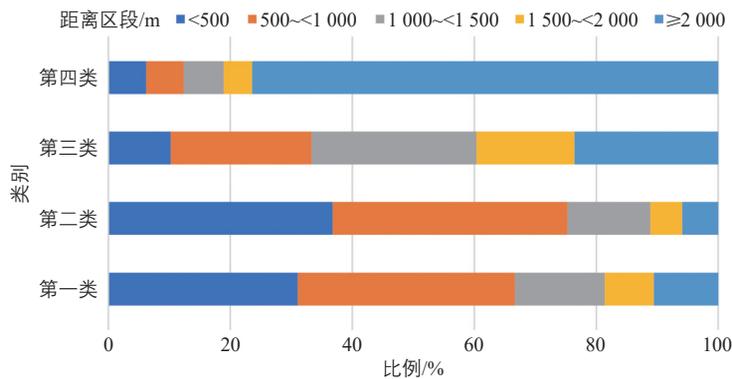


图6 不同类别地铁车站与居住地的距离分布

Fig.6 Distribution of distances between different types of subway stations and residential areas

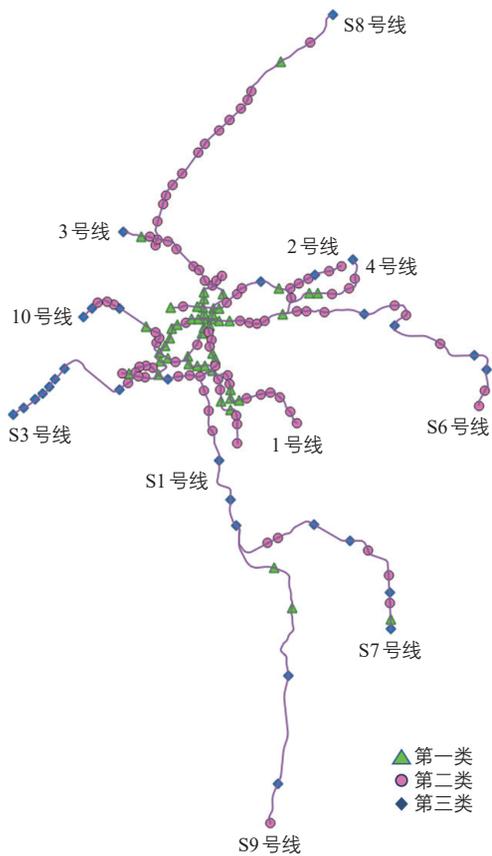


图7 通勤乘客工作地与地铁车站距离分布聚类结果
Fig.7 Clustering results of the distance distribution between working areas and subway stations

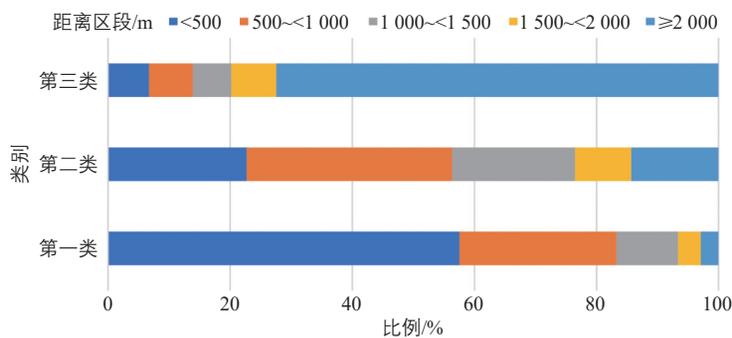


图8 不同类别地铁车站与工作地的距离分布

Fig.8 Distribution of distances between different types of subway stations and working areas

典型的居住型车站，车站周边居住密度较高、各类生活服务配套设施已经成熟，属于开发相对完善的区域；房价稳定，大部分工薪人群可能会选择居住在这些片区，生活和出行都很便利。车站周边提供的就业岗位较少，居民有中远距离通勤需求，因此在通勤时段这类车站的上客量极大。

第二类车站有100个，大部分分布在主城区(古都文化核、河西片区、城南片区、铁北片区)范围内。与第一类车站相比，这类车站平均进站客流量相对较低，但通勤客流居住地与地铁车站的距离分布规律与第一类车站一致，1 000 m以内客流占75.3%，500~<1 000 m区段占比略高于<500 m区段。这些车站平均站间距较小，因此居住地与地铁车站距离也较短。尽管主城区范围内居住密度较高，但由于居住在该范围的人群往往工作地也在主城区范围，通勤距离不长，对地铁的需求相对不高，所以平均进站客流量低于第一类车站。

第三类车站有44个，主要分布在一些线路的尽端，以及零散分布在主城区部分区域。这类车站与通勤乘客居住地距离主要分布在≥500 m区段，占89.8%，其中，1 000~<1 500 m区段约占27.1%。平均进站客流量低于第二类。

第四类车站有26个，主要分布在地铁S1，S3，S9号线等外围线路，这些车站与居住地距离主要分布在>2 000 m区段，约占76.3%，平均进站客流量低于第三类。与较长的前往地铁车站的距离相比，这些通勤乘客更在意基础房价对生活的影响。

3.3 地铁车站与工作地距离分布聚类结果

图7为基于通勤乘客工作地与地铁车站距离分布的聚类结果，人群分布特征如图8所示。

第一类车站有50个，主要分布在主城区内部，包括新街口一鼓楼周边、元通一中胜周边、软件大道沿线等主要产业中心。这类车站通勤出站客流量远高于其他车站，且57.5%的通勤客流工作地与地铁车站的距离分布在车站周边500 m范围内。

第二类车站有95个，大部分分布在中心城区(主城区、江北副城、东山副城、仙林副城)范围内。与前一类车站相比，这类车站的通勤出站客流量较少，有56.4%的通勤乘客工作地与地铁车站的距离分布在1 000 m范围内，且500~<1 000 m区段的比例高于

<500 m 区段。

第三类车站有 30 个，主要分布在外围线路以及末端站。这类车站的通勤出站客流量最少，且通勤乘客工作地与地铁车站的距离主要分布在 2 000 m 以上区段，占 72.5%。这些车站周边就业岗位密度低，通勤乘客出站后往往需要通过其他接驳方式才能到达工作地。

4 地铁车站服务人群特征回归分析

为了探究地铁对居民通勤的吸引特征，本文构建了多元线性回归模型。

4.1 地铁车站服务范围

由于各个车站服务通勤乘客的实际范围存在较大差异，为了科学对比居民选择地铁作为通勤方式的影响因素，按照乘客居住地与相关车站距离的远近，由近及远取 80% 乘客居住地点位构建凸多边形，作为该车站服务的居住范围。同样，取 80% 乘客工作地点位构建凸多边形，作为该车站服务的就业岗位范围。使用凸多边形能有效包裹 80% 核心点位形成连续合理范围，排除边缘离群点干扰，同时保持空间连贯性，确保不同车站异质化服务范围的几何形态可比性。

存在部分车站通勤乘客数较少的情况。

为了降低小样本对分析结果的影响，将上下车小于 100 个乘客的车站剔除。最终得到 127 个服务居住地的车站以及 106 个服务就业岗位的车站(见图 9)，构成多元线性回归模型涉及的数据空间范围。

4.2 变量选择

本文以车站服务范围内居住人口使用地铁通勤人群占有通勤需求人群的比例作为因变量(y)。自变量包括 3 个，分别是该车站服务范围内居住人口的职住不在同一车站空间服务范围的人群占有通勤需求的人群比例(x_1)、车站服务居住人口通勤距离中位数(x_2)、车站服务通勤乘客居住地小区房价中位数(x_3)。

4.3 结果分析

经多元线性回归分析，所构建的统计模型具有良好的解释力(调整后 $R^2 = 0.708$, $p < 0.01$)，各变量均呈现显著的统计学意义。模型如下：

$$y = 0.133x_1 + 0.233x_2 - 0.065x_3 + 0.074$$

y 与 x_1 呈正相关关系，这与图 3 反映的现象一致，即职住均在地铁空间服务范围的通勤者选择地铁通勤的概率更大； y 与 x_2 呈正相关关系，即地铁主要服务于长距离通勤，通勤距离越大，使用地铁的可能性越

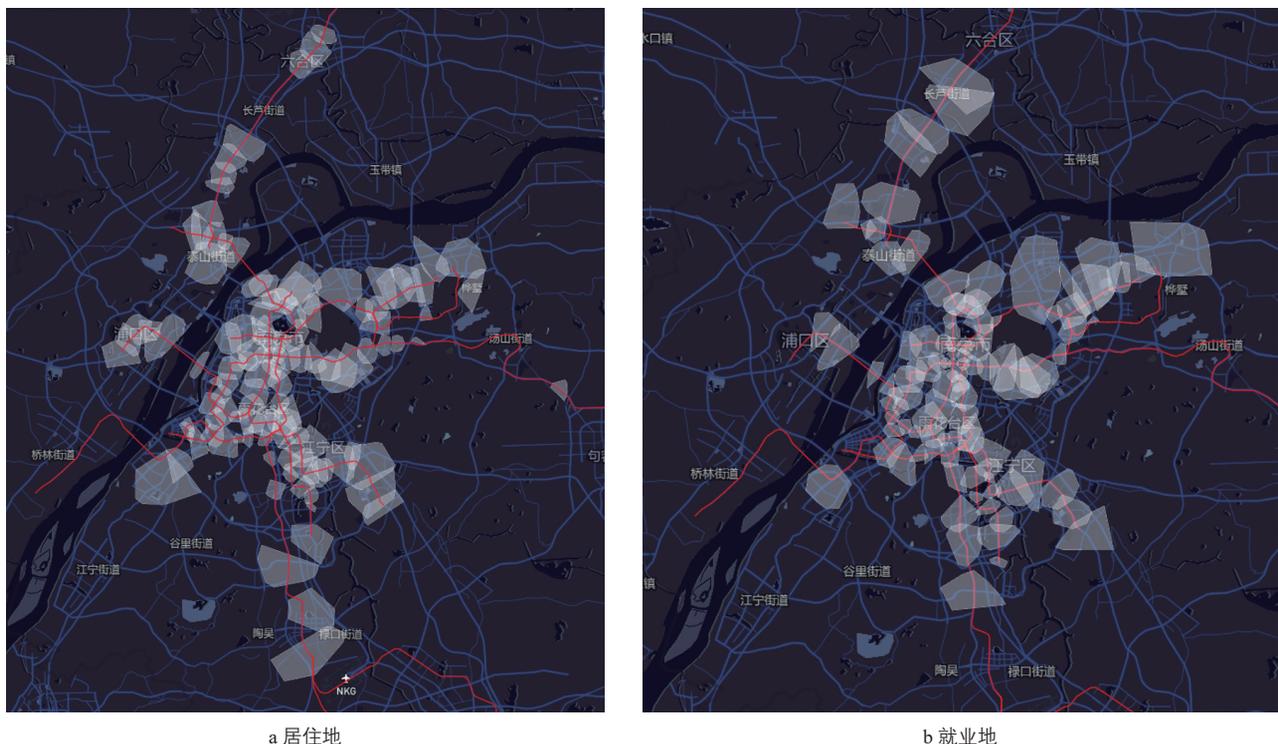


图9 地铁车站空间服务范围

Fig.9 Spatial service scope of subway stations

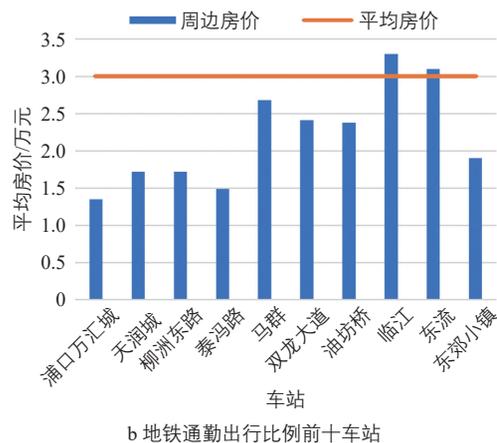
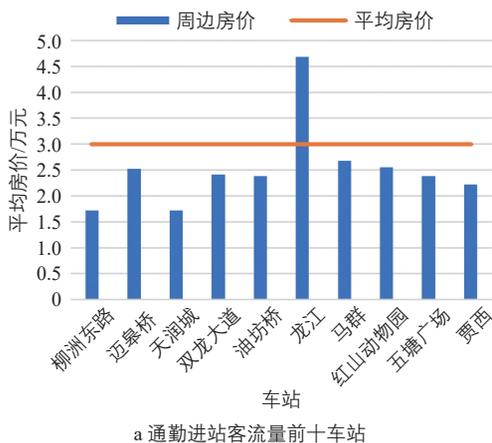


图10 地铁车站通勤服务范围内小区房价

Fig.10 Housing prices of residential areas within commuting service scope of subway stations

高； y 与 x_3 呈负相关关系，可能的原因是：地铁出行与小汽车出行相比具有价格优势，对于看重出行成本的通勤者而言，可能更愿意选择地铁作为长距离通勤方式。

为了进一步说明房价特征的影响，图10分别显示了地铁通勤进站客流量和地铁通勤出行比例前10位车站服务范围内小区二手房挂牌价格中位数。小区房价中位数平均值为3.0万元。地铁通勤进站客流量前10位车站中，除了龙江站周边房价达到4.7万元之外，其余车站周边房价均低于3.0万元。地铁通勤出行比例前10位车站中，仅有临江站和东流站周边房价略高于3.0万元，分别为3.3万元和3.1万元，其余车站周边房价均低于3.0万元。一方面，交通便利且相对较低的房价是刚需人群的首选，尽管职住距离远，但只要与地铁车站距离近，通勤就相对便利；另一方面，地铁车站主要覆盖的居住区房价相对较为亲民，地铁作为一种经济实惠且便捷的通勤方式为众多普通上班族提供了极大的便利。

5 结束语

本文基于手机信令数据，分析了南京地铁通勤服务的空间范围和人群特征，得出以下结论：

1) 地铁车站的布点综合考虑了职住分布，更接近就业岗位密集区；居民对于居住地与地铁车站距离的可接受度大于工作地与地铁车站距离。

2) 尽管空间上居住地分布相对均衡，但存在少数几个车站通勤进站客流量远超过其他车站的情况；反之，尽管就业岗位相对集聚，但由于就业岗位密度高的区域地铁车

站密度也较高，因此平摊到多个车站，单个车站的通勤出站客流量峰值并没有达到进站客流量峰值。

3) 中心城区内车站通勤服务范围相对较小，1 km 范围可以覆盖大部分乘客；外围区域车站通勤服务范围相对较大，部分与现有地铁车站距离较远的区域已经规划了地铁线路，新线路开通后将会缩小接驳距离。

4) 职住不在同一地铁车站服务范围、通勤距离超过6 km、小区二手房价格较低的居民使用地铁通勤的意愿更强。

本文研究结果可为居住、办公、商业、市政服务设施等合理布局提供依据，充分发挥地铁对相应人群的吸引效应；同时，可支撑城市轨道交通线网规划调整、短距离公共交通接驳线路优化等。

参考文献：

References:

[1] 王楠, 杨少辉, 付凌峰, 等. 中国主要城市轨道交通覆盖通勤空间特征研究[J]. 城市轨道交通, 2021, 19(5): 91-99.
 WANG N, YANG S H, Fu L F, et al. Spatial characteristics of commuting travel covered by rail transit in major cities in China[J]. Urban transport of China, 2021, 19(5): 91-99.

[2] 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 P, PENG J D, YANG H, 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.

(下转第71页)