

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.02.004

# 轨道交通客流影响因素的时空 异质性与非线性分析 ——以天津城市轨道交通为例

张鹏羽<sup>1</sup>, 李正中<sup>1</sup>, 张翕然<sup>1</sup>, 王宇焱<sup>2</sup>

(1. 天津市交通科学研究院, 天津 300074; 2. 天津轨道交通线网管理有限公司, 天津 300380)

**摘要:** 为探究人口社会经济、土地利用性质、车站自身特征、其他交通属性因素与城市轨道交通客流量之间的影响机理, 基于 LandScan 人口栅格、兴趣点(POI)、自动售检票系统(AFC)等多源大数据, 运用时空地理加权回归-梯度提升回归树-沙普利加法解释(GTWR-GBRT-SHAP)模型分析上述因素对客流量的时空异质性与非线性影响。以天津市轨道交通线网数据开展案例研究, 结果表明: 混合模型在捕捉影响因素与客流量的时空异质性与非线性的同时具有较好的拟合优度, 人口密度、办公类型用地、购物休闲用地、介数中心性等因素对城市轨道交通客流量的影响时空差异明显, 居住类型用地、交通设施用地、土地利用熵、介数中心性等因素与城市轨道交通客流量间的复杂非线性和阈值关系显著。上述结果为优化以公共交通为导向的城市发展(TOD)规划及提升城市轨道交通客流效能提供了策略参考与理论支撑。

**关键词:** 城市轨道交通; 影响因素; 时空异质性; 非线性; GTWR-GBRT-SHAP 模型

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)02-0022-09

## Spatiotemporal Heterogeneity and Nonlinear Analysis of Factors Influencing Passenger Flow in Rail Transit: A Case Study of Tianjin Urban Rail Transit

ZHANG Pengyu<sup>1</sup>, LI Zhengzhong<sup>1</sup>, ZHANG Xiran<sup>1</sup>, WANG Yuqin<sup>2</sup>

(1. Tianjin Transportation Research Institute, Tianjin 300074;

2. Tianjin Rail Transit Network Management Co., Ltd., Tianjin 300380)

**Abstract:** This study explores the impact mechanism of population socio-economic, land use, station characteristics, and other transportation attributes on rail transit passenger flow. Using multi-source data including LandScan population grid, points of interest (POI), and automatic fare collection system (AFC), a spatiotemporal geographic weighted regression, gradient boosting regression tree, Shapley addition explanatory (GTWR-GBRT-SHAP) model, was developed to analyze the spatiotemporal heterogeneity and nonlinear effects of these factors. A case study was conducted using data from Tianjin rail transit network, and the results showed that the mixed model effectively captures the spatiotemporal heterogeneity and nonlinearity between influencing factors and passenger flow. Factors such as population density, office-type land, shopping and leisure land, and

收稿日期: 2024-06-21 修回日期: 2024-08-22

第一作者: 张鹏羽, 女, 硕士, 助理工程师, 从事城市轨道交通运营研究, 1393189436@qq.com

通信作者: 李正中, 男, 硕士, 正高级工程师, 从事交通安全应急研究, lizhengzhonglzz@163.com

基金项目: 天津市交通运输科技发展计划项目(2024-B12)

引用格式: 张鹏羽, 李正中, 张翕然, 等. 轨道交通客流影响因素的时空异质性与非线性分析: 以天津城市轨道交通为例[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 22-30.

ZHANG Pengyu, LI Zhengzhong, ZHANG Xiran, et al. Spatiotemporal heterogeneity and nonlinear analysis of factors influencing passenger flow in rail transit: a case study of Tianjin urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 22-30.

betweenness have significant spatiotemporal differences in their impact of passenger flow. Factors such as residential-type land, transportation facility land, land use entropy, and betweenness have significant complex non-linear and threshold relationships with passenger flow. The above results provide strategic references and theoretical support for optimizing public transportation-oriented urban development (TOD) planning and improving the efficiency of rail transit passenger flow.

**Keywords:** rail transit; influencing factors; spatiotemporal heterogeneity; nonlinear; GTWR-GBRT-SHAP

## 0 引言

城市轨道交通(简称“城轨”)作为城市重大基础设施,在优化居民出行结构、缓解城市交通拥堵、实现城市经济社会可持续发展等方面发挥着举足轻重的作用。客流量作为反映其服务能力与综合效益的重要指标,具有规律复杂、变化多样的特征,因此精细化分析多类影响因素与客流量的影响关系对优化 TOD 规划和改善地铁运营效益具有极为重要的现实意义。

目前对于城轨客流影响因素分析方面的研究内容较丰富,在讨论空间异质性方面,张旭<sup>[1]</sup>利用地理加权回归模型(GWR)研究了精细化土地利用数据与北京轨道交通车站工作日早晚高峰客流量间的互动关系;马壮林等<sup>[2]</sup>选取车站属性、连接性和建成环境三方面变量,运用多尺度地理加权回归模型(MGWR)构建客流特征分析模型,阐述工作日早晚高峰下城轨车站客流量的影响因素及其相互作用;李毅军等<sup>[3]</sup>基于 5Ds 准则将建成环境特征按照建筑面积、线网可达性、交通条件、职住数量分类,提出利用主成分分析-地理加权回归方法(PCA-GWR)讨论上述因素对城轨站点客流的影响;庞磊等<sup>[4]</sup>考虑建成环境、社会经济、站点属性与复杂网络特征四类影响因子,采用最小二乘法(OLS)、GWR 及 MGWR 模型探究不同类型站点客流量影响因素及其影响程度。为了同时考虑时空异质性;Huang 等<sup>[5]</sup>通过将时间效应纳入地理加权回归模型,开发出时空地理加权回归(GTWR)模型,探究加拿大房价与各因素间的影响机理;此后 Ma 等<sup>[6]</sup>验证了该模型在识别建成环境对公交客运量时空影响方面的有效性。

在研究非线性影响方面,颜冉等<sup>[7]</sup>基于合肥市轨道交通站点客流构建梯度提升决策树模型(GBDT),分析了建成环境对城轨客流的非线性影响;YANG 等<sup>[8]</sup>使用随机森林模型(RF)揭示了成都轨道交通一天中三个时段客流与建成环境要素间的非线性和时间异质性关系;纪柯柯等<sup>[9]</sup>基于梯度提升决策树模型探究了经济属性、交通便利性、建成环境三个层面影响因子对非常态客流量的非线性影响机制。

现有研究表明以 GWR、GTWR 为代表的地理加权回归线性模型因其具有捕捉客流影响因素的时空差异性、直接解释性强等特点,在分析客流与影响因素间线性关系方面成果颇为丰硕,但该模型预设了二者关系的线性框架。以 RF、GBDT 为代表基于树的机器学习模型因其多维数据适应性强、迭代优化性强等特点,在阐述客流及其影响因素的非线性关系方面应用较为广泛,但模型结果缺乏特征与时空解释性。SHAP 模型常与机器学习模型联合运行增强解释性。综合上述研究主要存在以下不足:①影响因素选取全面性、综合性有待提升,数据表征指标划分精细度欠缺;②较少同时考虑多类因素对客流影响程度的时空异质性与非线性关系,导致某些影响细节差异信息被忽视,难以精确指导城轨运营规划。鉴于此,提出采用 GTWR-GBRT-SHAP 融合模型研究各类影响因素与城轨客流之间的影响机理,在模型构建过程中同时考虑时空异质性与非线性关系,为城轨差异化管理、交通政策应用提供精准有力的指导。

## 1 研究范围与数据描述

### 1.1 研究范围

以天津市轨道交通为研究对象。截至 2023 年 7 月初,天津市轨道交通已开通 9 条运营线路,共计 181 座车站,运营里程达 286 km,途径和平区、河西区、南开区等 11 个市辖区,初步形成放射性骨架网络。现有多数研究将城轨影响域设定为以车站为中心的 400~800 m 范围<sup>[10-12]</sup>,考虑天津市站间距及出行特征特点,将城轨车站 800 m 范围与泰森多边形的重合区域作为研究影响区域。天津市轨道交通线路、车站与其缓冲区分布如图 1 所示。

### 1.2 数据描述

城轨客流数据来自天津市 2023 年 3 月 20 日—3 月 24 日(周一至周五)AFC 刷卡数据,研究时间均为多云天气,未出现降雨等特殊气候,数据结构包括卡号 ID、进出站站点、进出站时间。通过对原始数据清洗,筛选出近 1 100 万条有效刷卡次数,分别统计得到 181 座车站工作日早晚高峰、总客流量。

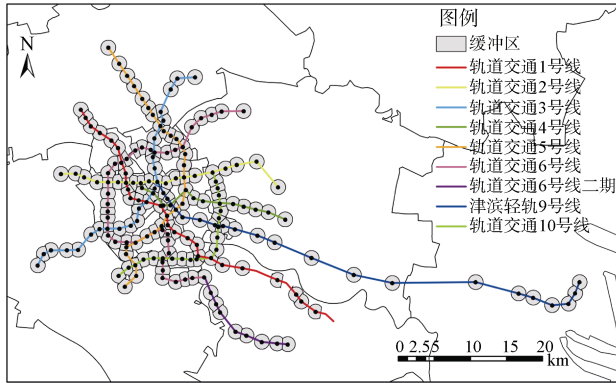


图 1 天津市轨道交通线路、车站与其缓冲区分布  
Figure 1 Distribution of Tianjin rail transit lines, stations and station buffer zones

城轨客流的影响因素繁多，宏观层面包括建成环境要素、交通政策等，微观层面有服务水平、乘客出行行为、车票价格等<sup>[13]</sup>，建成环境因影响直接、构成复杂而被视为主要影响因素，从人口社会经济、土地利用性质、车站自身特征、其他交通属性 4 个层面共收集 14 个变量，如表 1 所示。

表 1 自变量定义和描述性统计  
Table 1 Definition and descriptive statistics of independent variables

类型	变量	描述	均值	标准差
人口社会经济	人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	1 km 精度下各站缓冲区常住人口密度	8 792.1	6 966.7
	房价/元	各站缓冲区内居民小区平均房价	22 070	13 389
土地利用性质	居住类型用地/个	各站缓冲区内住宅小区 POI 数量	18	16
	办公类型用地/个	各站缓冲区内写字楼、园区 POI 数量	5	6
	教育设施用地/个	各站缓冲区内高等院校 POI 数量	0	1
	医疗服务用地/个	各站缓冲区内医院 POI 数量	4	4
	购物休闲用地/个	各站缓冲区内商场、电影院、超市等 POI 数量	8	9
	旅游景点用地/个	各站缓冲区内旅游景点 POI 数量	3	8
车站自身特征	度中心性	车站与网络中其他车站连接数量	0.011 8	0.003 8
	介数中心性	经过该车站的路径总数占网络中所有最短路径总数比例	0.069 1	0.063 5
	出入口数/个	各站已开通运营的出入口数量	3	3
其他交通属性	道路密度/(km/km <sup>2</sup> )	各站缓冲区内道路长度与面积之比	11.8	5.2
	交通设施用地/个	各站缓冲区内公交站、长途汽车站、火车站、机场数量	7	4

### 1.2.1 人口社会经济

人口密度来源于 LandScan 人口数据集，对 1 km 精度的人口空间分布栅格数据进行处理得到街道层级的人口密度。通过爬取链家(<https://tj.lianjia.com/>)网站天津市 11 区的居民小区房价信息，计算车站缓冲区内平均房价。

### 1.2.2 土地利用性质

通过高德地图 API 获取各站缓冲区内兴趣点(point of interest, POI)，共得到 248 906 条 POI 数据，数据结构包括名称、坐标、地址、类型等。选取代表居住类型、办公类型、教育设施、医疗服务、购物休闲、旅游景点、交通设施的七大类 POI。引入香农熵指数  $E$  衡量车站周围土地利用混合程度：

$$E = \frac{-\sum_{j=1}^J P_j \cdot \ln P_j}{\ln N_j} \quad (1)$$

式中， $P_j$  为该区域第  $j$  种 POI 数量占 POI 总数的比例； $N_j$  为 POI 类别数； $J$  为 POI 种类。

### 1.2.3 车站自身特征

城轨网络可视为一个有机整体，网络拓扑指标度和介数衡量各站在网络中连通性和传递性的差异，利用 Python 构建天津市轨道交通车站拓扑网络计算各车站的度中心性  $D_i$  和介数中心性  $B_i$ ：

$$D_i = \frac{\sum_j a_{ij}}{K} \quad (2)$$

式中， $a_{ij}$  为与站点  $i$  相连的车站数量； $K$  为城轨网络总车站数量。

$$B_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (3)$$

式中， $n_{st}^i$  为经过站点  $i$  且为最短路径条数； $g_{st}$  为连接站点  $s$ 、 $t$  的最短路径条数。

### 1.2.4 外部交通属性

考虑快速路、主干路、次干路、支路四级道路，基于开放街道地图(OpenStreetMap, OSM)与 ArcGIS 获取各站缓冲区内道路密度。交通设施用地为除城轨车站以外的公交站、长途汽车站、火车站、机场等交通运输场所。

## 2 研究方法与模型

为了较好地捕捉影响因素变量与客流量之间的时空关系，首先运行 GTWR 模型，输出影响系数向量，再将其作为 GBRT 模型的输入，调整参数训练达到最佳

拟合,最后结合 SHAP 模型分析二者间的非线性关系。

### 2.1 GTWR 模型

GTWR 模型基本公式为

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\beta_k(u_i, v_i, t_i) = [X^T W(u_i, v_i, t_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i, t_i) Y \quad (5)$$

$$W(u_i, v_i, t_i) = \text{diag}(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in}) \quad (6)$$

$$(d_{ij}^{ST})^2 = \lambda \left[ (u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2 \right] + \mu (t_i - t_j)^2 \quad (7)$$

式中,  $(u_i, v_i, t_i)$  为样本点的时空坐标;  $X_{ik}$  为样本点  $i$  第  $k$  个影响因素变量;  $Y_i$  表示样本点  $i$  客流量;  $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$  为截距;  $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$  为客流量与影响因素变量之间的回归系数;  $\varepsilon_i$  为残差项;  $W(u_i, v_i, t_i)$  为时空权重矩阵;  $n$  为样本的数量;  $X^T$  指  $X$  矩阵的转置; 对角元素  $\alpha_{in}$  为  $(u_i, v_i, t_i)$  的空间-时间距离函数, 对应于校准与样本点  $i$  相邻的加权回归时的权重;  $d_{ij}^{ST}$  表示时空距离;  $u, \lambda$  是为平衡测量其各自度量系统中时间、空间距离不同影响的比例因子。特别地, 定义时空比率参数  $\tau = \mu/\lambda$ 。

与每次观测参数估计固定的 OLS 模型相比, GTWR 模型的系数  $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$  衡量了观测样本的时空变化, 同时考虑了空间和时间的非平稳性。图 2 显示了时空客流点位的距离模型,  $(u(\lambda), v(\lambda))$  为客流量发生点所在的交通分析区(TAZ)位置坐标,  $t(\lambda)$  为测量客流量的时间。

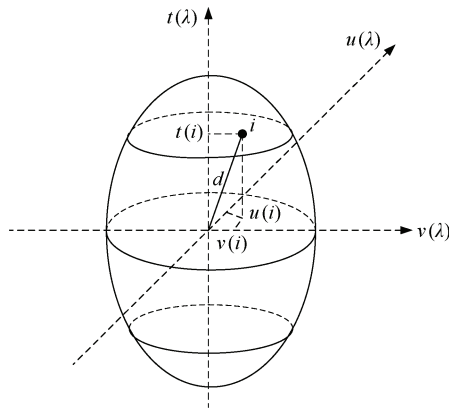


图 2 GTWR 模型时空距离示意

Figure 2 Spatiotemporal distance in GTWR model

### 2.2 GTWR-GBRT 混合模型

GBRT 为基于回归树的 Boosting 族机器学习技术, 主要原理是选择部分样本和特征组合成基本分类器, 通过学习已有模型残差生成新的模型, 进而使新模型

目标函数值最小化<sup>[14]</sup>。GTWR-GBRT 模型中用  $x'$  替代了影响因素变量  $x$ , 即

$$f_m(x) = f_{m-1}(X) + \xi \sum_{j=1}^J \rho_m c_{jm} I, x \in R_{jm} \quad (8)$$

$$f_m(x') = f_{m-1}(X') + \xi \sum_{j=1}^J \rho_m c_{jm} I, x' \in R_{jm} \quad (9)$$

式中,  $\xi$  为收缩参数;  $\rho_m$  通过最小化损失函数  $L=(y-f(x))^2$  的期望值来估计;  $c_{jm}$  为对应区域  $R_{jm}$  的常数值;  $R_{jm}$  表示输入空间被树分割的不相交区域,  $x \in R_{jm}$  时  $I$  为 1, 否则为 0;  $X'$  为上一步 GTWR 模型输出的影响系数向量。

### 2.3 GTWR-GBRT 与 SHAP 联合模型

SHAP 模型基于合作博弈论思想可以计算特征对模型输出的边际贡献, 通过 SHAP 值以数值的形式明确了各个特征的边际贡献<sup>[15]</sup>, 其可与上述 GTWR-GBRT 机器学习模型联合使用, 生成部分依赖图可视化影响因素对客流的非线性影响, 增强模型的可解释性。

## 3 研究结果及分析

### 3.1 模型回归结果分析

首先, 利用回归分析中的步进方法筛选变量, 变量筛选条件为经过  $F$  显著性检验(要输入的  $F$  变化量的概率  $\leq 0.05$ , 要除去的  $F$  变化量的概率  $\geq 0.10$ ), 筛选出人口密度、居住类型用地、办公类型用地、教育设施用地、购物休闲用地、交通设施用地、土地利用混合熵、度中心性、介数中心性 9 个变量。其次, 对上述变量进行空间自相关性与共线性检验, Moran I 指数、 $z$  得分、 $p$  值、 $VIF$  值结果如表 2 所示, 除度中心

表 2 自变量空间自相关性与共线性检验结果

Table 2 Results of the spatial autocorrelation test and collinearity test for independent variables

变量	Moran I 指数	$z$	$p$	VIF
人口密度	0.551	19.324	0.000 1	1.797
居住类型用地	0.358	14.762	0.000 2	2.093
办公类型用地	0.703	24.691	0.000 1	1.684
教育设施用地	0.307	12.804	0.000 2	1.140
购物休闲用地	0.456	16.925	0.000 1	1.986
交通设施用地	0.403	15.994	0.000 1	1.629
土地利用混合熵	0.267	7.592	0.000 1	1.476
度中心性	0.132	1.268	0.329 4	1.833
介数中心性	0.379	15.463	0.000 1	1.320

注:  $p < 0.001$  表明在 99.9% 的置信区间内认为结果有显著意义。

性外，其余变量空间正相关性明显，各变量多重共线性不明显，纳入模型中训练。

构建时空加权矩阵前需对测量单位天、米在计算时-空距离时进行协调，参数  $\tau$  可平衡不同的空间和时间单位，因此在实施 GTWR 模型前优化，通过验证程序获得合适的拟合优度参数值，应用本实例数据集的参数选择结果如图 3 所示，得到参数  $\tau$  的最佳取值为 30。

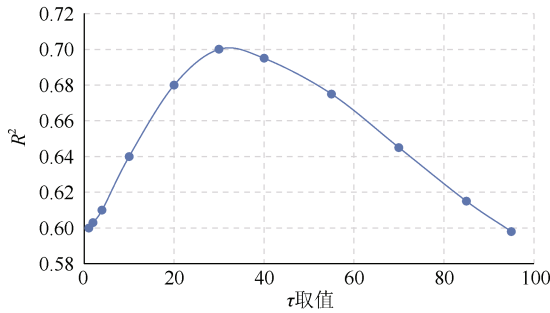


图 3 GTWR 模型参数  $\tau$  取值选择

Figure 3 Value selection of parameters  $\tau$  in GTWR model

选用拟合系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和平均绝对百分比误差(MAPE)3个指标比较衡量各模型的拟合优度。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - y'_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_i (y_i - y'_i)^2} \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{1}{I} \sum_i \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中， $y'_i$  为拟合值； $y_i$  为真实值； $\bar{y}$  为真实值的平均； $I$  为样本数。

为验证 GTWR-GBRT-SHAP 模型相比于常用在城轨客流因素分析的 GTWR、GBRT、GWR 模型优势，训练各模型并输出结果比较优劣。表 3 显示了早晚高峰时段客流不同模型的  $R^2$ 、RMSE、MAPE 结果，对其分析发现，GTWR-GBRT-SHAP 具有较高的  $R^2$  值、较低的 RMSE、MAPE 值， $R^2$  相比于 GTWR 平均提高了近 0.1，相比于 GBRT 平均提高了近 0.05，该模型呈现出较优的拟合效果。

考虑时空异质性的 GTWR 模型拟合性能优于仅考虑空间异质性的 GWR 模型，GBRT 机器学习模型相比于前两者由于未受到线性约束的制约，表现出较好的样本适应能力，融合 GTWR 模型的时空异质性与

GBRT 模型的非线性，GTWR-GBRT-SHAP 模型产生了最优的回归结果。

表 3 GTWR-GBRT-SHAP、GTWR、GBRT、GWR 模型结果对比

Table 3 Comparison of results of GTWR-GBRT-SHAP, GTWR, GBRT, and GWR models

模型	客流量类型	$R^2$	RMSE	MAPE
GTWR-GBRT-SHAP	早高峰进站量	0.75	703.94	0.98
	晚高峰进站量	0.80	650.71	0.85
	早高峰出站量	0.78	671.45	0.90
	晚高峰出站量	0.81	643.62	0.85
GTWR	早高峰进站量	0.70	755.18	1.02
	晚高峰进站量			
	早高峰出站量			
	晚高峰出站量			
GBRT	早高峰进站量	0.72	731.69	1.01
	晚高峰进站量	0.76	692.32	0.95
	早高峰出站量	0.75	702.84	0.98
	晚高峰出站量	0.77	680.97	0.92
GWR	早高峰进站量	0.51	1 074.24	1.67
	晚高峰进站量	0.63	677.52	1.05
	早高峰出站量	0.52	901.2	1.38
	晚高峰出站量	0.60	689.02	1.18

### 3.2 影响因素时空异质性分析

城轨早晚高峰客流占据了全天客流的较高比例，考虑早、晚高峰时段的时间维度，基于模型输出结果从时空范畴探讨主要影响因素对于客流量的影响机制。

由图 4 可知，人口密度对早高峰进站量的影响，除了在东丽区的大部分站点(2、4、10 号线)和滨海新区部分站点(9 号线)为负面外，其余均为正面促进作用，相比于早高峰进站量，人口密度对晚高峰进站量的影响较小，且在天津市西部区域为负影响。在 9 号线东海路、会展中心、太湖路的影响最大，可能与邻近终点站且滨海新区通勤者较为依赖地铁方式有关。从影响系数绝对值来看，人口密度对早高峰时段进站客流的影响程度大于晚高峰时段进站，在人口密集区站点要更加侧重晚高峰进站客流的吸引，同时提升站点周边人口密度对晚高峰时段的进站客流增加效果会更加显著。

由图 5 可知，居住类型用地对早高峰进站量、晚高峰进站量的影响几乎全部表现为正面促进作用，尤其对天津市内六区的影响最为显著，主要原因为此区域居住人口较为密集、城轨出行优势明显。此外，居

住类型用地对早、晚高峰时段客流的影响程度无较大差异。

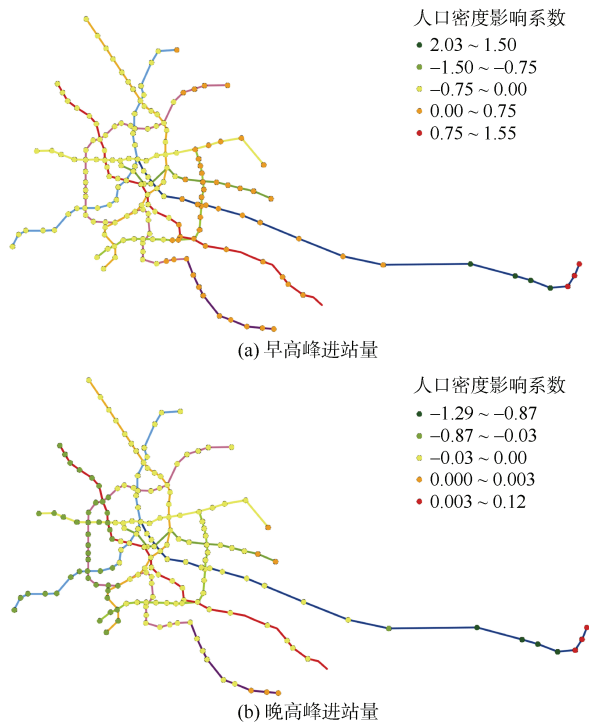


图4 人口密度影响系数空间分布  
Figure 4 Spatial distribution of population density impact coefficient

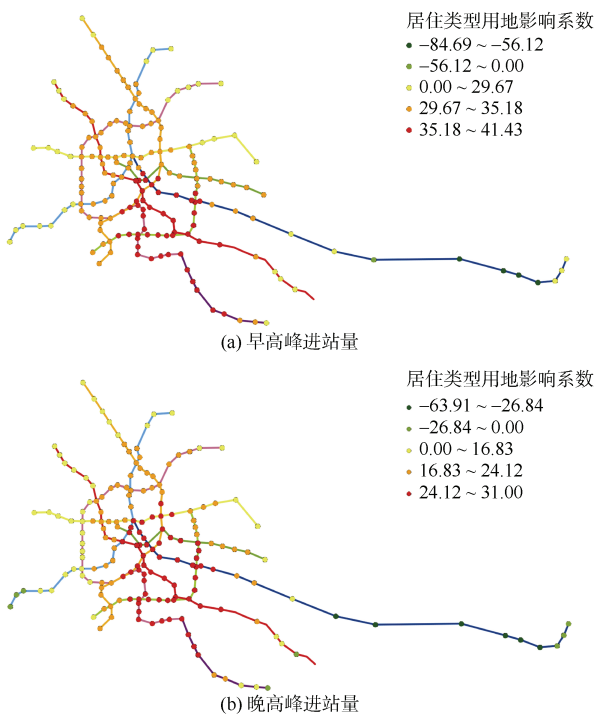


图5 居住类型用地影响系数空间分布  
Figure 5 Spatial distribution of residential land impact coefficient

办公类型用地对早高峰进站量的影响如图 6(a)所示, 几乎全为负面抑制作用, 与天津市用地职住错位相符合, 在北部区域的影响大于中部、南部, 对 9 号线滨海新区邻近终点的 6 站仍为正面影响。而办公类型用地对晚高峰进站量的影响则全为正面影响, 即办公类型用地越多, 晚高峰进站量愈大, 在南部区域及滨海新区的影响最为显著, 如图 6(b)所示。办公类型用地对于早、晚高峰时段客流的影响程度, 在 2 号线及以南(除 9 号线滨海新区邻近终点 8 站外)站点晚高峰进站客流所受影响效果大于早高峰。

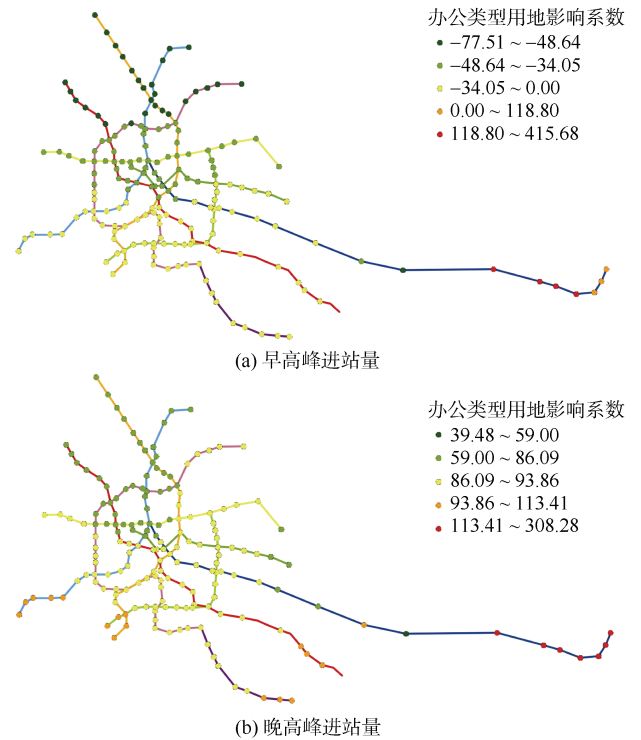


图6 办公类型用地影响系数空间分布  
Figure 6 Spatial distribution of office land impact coefficient

如图 7 所示, 购物休闲用地对早高峰进站量的影响既有正向作用也有负面作用, 在北部区域以及 9 号线滨海新区 9 个站点为正面影响, 9 个站点中市民广场、泰达、塘沽、胡家园站的影响系数最大, 这些站点附近购物休闲用地增加会明显提升早高峰进站量, 其他区域均为负面影响; 与办公类型用地呈现出类似规律, 对各站晚高峰进站量均为正向作用。可见购物休闲引发的乘坐城轨行为主要发生在晚高峰时段。

介数中心性对早高峰进站量的影响, 除了在 3 号线南站、杨伍庄、学府工业区站外, 其余均为正面促进作用, 即车站在城轨网络中最短路径传递性越高, 早高峰进站量越多, 对相反的 3 站而言, 可能其他因

素的影响作用更显著,超过此变量的抑制作用;而对晚高峰进站量,除 9 号线钢管公司、胡家园站外,其余均为正面促进作用,如图 8 所示。从全线网来看,介数中心性对早、晚高峰时段客流的影响趋势无明显差异,但对早高峰时段客流的影响程度大于晚高峰时段,原因可能是通勤者更加关注早上上班最短路径的时效性。

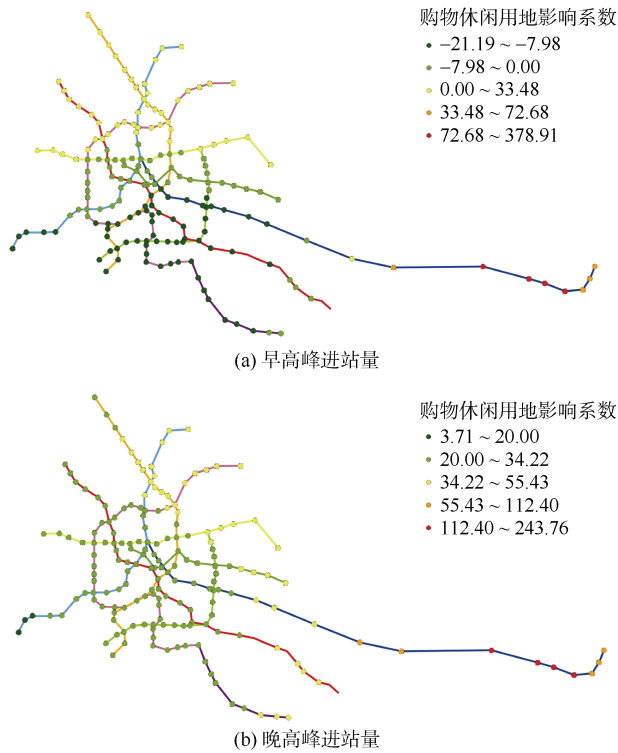


图 7 购物休闲用地影响系数空间分布  
Figure 7 Spatial distribution of shopping land impact coefficient

### 3.3 影响因素非线性分析

与预设影响因素与客流量间具有线性固定关系前提相区别,GTWR-GBRT-SHAP 模型展现了二者更加符合实际的非线性关系。

图 9 为 5 个主要影响因素与总客流量的部分依赖关系,存在着明显的非线性与阈值效应。就居住类型用地而言,如图 9(a)所示,站点周边存在 20 个以下住宅 POI 时,对客流量为负面减少作用,住宅 POI 数量达到 20 个以上时为正面增加作用,同时当达到 50 个左右时对客流量的增加作用趋于饱和;就办公类型用地而言,如图 9(b)所示,站点周边存在 4 个以上办公 POI 时则对客流量有增加作用,但在办公 POI 数量达到 10 个、20 个左右时这种作用转变为减少,可能由于在市内六区外产业园区附近,例如高新区站、学府工

业区站,私家车、班车等交通方式比较常用;就交通设施用地而言,如图 9(c)所示,当站点周边有 10 个及以上交通场所时,轨道客流量显著增加,一般而言交通枢纽的各类客流具有集聚效应;如图 9(d)所示,土地利用熵与客流量间的正负关系不明显,但较高的熵指数对客流量的增加作用较大,尤其是当其达到 0.8 以上时,此类用地开发丰富完善,例如营口道站、小白楼站,吸引了较多居民前往;如图 9(e)所示,介数中心性除个别站点外,整体而言对客流量表现为促进作用,与前文时空异质性分析得出的结论相符。

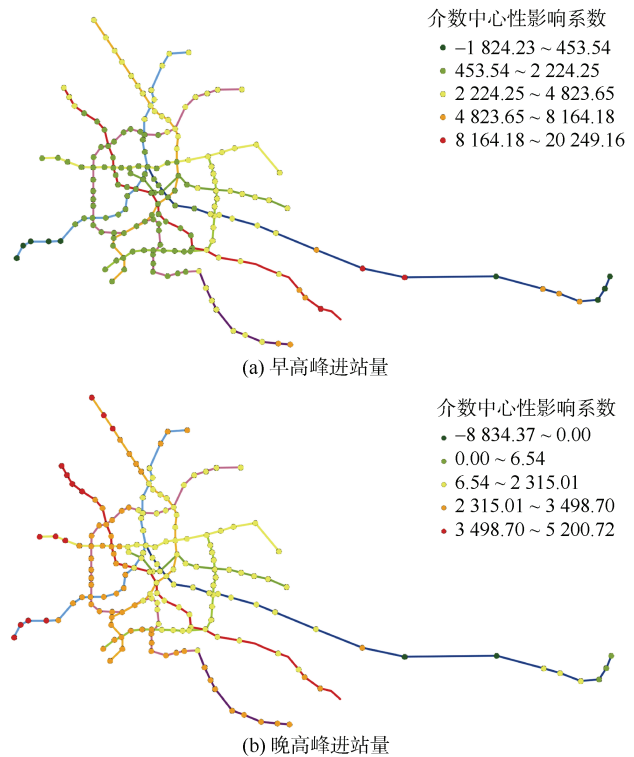
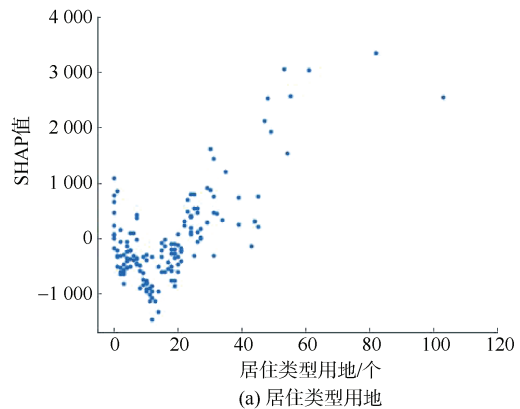


图 8 介数中心性影响系数空间分布  
Figure 8 Spatial distribution of betweenness centrality impact coefficient



(a) 居住类型用地

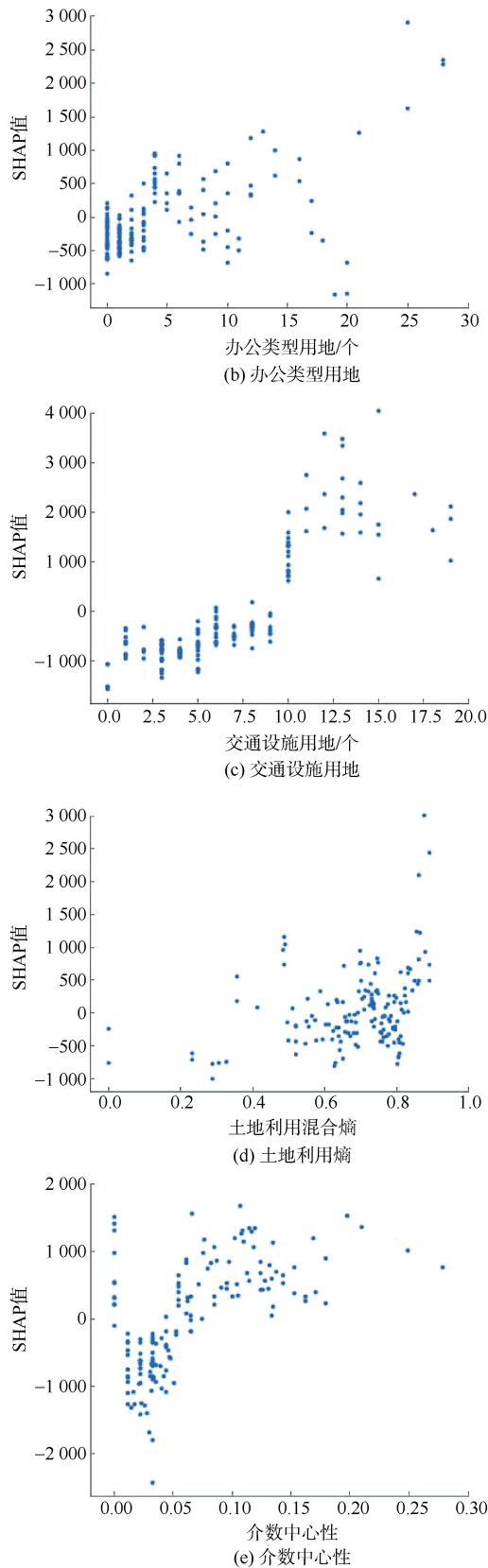


图9 影响因素与总客流量的部分依赖关系  
Figure 9 Partial dependence relationship of influencing factors and total passenger flow

## 4 结论

基于 GTWR-GBRT-SHAP 模型探索了城轨客流影响因素对客流的时空异质性与非线性影响作用, 研究结果表明:

1) 探究城轨客流及其影响因素间的互动关系时, 融合线性回归模型与非线性机器学习模型的 GTWR-GBRT-SHAP 模型可产生更优的拟合效果, 同时捕捉到了时空异质性与非线性的影响差异信息。

2) 人口密度对早高峰进站量与晚高峰进站量的影响存在反向差异, 体现了晚高峰时段进站客流的提升空间潜力高于早高峰时段; 居住类型用地对早晚高峰客流量具有正面影响作用, 特别对于天津市内六区而言, 促进作用更为明显, 说明城区人口通勤更依赖地铁这种交通方式; 办公类型用地对早高峰进站量具有抑制作用, 对北部区域的影响大于中部、南部, 而对晚高峰进站量具有促进作用, 在南部区域及滨海新区的影响最为显著, 规律与天津市用地职住错位现状相符合; 购物休闲用地对 9 号线某些站点、晚高峰时段客流的影响系数较大, 这些站点需要更加关注此类用地开发, 同时要着重考虑晚高峰时段的客流容纳量; 介数中心性与绝大部分站点客流存在正相关关系。

3) 以天津市为例, 居住类型用地、办公类型用地、交通设施用地、土地利用熵、介数中心性与客流量间存在各异的非线性关系及阈值效应, 例如住宅 POI 超过 20 个、办公 POI 超过 4 个对客流增加作用显著, 但趋于饱和的阈值、转为相反作用分别为 50、10 和 20 个; 10 个及以上交通场所时, 轨道客流量得到显著增加, 交通枢纽作用凸显; 较高的土地利用混合熵指数 0.8 以上对客流量的增加作用较大; 介数中心性与几乎所有站点客流量存在正相关非线性关系。

规划天津市轨道交通 TOD 时, 办公类型用地在天津市不同区域、早晚高峰时段发挥着各异的影响程度; 9 号线的部分站点则需更加关注购物休闲类用地开发, 注重考虑晚高峰时段客流饱和度; 人口密度对早高峰时段进站客流的影响大于晚高峰时段, 晚高峰时段进站客流更具潜力; 在激发客流增长时要特别注意各影响因素的阈值范围, 客流与影响因素间关系并非呈现完全的正、负相关趋势, 而交通枢纽的规划应至少包含 10 个交通场站。城市规划和交通主管部门可以以上时空异质性和非线性分析结果为参考, 应用因地制宜、分时错峰的规划政策或策略, 针对不同区域、对应时段侧重开发不同类型用地, 采取社会经济、交通政策

扶持,引导城轨站域影响因素更新,平衡站点时空客流量,综合提升城轨客流效能。

未来的研究可从以下两个方面拓展:一是同步考虑共享单车、出租车两种交通方式对于城轨客流的影响;二是探讨周末、节假日等特殊日期下客流量及其影响因素的作用机制,以形成更加完备全面的分析结果。

## 参考文献

- [1] 张旭. 基于精细化用地数据的城市轨道交通客流预测[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
ZHANG Xu. Passenger flow forecast of urban rail transit based on refined land use data[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [2] 马壮林, 杨兴, 胡大伟, 等. 城市轨道交通车站客流特征影响程度分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(9): 1428-1439.  
MA Zhuanglin, YANG Xing, HU Dawei, et al. Influence degree analysis of ridership characteristics at urban rail transit stations[J]. Journal of tsinghua university (science and technology), 2023, 63(9): 1428-1439.
- [3] 李毅军, 罗紫宇, 周涛, 等. 基于PCA-GWR方法探究建成环境对轨道站点客流的影响[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(2): 159-166.  
LI Yijun, LUO Ziyu, ZHOU Tao, et al. Exploration of impact of built environment on passenger flow of rail stations based on PCA-GWR method[J]. Railway transport and economy, 2024, 46(2): 159-166.
- [4] 庞磊, 任利剑, 张哲浩, 等. 基于乘降客流特征的轨道交通站点分类及客流量影响因素分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(4): 184-193.  
PANG Lei, REN Lijian, ZHANG Zhehao, et al. Metro station classification based on boarding and alighting passenger flows and ridership impact factors[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2023, 23(4): 184-193.
- [5] HUANG Bo, WU Bo, BARRY M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. International journal of geographical information science, 2010, 24(3): 383-401.
- [6] MA Xiaolei, ZHANG Jiyu, DING Chuan, et al. A geographically and temporally weighted regression model to explore the spatiotemporal influence of built environment on transit ridership[J]. Computers, environment and urban systems, 2018, 70: 113-124.
- [7] 颜冉, 张纯, 郑浩. 站域建成环境对城市轨道交通客流的影响研究: 以合肥市为例[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(5): 69-75.  
YAN Ran, ZHANG Chun, ZHENG Hao. Influence of the station-area built environment on the rail transit ridership: a case study on Hefei[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(5): 69-75.
- [8] YANG Linchuan, YU Bingjie, LIANG Yuan, et al. Time-varying and non-linear associations between metro ridership and the built environment[J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 132: 104931.
- [9] 纪柯柯, 杨青, 纪凯丽, 等. 城市轨道交通非常态客流出行影响机制研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(4): 182-192.  
JI Keke, YANG Qing, JI Kaili, et al. Influence mechanisms of abnormal passenger flow travel in Tianjin urban rail transit[J]. Railway transport and economy, 2024, 46(4): 182-192.
- [10] SOHN K, SHIM H. Factors generating boardings at Metro stations in the Seoul metropolitan area[J]. Cities, 2010, 27(5): 358-368.
- [11] 王亚洁. 国外城市轨道交通与站域土地利用互动研究进展[J]. 国际城市规划, 2018, 33(1): 111-118.  
WANG Yajie. International studies on the interaction between urban rail transit and land use of station areas[J]. Urban planning international, 2018, 33(1): 111-118.
- [12] LYU Guowei, BERTOLINI L, PFEFFER K. Developing a TOD typology for Beijing metro station areas[J]. Journal of transport geography, 2016, 55: 40-50.
- [13] 张鹏羽. 考虑时空异质性的城市轨道交通新线运营初期进出站客流量预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.  
ZHANG Pengyu. Study on passenger flow forecast of new urban rail transit line in the initial stage of operation considering temporal and spatial heterogeneity[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [14] 周雨晴. 城市轨道交通站点可达性对客流量影响研究: 以西安市为例[D]. 西安: 长安大学, 2023.  
ZHOU Yuqing. Study on the influence of urban rail transit station accessibility on passenger flow: taking xi'an as an example[D]. Xi'an: Changan University, 2023.
- [15] 汪雨菲, 杨皓森, 喻冰洁, 等. 站域建成环境与地铁客流量的非线性关系和协同效应: 可解释机器学习分析[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(2): 1-7.  
WANG Yufei, YANG Haosen, YU Bingjie, et al. Nonlinear and synergistic effects of station-area built environments on metro ridership: a shapley additive explanations (SHAP) analysis[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 1-7.

(编辑: 傅依萱)