

引用格式:朱敏清,高洁,崔洪军,等.基于GTWR的站域建成环境对城市轨道交通客流量的时空影响[J].北京工业大学学报,2024,50(6):724-732.

ZHU M Q, GAO J, CUI H J, et al. Spatio-temporal impact of station-area built environment on urban rail transit passenger flow based on GTWR[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(6): 724-732. (in Chinese)

基于GTWR的站域建成环境对城市轨道交通 客流量的时空影响

朱敏清¹, 高洁², 崔洪军², 马新卫²

(1. 河北工业大学建筑与艺术设计学院, 天津 300130; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 轨道交通客流量影响因素是轨道交通方面研究的一个关注点,不同站点客流量的时空非平稳性被认为与站域建成环境有关。通过构建时空地理加权(geographically and temporally weighted regression, GTWR)模型,揭示了土地多样性、密度、站点属性3个方面因素在时间和空间维度上对天津市轨道交通客流量的影响。结果表明:相较于传统的地理加权(geographically weighted regression, GWR)模型和最小二乘法(ordinary least squares, OLS)模型,GTWR具有更好的拟合优度;公交站点密度对轨道交通客流产生促进作用,尤其在工作日的早晚高峰时段和中心城区位置;市中心的商业设施在工作日晚高峰吸引更多的地铁乘客,而在近郊区它们在早高峰吸引更多的地铁乘客;人口密度促进轨道交通的客流量;充足的停车场设施数量可以吸引更多的轨道交通乘客。

关键词: 时空地理加权模型(GTWR); 建成环境; 轨道交通自动售检票系统(AFC)数据; 时空异质性; 天津市; 城市轨道交通

中图分类号: U-9

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2024)06-0724-09

doi: 10.11936/bjtxb2022090010

Spatio-Temporal Impact of Station-area Built Environment on Urban Rail Transit Passenger Flow Based on GTWR

ZHU Mingqing¹, GAO Jie², CUI Hongjun², MA Xinwei²

(1. School of Architecture & Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The influencing factors of rail transit passenger flow are a focus of rail transit research. The spatio-temporal nonstationarity of passenger flow at different stations was considered to be related to the built environment of station area. A spatio-temporal geographically and temporally weighted regression (GTWR) model was constructed to reveal the impacts of land diversity, density and site attributes on Tianjin rail transit passenger flow in time and space dimensions. Results show that compared with the traditional geographically weighted regression (GWR) model and ordinary least squares (OLS) model, the GTWR model has better goodness of fit. The density of bus stations promotes the passenger flow of rail transit, especially in the morning and evening rush hour of working day and the location of central city. Business facilities in the city centre attract more subway passengers at workday evening peaks, while in

收稿日期: 2022-09-14; 修回日期: 2023-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52172304); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2022123)

作者简介: 朱敏清(1974—), 女, 高级工程师, 主要从事交通运输规划管理与控制方面的研究, E-mail: 851206026@qq.com

通信作者: 崔洪军(1974—), 男, 教授, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究, E-mail: cuihj1974@126.com

the suburbs they attract more subway passengers at morning peaks. Population density promotes passenger flow in rail transit. Adequate parking facilities can attract more rail passengers.

Key words: geographically and temporally weighted regression (GTWR) model; built environment; automatic fare collection (AFC) card data; spatio-temporal heterogeneity; Tianjin city; urban rail transit

改革开放以来,随着人口基数不断增长和空间膨胀,城市化的进程快速发展,公共交通发展理念也在广泛发展。轨道交通以安全、方便、快捷、环保等优点,成为城市发展中不可或缺的一环,在居民出行、缓解交通拥堵方面发挥了骨干作用。近年来,大数据的迅速发展方便了人们的生活,手机信令、共享交通数据、城市公共交通刷卡数据等海量数据源为学者分析城市轨道交通出行行为提供更全面、高效的数据基础和分析方法^[1]。基于城市轨道交通相关数据,国内外研究发现轨道交通在时间和空间上客流分布不均匀。Qian^[2]通过比较分析法发现沈阳地铁线网工作日客流和双休日客流有明显差异。另外,Chai等^[3]研究也表明在空间上,城市轨道交通沿线不同地段客流呈现不平衡的状态,客流量有明显差异。

不同公共交通站点和站点的客流量异质性被认为可能与建成环境有关^[4-6],因此研究客流时空特征异质性和建成环境作用机理具有重要意义。根据现有的轨道交通客流影响因素分析与建模方面的文章,常用模型有结构方程模型、最小二乘法(ordinary least squares, OLS)、多项 Logistic 模型等传统模型,如李国强^[7]采用结构方程模型(structural equation model, SEM)证明人口密度、换乘次数、商业建筑面积等7个因素与车站上车率有显著影响;文献[8-10]采用普通 OLS 解释公共交通客流与影响变量之间的关系;Jun等^[11]使用多项 Logistic 模型证明土地利用因素影响韩国首尔的地铁乘客量。但传统模型不能根据截面数据建立关系,不能衡量不同站点位置参数的空间非平稳性,因此部分学者考虑引入地理因素。马晓磊等^[12]基于地理加权回归模型定量分析空间上客流和用地之间相关系数的分布情况;甘佐贤^[13]采用混合地理加权模型表明人口密度、商业办公用地面积和公交线路数量等影响程度具有空间平稳性;Cardozo等^[14]通过地理加权回归模型证明车站特征和车站服务区域内的影响因素与车站上车乘客数相关。以上模型虽然刻画了研究对象的空间差异,但轨道交通自身数据具有潮汐性,无法揭示站点客流量的时间非平稳性。

综上所述,以往研究很少从时间和空间2个维度解释影响因素对城市轨道交通客流量的影响,因此以天津市轨道交通各站点工作日和周末每小时平

均客流量作为研究对象,采集站点客流吸引范围内的影响因素,构建时空地理加权(geographically and temporally weighted regression, GTWR)模型,进而探讨站域建成环境对城市轨道交通客流时空分布的影响。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

本文选取天津市轨道交通为研究对象,研究范围共有6条轨道交通线路运营,包括1号线、2号线、3号线、5号线、6号线、9号线,共有轨道交通车站站点143座,如图1所示。天津市城市轨道交通涵盖了除武清区、宝坻区、宁河区、蓟州区和静海区外11个市辖区,包括中心城区(和平区、南开区、河西区、河北区、河东区、红桥区)82个站点,市近郊区(北辰区、东丽区、西青区、津南区、滨海新区)61个站点。

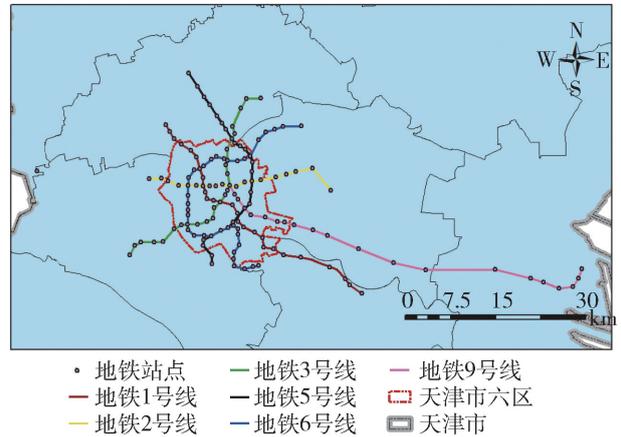


图1 天津市地铁分布

Fig. 1 Subway distribution map of Tianjin

1.2 数据来源及数据处理

本文所需多源数据包括天津市轨道交通自动售检票系统(automatic fare collection, AFC)数据、人口密度数据、兴趣点(point of interest, POI)数据、路网数据、公交站点数据。其中,天津市轨道交通 AFC 数据为2021年11月1日—7日连续一周的刷卡数据,清洗后约有605.1万条,数据有效率为99.50%,数据内容包括:交通卡号ID、进出站时间、进出站名称。人口密度数据来源于中科院环境科学数据库,人口密度栅格精度为30 m × 30 m。

POI 数据是通过高德地图 API 爬取,共得到天津市 192 159 条 POI 数据,数据结构包括名称、地址、类型、坐标、所属区县。路网密度来源于 OSM (OpenStreetMap) 数据。公交站点数据利用 Python 通过高德地图 API 接口爬取获得。

本文选取工作日和非工作日分小时分站点客流乘降量指标作为因变量,因此采用 Python 和 Spark 对 AFC 数据进行处理,将每日数据以每个站点和每小时为单位获取客流量,获得 143 个站点

工作日和非工作日全时段(1 h 间隔)的平均进出站量。通常,人们从轨道交通站点出发步行 10 min 以内的可达区域作为轨道交通客流吸引范围。因此,本文以 800 m 作为客流吸引范围的半径,在客流吸引范围内选择建成环境影响因素,自变量分为土地利用多样性、密度、站点属性共 3 类,其中包括人口密度、路网密度、公交站点密度、是否毗邻大型交通枢纽、风景名胜型 POI 密度等 13 个解释变量,如表 1 所示。

表 1 变量定义和描述性统计

Table 1 Definition and descriptive statistics of dependent and explanatory variables

变量类别	变量	定义	均值	方差	最小值	最大值
密度	人口密度/(人·km ⁻²)	站点客流吸引范围内人口数量与客流吸引范围面积比值	103.576	128.239	0.379	599.946
站点属性	路网密度/(km·km ⁻²)	站点客流吸引范围内车行道总长度与客流吸引范围面积比值	9.651	3.387	0.618	16.818
	公交站点密度/(个·km ⁻²)	站点客流吸引范围内公交站点个数与客流吸引范围面积比值	5.297	4.096	0	18.899
	轨交换乘数/个	该站点经过轨道交通线路数量	1.132	0.359	1	3
	到城市 CBD 距离/km	该站点距离市中心 CBD 距离	12.045	11.311	0.299	59.098
	是否毗邻大型交通枢纽	设为哑元变量,1 表示站点毗邻大型交通枢纽,0 表示站点不接近大型交通枢纽	0.146	0.354	0	1
土地利用	风景名胜型 POI 密度/(个·km ⁻²)	站点客流吸引范围内风景名胜数量与客流吸引范围面积比值	3.345	8.539	0	65.651
	商业型 POI 密度/(个·km ⁻²)	站点客流吸引范围内商业型数量与客流吸引范围面积比值	57.311	73.272	0	439.665
	购物型 POI 密度/(个·km ⁻²)	站点客流吸引范围内购物型数量与客流吸引范围面积比值	203.228	283.419	0	2 079.459
	停车场设施密度/(个·km ⁻²)	站点客流吸引范围内停车场数量与客流吸引范围面积比值	57.137	65.349	0	271.558
	医疗型 POI 密度/(个·km ⁻²)	站点客流吸引范围内医疗型数量与客流吸引范围面积比值	21.132	21.034	0	115.884
	政府型 POI 密度/(个·km ⁻²)	站点客流吸引范围内政府型数量与客流吸引范围面积比值	28.206	31.688	0	196.456
	居住型 POI 密度/(个·km ⁻²)	站点客流吸引范围内居住型数量与客流吸引范围面积比值	20.798	41.125	0	250.171

2 研究方法

2.1 多重共线性检验

多重共线性检验是模型分析之前进行多因素相关性检验,避免自变量之间高度共线,影响分析结果。多重共线性检验通常采用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)作为检测方法,其计算式为

$$VIF = (1 - r^2)^{-1} \quad (1)$$

式中 r 为回归的决定系数。通常, VIF 取值大于 1, 越接近于 1, 多重共线性程度越轻, 反之越重, 大于 10 可以认定为存在严重多重共线性。本文影响因子均在 1 ~ 10 之间, 可以进行进一步模型分析。

2.2 空间自相关性

空间自相关性检验是用来判断变量是否在研究区域内存在空间相关性, 其系数定量描述变量在空间上的依赖关系。通常采用全局 Moran's I (全局莫兰指数) 来进行判别, 其计算式为

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: w_{ij} 为空间权重; x_i, x_j 分别为在 i 和 j 的数据观察值; \bar{x} 为数据均值。通常, I 取值在 $-1 \sim 1$, 越靠近 1 表示变量空间自相关性越强, 越靠近 -1 表示变量差异性越强, 0 表示变量在空间随机分布。本文除站点属性外, 其他自变量均具有一定的空间自相关性。

2.3 模型建立

1) 城市轨道交通车站站间时空距离

设车站站点 i 的地理坐标为 (u_i, v_i) , 轨道交通进出站所在时间段为 t_i 。站点 i 与站点 j 之间的时空距离为

$$d_{ij} = \sqrt{\lambda [(u_i - u_j)^2 - (v_i - v_j)^2] + \mu (t_i - t_j)^2} \quad (3)$$

式中: u_i, u_j 为纬度坐标; v_i, v_j 为经度坐标; λ 和 μ 为平衡时空差异参数。

2) 城市轨道交通车站站间时空相关性矩阵

城市轨道交通站点之间距离不等, 中心城区站点分布较为密集, 郊区站点距离较大, 数据点在空间上分布呈现不均匀, 因此用 bi-square 核函数来构建时空距离矩阵, 站点 i 与 j 之间的时空距离矩阵为

$$w_{ij} = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{d_{ij}}{h} \right)^2 \right]^2, & d_{ij} \leq h \\ 0, & d_i < h \end{cases} \quad (4)$$

$$CV = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_{(\neq i)}(h)]^2 \quad (5)$$

式中: h 为时空带宽; y_i 为站点 i 的观测值; $\hat{y}_{(\neq i)}(h)$ 为站点 i 在带宽为 h 下的拟合值, 最优带宽由 CV (交叉验证法) 选取。

3) 建立模型

基于 GTWR 模型建立影响因素分析模型

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中: 样本点 i 表示站点 i 的某一时间段; Y_i 表示站点 i 此时段的进出站客流量; X_{ik} 为第 i 个样本点的第 k 个变量; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 k 个解释变量在第 i 个样本点的回归系数; β_0 为时空截距; ε_i 为残差。

4) 参数估计

采用加权最小二乘法

$$f(\beta_{i0}, \beta_{i1}, \dots, \beta_{ip}) =$$

$$\min \sum_{i=1}^n w_{ij} \left(y_j - \beta_{i0} - \sum_{k=1}^p \beta_{ik} x_{ik} \right)^2 \quad (7)$$

$$\hat{\beta}_i = (\hat{\beta}_{i0} \hat{\beta}_{i1} \dots \hat{\beta}_{ip})^T = (X'W_iX)^{-1} X'W_iy \quad (8)$$

$$\hat{y}_i = X_i \hat{\beta}_i = X_i (XW_iX)^{-1} XW_iy \quad (9)$$

5) 模型对比

本文同时也基于地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型和 OLS 分别建立了城市轨道交通客流量影响因素分析模型, 对比获得拟合效果最好的模型。本文选择 AICc 指标、判定系数 R^2 以及残差平方和 (residual sum of squares, RSS) 作为模型诊断指标。

3 结果及分析

3.1 模型结果对比

在进行多重共线性检验和空间自相关性之后, 构建模型并将数据代入模型中进行结果分析, 本文使用 ArcMap 软件中 GTWR 插件进行分析。为了对比分析模型的准确性和有效性, 将 OLS、GWR、GTWR 模型进行相关诊断指标的分析。 R^2 、AICc、RSS 是 3 个诊断指标, R^2 取值通常为 $0 \sim 1$, R^2 值越大, AICc 值和 RSS 值越小, 模型的回归拟合效果越好。3 种模型比较结果如表 2 所示, 在工作日的进站和出站判别指标中, GTWR 模型的 R^2 比 GWR 模型分别提高了 0.182 和 0.186, 比 OLS 模型的 R^2 分别提高 0.298 和 0.289, GTWR 模型的 R^2 最大, 分别为 0.832 和 0.813; 在周末的进站和出站判别指标中, GTWR 模型的 R^2 比 GWR 模型分别提高了 0.226 和 0.238, 比 OLS 模型的 R^2 分别提高 0.330 和 0.351, GTWR 模型的 R^2 最大, 分别为 0.864 和 0.865。同时, GTWR 模型的 AICc 值和 RSS 值均比 OLS 和 GWR 模型小。通过以上判别指标对比, GTWR 模型能够更好地、准确地解释因变量对轨道交通客流数据在时间和空间上的影响。

以工作日和周末分小时分站点进出站客流量为因变量, 将因变量和自变量代入 GTWR 中, 分别得到工作日和周末进出站拟合系数, 如表 3、4 所示, 表中统计量分别为最小值、下四分位数、上四分位数、最大值和平均值。拟合系数可以解释自变量对轨道交通客流的影响程度, 拟合系数为正, 表示对客流有促进作用, 且绝对值越大, 作用越强, 拟合系数为负, 表示对客流有抑制作用, 且绝对值越大, 抑制作用越强。

3.2 拟合系数结果的时空分析

GTWR 模型的系数是局部估计, 并且在时间和空间尺度上不同存在差异性, 因此可以基于 GTWR 模型进行可视化, 深入观察站域环境因素对轨道交通客流量影响的时空和时间异质性。结合以往文献研究和模型估计结果, 从 3 类自变量中, 选择公交站

表2 OLS、GWR和GTWR这3种模型的结果对比
Table 2 Comparison of OLS, GWR and GTWR models

判别指标	工作日进站			工作日出站		
	OLS	GWR	GTWR	OLS	GWR	GTWR
R^2	0.534	0.638	0.832	0.524	0.627	0.813
AICc	41 253.44	41 166.53	36 548.22	38 817.09	38 779.73	38 313.63
RSS	251 343 808	244 635 246	211 580 613	252 229 442	251 177 028	231 783 636
判别指标	周末进站			周末出站		
	OLS	GWR	GTWR	OLS	GWR	GTWR
R^2	0.554	0.670	0.864	0.558	0.675	0.865
AICc	37 680.88	37 341.03	35 749.12	36 736.32	36 665.21	35 805.72
RSS	145 230 101	144 493 357	88 618 540	117 273 203	115 341 842	84 062 581

表3 工作日进出站拟合系数
Table 3 Fitting coefficients of inbound and outbound during working days

变量	工作日进站					工作日出站				
	最小值	下四分位数	上四分位数	最大值	平均值	最小值	下四分位数	上四分位数	最大值	平均值
人口密度	-244.789	-53.039	48.100	523.234	5.853	-340.160	-17.043	51.440	358.125	19.431
路网密度	-269.334	103.247	229.561	664.112	177.091	-247.569	-23.169	25.538	326.898	12.058
公交站点密度	-113.174	162.501	464.407	1 491.300	341.761	-440.424	-17.025	119.482	1 376.890	96.077
轨交换乘数	20.062	331.094	458.123	914.080	392.281	-691.000	-35.083	67.371	261.570	-2.380
到城市CBD距离	-547.008	202.753	806.497	2 278.860	545.879	-1 497.490	-96.019	51.643	1 552.340	16.652
是否毗邻大型交通枢纽	-451.368	-20.305	63.136	225.024	3.512	-177.872	-31.792	13.919	187.692	-10.806
风景名胜型POI密度	-1 876.840	-211.604	217.452	683.511	-134.360	-989.070	-208.732	-20.117	296.836	-128.129
商业型POI密度	-593.224	56.918	636.870	3 130.600	477.457	-271.524	-22.666	282.696	2 488.790	206.957
购物型POI密度	-1 168.910	-84.536	125.596	440.858	-25.453	-603.105	-103.921	0.074	961.012	-35.284
停车场密度	-748.760	-59.098	158.128	2 133.280	119.986	-1 686.060	-226.351	20.240	888.024	-156.960
医疗型POI密度	-1 404.450	-353.841	319.387	1 474.260	25.566	-1 289.490	-180.192	40.688	214.411	-106.693
政府型POI密度	-396.223	197.353	951.716	2 762.810	634.631	-2 604.990	-59.363	92.407	1 034.480	-36.378
居住型POI密度	-312.794	32.499	163.717	1 130.400	125.178	-630.198	-59.132	121.006	727.082	36.747

点密度^[15]、商业型POI密度^[16]、停车场密度^[17]、人口密度^[18]4个解释变量,从时间和空间分布上对拟合系数进行可视化分析。

3.2.1 拟合系数的时间分布

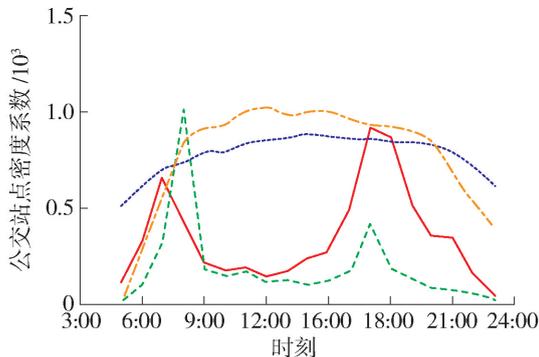
4个解释变量拟合系数平均值随时间变化的曲线如图2所示,4条不同类型线分别代表各解释变量工作日进站、工作日出站、周末进站、周末出站对轨道交通客流量的影响变化情况。由图2(a)可知,公交站点密度对轨道交通客流的影响呈现促进作用。在工作日呈现“双峰”曲线,早高峰时段(7:00—8:00)对工作日出站客流影响较大,拟合系数值最高可达1 016.05,晚高峰时段对工作日进站

客流影响较大,拟合系数值最高可达9 170.20,这可能与人们职住分离情况下工作日通勤特征相符,早高峰就近选择地铁换乘公交到达工作地点,晚高峰换乘地铁归家;相较于工作日,对周末进出站客流影响没有明显高峰期,拟合系数保持在28.72~885.60,整体呈现促进作用。由图2(b)可知,商业型POI密度对轨道交通客流呈现促进作用。在工作日呈现单峰曲线,出站拟合系数在早高峰达到最大值,为1 866.38,因为商业型场所也是通勤者的目的地,进站拟合系数在晚高峰达到最大值,为2 423.27,晚高峰过后系数仍然较高,此时存在部分通勤客流和非通勤客流存在娱乐性活动,结束后乘

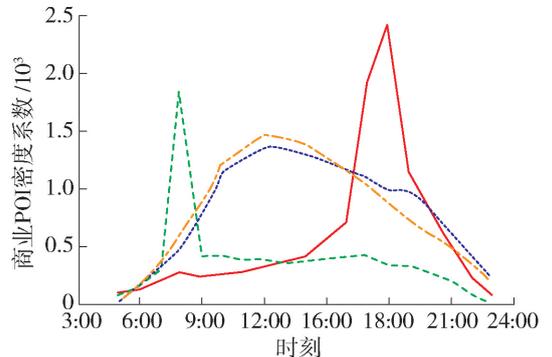
表 4 周末进出站拟合系数

Table 4 Fitting coefficients of weekend inbound and outbound stations

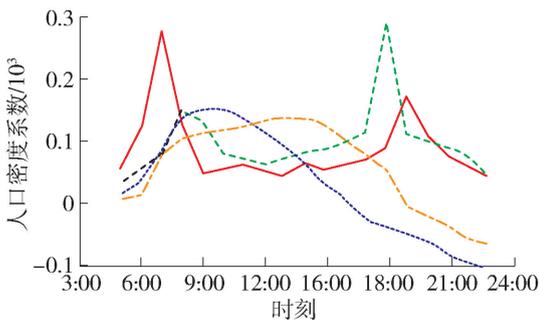
变量	周末进站					周末出站				
	最小值	下四分位数	上四分位数	最大值	平均值	最小值	下四分位数	上四分位数	最大值	平均值
人口密度	-222.070	-143.047	25.857	432.427	51.599	-211.387	-45.637	37.868	207.422	1.680
路网密度	-234.947	-14.398	50.841	184.761	18.168	-200.478	5.136	119.937	274.709	63.072
公交站点密度	-61.400	24.447	231.623	574.684	130.600	-225.117	-5.122	112.679	607.284	78.264
轨交换乘数	-84.753	57.519	292.550	658.010	178.357	-50.556	45.388	232.801	470.609	146.698
到城市 CBD 距离	-175.319	51.603	403.430	871.346	249.675	-208.887	39.326	468.779	1 072.290	271.530
是否毗邻大型交通枢纽	-68.607	-2.281	25.724	184.744	17.366	-103.165	-22.460	15.546	154.477	2.216
风景名胜型 POI 密度	-378.868	-133.363	218.284	1 129.150	94.021	-481.358	-95.945	269.283	1 027.100	103.488
商业型 POI 密度	-149.871	33.592	283.257	708.702	169.350	-347.740	22.224	297.197	554.063	135.019
购物型 POI 密度	-364.190	-63.727	143.264	824.912	68.444	-420.560	-35.839	137.396	983.003	78.469
停车场密度	-636.948	-146.546	228.476	983.315	34.570	-1 129.250	-266.752	-12.653	257.068	-159.161
医疗型 POI 密度	-1 264.700	-307.108	148.273	444.693	-105.634	-923.547	-173.723	51.693	237.654	-100.357
政府型 POI 密度	-691.797	36.289	705.921	2 536.990	476.251	-1 024.900	-28.103	349.004	1 148.460	162.185
居住型 POI 密度	-388.392	-7.153	156.594	481.034	76.433	-373.778	-32.601	86.164	579.895	34.648



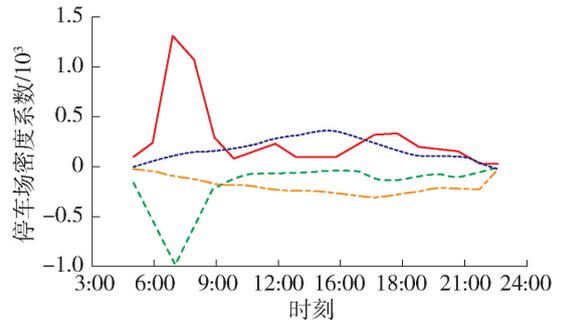
(a) 公交站点密度解释变量



(b) 商业型 POI 密度解释变量



(c) 人口密度解释变量



(d) 停车场密度解释变量

— 工作日进站 — 工作日出站 ··· 周末进站 - · - 周末出站

图 2 客流平均拟合系数时间分布

Fig. 2 Time distribution of average fitting coefficient of passenger flow

坐地铁归家; 在周末, 出行时间集中在 10:00—19:00, 这与周末人们出行娱乐时间规律相符。由

图 2(c) 可知, 人口密度对轨道交通客流的影响在大部分时间段呈现促进作用。在周末晚间时间段

呈现抑制作用,拟合系数在 $-7.17 \sim -109.89$;人口密度对工作日客流呈现促进作用,有明显的早晚高峰状态。在图 2(d)中,对于停车场密度变量,对工作日和周末进站客流呈现促进作用,对工作日和周末出站客流呈现抑制作用,并且在工作日早高峰促进和抑制作用最大,拟合系数峰值分别为 1 329.76 和 -970.07 ,这说明通勤者因交通

拥堵更倾向于乘坐地铁上班,人们更愿意选择方便快捷的交通方式。

3.2.2 拟合系数的空间分布

将各解释变量的平均拟合系数采用 ArcGIS 进行可视化,图 3~6 分别为各解释变量在工作日进站、工作日出站、周末进站和周末出站客流的拟合系数的平均值在空间上的分布情况。

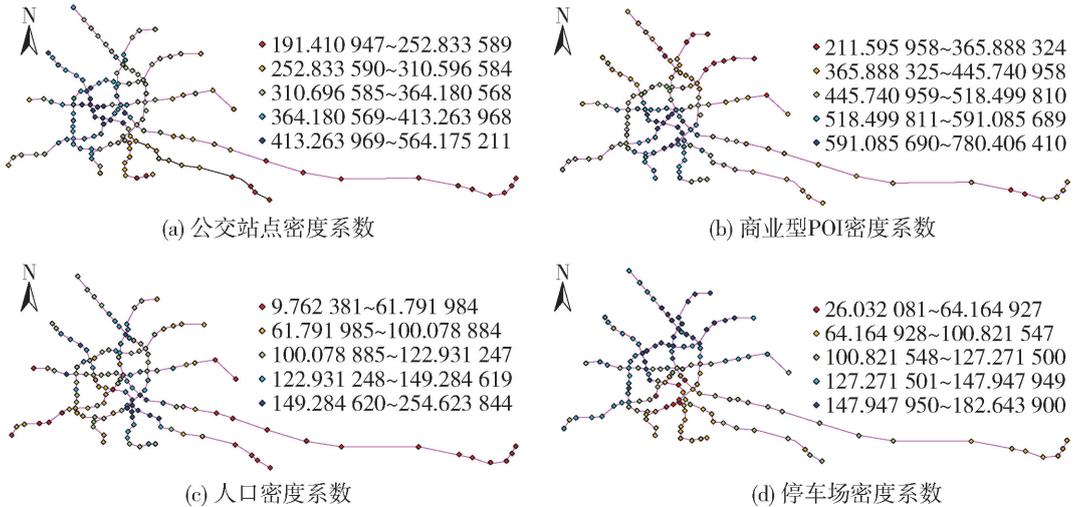


图3 工作日进站客流平均拟合系数的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the average fitting coefficient of passenger flow at the station on weekdays

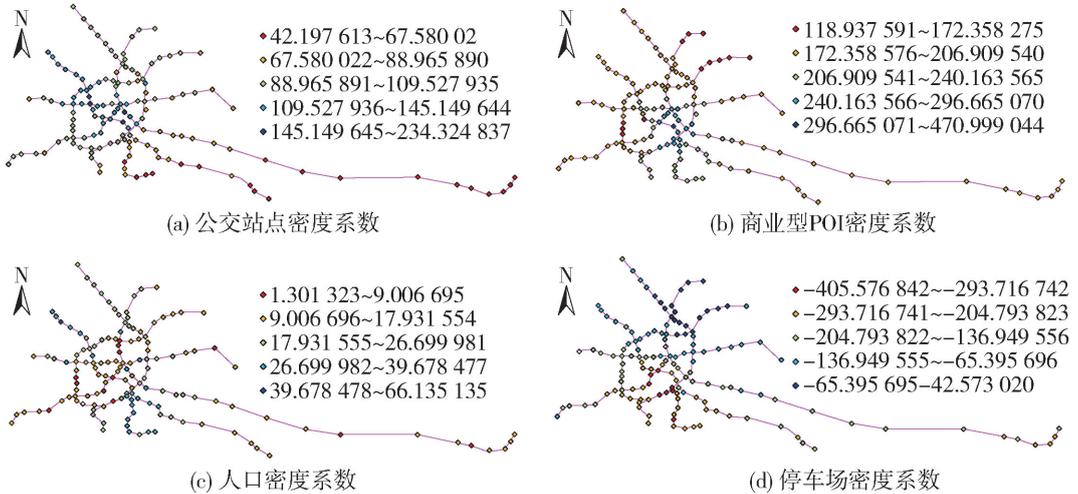


图4 工作日出站客流平均拟合系数的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the average fitting coefficient of outbound passenger flow on weekdays

如图 3~6 中的 (a) 所示,在工作日和周末,平均拟合系数均为正数,公交站点密度对各站点起到了促进作用,无论进站还是出站,都是中心城区较近郊区的影响更为显著,拟合系数达到峰值,分别保持在 $413.26 \sim 564.18$ 、 $145.15 \sim 234.32$ 、 $591.09 \sim 780.41$ 、 $145.15 \sim 234.32$ 。在中心城区大部分站点拟合系数较高,在中心城区外的近郊区拟合系数较低,可能与近郊区土地利用开发强度不大、地铁公交

覆盖率较低有关,促进作用因此降低。在图 3~6 的 (b) 中,平均拟合系数均为正数,说明在工作日和周末,无论进站还是出站,商业型 POI 都对轨道交通客流起到促进作用。尤其对中心城区商业圈的影响更为显著,拟合系数达到峰值,分别保持在 $591.09 \sim 780.41$ 、 $296.67 \sim 471.00$ 、 $223.43 \sim 267.62$ 、 $175.66 \sim 288.32$,这说明商业设施吸引客流,近郊区商业设施较少,影响不显著。从图 3~6 中的 (c) 可以看出,

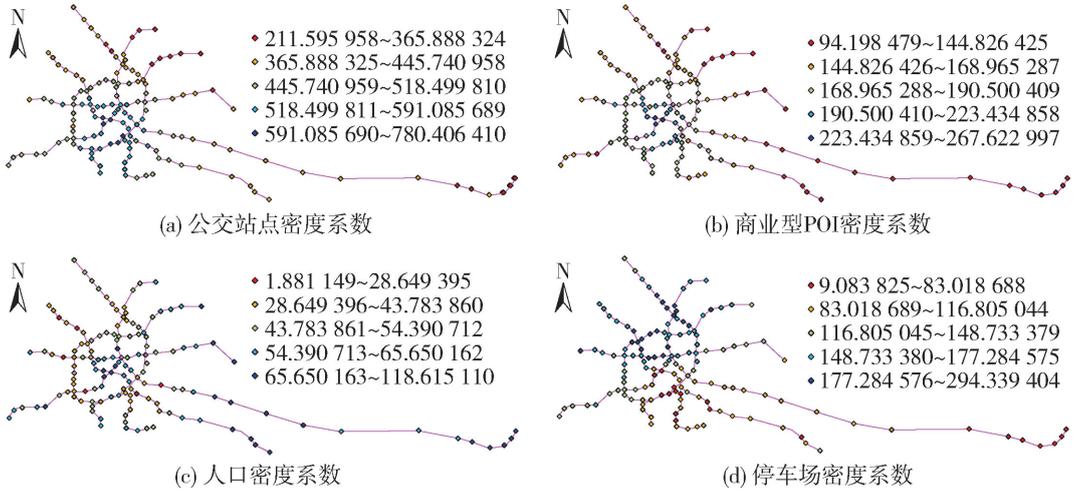


图 5 周末进站客流平均拟合系数的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the average fitting coefficient of passenger flow at the station at weekend

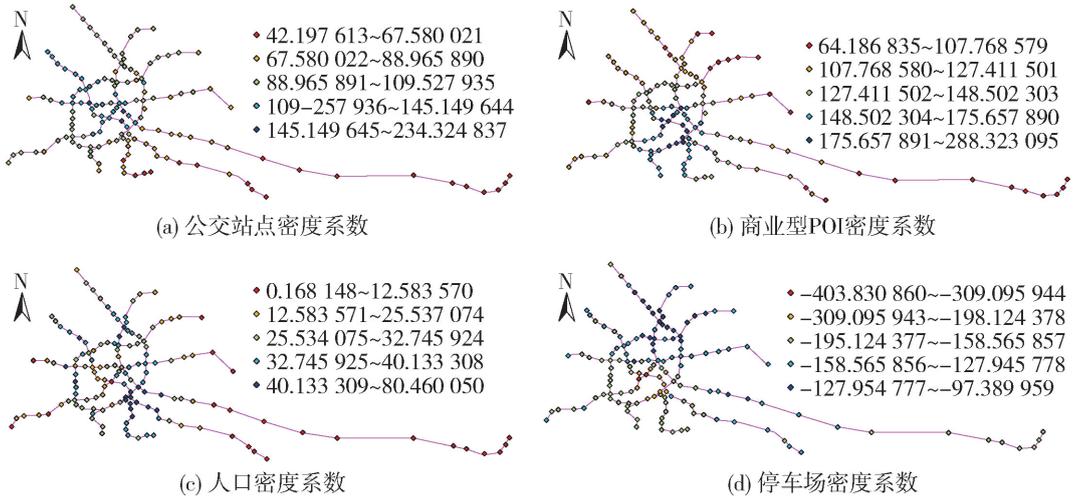


图 6 周末出站客流平均拟合系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the average fitting coefficient of outbound passenger flow at weekend

人口密度对轨道交通客流产生正向影响。在工作日,较高的拟合系数分布在中心城区的非商业区内,拟合系数分别保持在 149.28 ~ 254.62、39.68 ~ 66.14,对近郊区和中心 CBD 区影响作用降低;在周末,人口密度变量对近郊区进站客流影响显著,尤其是九号线滨海新区方向,拟合系数达到峰值,保持在 65.65 ~ 118.62、40.13 ~ 80.46,说明周末近郊区人们更喜欢乘坐地铁进入市区。由图 3(d)和图 5(d)可以看出,对于停车场密度变量,对进站客流呈现促进作用,拟合系数均为正数,且北部区位促进作用更显著,拟合系数达到峰值,保持在 147.95 ~ 182.64、177.28 ~ 294.34;而在图 4(d)和图 6(d)中,平均拟合系数出现负值,说明停车场密度变量对出站客流呈现抑制作用,且南部区位抑制作用更显著,拟合系数保持在 -405.58 ~ -293.72、-403.83 ~ -309.10,

原因很可能是北部区位相较于南部区位公交站点密度和路网密度较大,便利的公共服务和拥挤的道路交通条件促进了地铁的乘坐量。

4 结论

1) 基于轨道交通 AFC 和多源数据,构建模型分析站域建成环境对轨道交通客流量的影响,客流量与影响因素之间的关系存在显著的空间和时间非平稳性。相较于传统的 GWR 和 OLS,本文采用的 GTWR 具有更好的拟合优度,更好地在时间和空间维度解释变量对轨道交通客流影响。

2) 公交站点密度对轨道交通客流产生促进作用,尤其在工作日的早晚高峰时段和中心城区位置,但在近郊区位置促进作用不显著。这可能与近郊区土地利用开发强度不大、地铁公交覆盖率较低有关,

因此可以完善近郊区公共基础设施,增加公交站点数量,促进轨道交通客流的增长。

3) 市中心的商业设施在工作日晚高峰吸引更多的地铁乘客,而近郊区的商业设施在早高峰吸引更多的地铁乘客。因此,城市可以向多商业中心发展,有效提高地铁客流量。

4) 针对人口密度问题,增加近郊区人口密度,缓解市中心交通压力,增加近郊区轨道交通客流量。另外发现,充足的停车场设施数量可以吸引更多的轨道交通乘客。

参考文献:

- [1] LI Y, YANG L, SHEN H, et al. Modeling intra-destination travel behavior of tourists through spatio-temporal analysis[J]. *Journal of Destination Marketing & Management*, 2019, 11: 260-269.
- [2] QIAN X. The passenger transfer characteristic analysis of shenyang subway based on comparative analysis method [C]//*Applied Mechanics and Materials*. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2015: 484-487.
- [3] CHAI S, LIANG Q, ZHONG S. Design of urban rail transit network constrained by urban road network, trips and land-use characteristics [J]. *Sustainability*, 2019, 11(21): 6128.
- [4] 郭瑞利, 黄正东. 基于空间计量模型的武汉市轨道交通站点客流影响因素多级效应研究[J]. *现代城市研究*, 2022(2): 118-124.
GUO R L, HUANG Z D. Research on multi-level effects of influencing factors of passenger flow in Wuhan rail transit station based on spatial econometric model [J]. *Modern Urban Research*, 2022(2): 118-124. (in Chinese)
- [5] 张佳. 城市轨道交通初期客流时空演变及影响因素研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
ZHANG J. Study on the spatial-temporal evolution and influencing factors of passenger flow in the early stage of urban rail transit [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [6] DING C, CHEN P, JIAO J. Non-linear effects of the built environment on automobile-involved pedestrian crash frequency: a machine learning approach [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 112: 116-126.
- [7] 李国强. 建成环境对轨道交通站点客流及接驳方式的影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
LI G Q. Built environment, site of rail transit passenger flow and the influence of joint operation research [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [8] CHOI J, LEE Y J, KIM T, et al. An analysis of metro ridership at the station-to-station level in Seoul [J]. *Transportation*, 2012, 39(3): 705-722.
- [9] SUNG H, OH J T. Transit-oriented development in a high-density city: identifying its association with transit ridership in Seoul, Korea[J]. *Cities*, 2011, 28(1): 70-82.
- [10] PAN H, LI J, SHEN Q, et al. What determines rail transit passenger volume? Implications for transit oriented development planning [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 57D(12): 52-63.
- [11] JUN M J, CHOI K, JEONG J E, et al. Land use characteristics of subway catchment areas and their influence on subway ridership in Seoul [J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 48(10): 30-40.
- [12] 马晓磊, 张继宇, 刘剑锋, 等. 地铁站点客流特征与土地利用关系研究 [J]. *都市快轨交通*, 2017, 30(6): 33-38.
MA X L, ZHANG J Y, LIU J F, et al. Study on the relationship between passenger flow characteristics and land use at subway stations [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2017, 30(6): 33-38. (in Chinese)
- [13] 甘佐贤. 建成环境对城市轨道交通客流及出行特征的影响机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
GAN Z X. Built environment on the urban rail transit passenger flow and trip characteristics, the influence mechanism research [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [14] CARDOZO O D, GARCIA-PALOMARES J C, GUTIERREZ J. Application of geographically weighted regression to the direct forecasting of transit ridership at station-level [J]. *Applied Geography*, 2012, 34: 548-558.
- [15] ZHU Y, CHEN F, WANG Z, et al. Spatio-temporal analysis of rail station ridership determinants in the built environment[J]. *Transportation*, 2019, 46(6): 2269-2289.
- [16] 马新卫, 季彦婕, 金雨川, 等. 基于时空地理加权回归的共享单车需求影响因素分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(4): 1344-1354.
MA X W, JI Y J, JIN Y C, et al. Analysis of influencing factors of bike-sharing demand based on spatio-temporal geographically weighted regression [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(4): 1344-1354. (in Chinese)
- [17] SHI Z, ZHANG N, LIU Y, et al. Exploring spatiotemporal variation in hourly metro ridership at station level: the influence of built environment and topological structure[J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4564.
- [18] LAZARUS J, POURQUIER J C, FENG F, et al. Bikesharing evolution and expansion: understanding how docked and dockless models complement and compete—a case study of san francisco[R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2019.

(责任编辑 杨开英)