

文章编号:1000-5854(2026)03-0297-17

# 基于多源数据的城市轨道交通与土地利用相互影响分析

朱晨铭<sup>1</sup>, 冯忠江<sup>1,2</sup>, 魏巍<sup>1</sup>, 毕雯雅<sup>1</sup>, 高诗江<sup>1</sup>

(1.河北师范大学地理科学学院,河北石家庄 050024; 2.河北省环境演变与生态建设实验室,  
河北省环境变化遥感识别技术创新中心,河北石家庄 050024)

**摘要:**在大数据日渐丰富的背景下,运用高分辨率遥感影像,结合兴趣点(POI)数据和轨道交通客流量数据,从轨道交通对土地利用变化的时空效应及土地利用对轨道交通站点客流量的影响进行剖析.研究表明:1) 地铁建设到运营阶段,土地利用变化率逐渐增大,地铁线路附近土地开发利用强度由中低强度向高强度转变;2) 轨道交通对城市土地开发利用的影响存在空间异质性特征,对线路两端的郊区土地利用变化影响大,而对城市中心地区影响较小,用地类型发生改变的站点大多远离城市中心;3) 土地利用对轨道交通客流量的影响呈现显著的时间分异特征,商业用地无论工作日还是周末,对客流量的影响都很显著,绿地广场在周末对客流量的吸引力也很突出;4) 土地利用对轨道交通客流量的吸引呈现非线性特征与阈值效应,商业用地和居住用地对客流的吸引作用,显著响应的因子值分别为0.15~0.75和0.3~0.7,到CBD的距离对客流量的吸引作用主要集中在0~4 km.

**关键词:**轨道交通;土地利用变化;高分遥感影像;站点客流量;POI

**中图分类号:**K 901 **文献标志码:**A **doi:**10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202505006

## Analysis on the Interaction Between Rail Transit and Urban Land Use Types

ZHU Chenming<sup>1</sup>, FENG Zhongjiang<sup>1,2</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, BI Wenya<sup>1</sup>, GAO Shijiang<sup>1</sup>

(1.School of Geographical Sciences,Hebei Normal University,Shijiazhuang Hebei 050024,China; 2.Hebei Key Laboratory of  
Environmental Change and Ecological Construction,Hebei Technology Innovation Center  
for Remote Sensing Identification of Environmental Change,Shijiazhuang Hebei 050024,China)

**Abstract:** Under the background of increasingly rich big data, using high resolution remote sensing image, in combination with point of interest (POI) data and rail transit traffic data, spatial-temporal effects of rail transit on land use change and impact of land use on passenger flow at rail transit stations are analyzed. The results show that: 1) From the stage of subway construction to operation, the change rate of land use increases gradually, and the intensity of land development and utilization near subway lines changes from medium and low intensity to high intensity. 2) There is spatial heterogeneity in the impact of rail transit on urban land development and utilization. Rail transit has a greater impact on land use change in suburban areas at both ends of the line, but a smaller impact on mature urban centers. Most of the stations with land use change are far away from urban centers. 3) The influence of land use on the passenger flow of rail transit exhibits significant temporal differentiation characteristics. No matter on weekdays or weekends, commercial land has a great influence on the passenger flow, and the green square has a strong ability to attract the passenger flow on weekends. 4) The attraction of land use to rail transit passenger flow has nonlinear characteristics and threshold effect. The attraction of commercial land and residential land to

收稿日期:2024-05-26; 修回日期:2024-08-27

基金项目:国家自然科学基金(41471090); 河北省自然科学基金(D2011205098); 河北省科技计划项目(15457630D)

作者简介:朱晨铭(1997-),男,满族,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为区域经济与土地利用.

通信作者:冯忠江(1964-),男,教授,硕士生导师,研究方向为区域经济与土地利用.E-mail:fengzhongjiang@163.com

rail transit passenger flow reflects significant factor values ranging from 0.15 to 0.75 and 0.3 to 0.7, respectively. The attraction of distance from CBD to rail transit passenger flow mainly concentrates in the range of 0 to 4 km.

**Key words:** rail transit; land use change; high-resolution remote sensing image; site passenger flow; POI

城市轨道交通作为城市的骨骼,承担着集散人流和为居民进行城市活动提供交通工具的作用<sup>[1]</sup>,其布局直接影响着沿线及周边地区的土地利用结构及土地利用强度变化<sup>[2]</sup>.城市轨道交通对沿线土地利用布局存在显著的时空效益<sup>[3]</sup>.地铁站对土地开发强度具有一定的导向作用<sup>[4]</sup>,站点附近土地利用开发强度要高于周围地区,呈现明显的圈层结构<sup>[5]</sup>.

土地利用是居民的社会经济活动在城市土地上聚集的表现形式<sup>[6]</sup>,城市土地开发强度和布局对轨道交通出行需求、客流量以及站点的空间分布会产生巨大影响<sup>[7]</sup>.站点客流量与商业用地、居住用地以及混合用地的面积指标呈正相关<sup>[8]</sup>,城市土地利用类型的分布对轨道交通的发展具有重要的导向作用.

石家庄市轨道交通发展历史短,有关石家庄市城市轨道交通与土地利用相互影响的研究,多以统计数据为基础,适时性不强,不能准确反映城市轨道交通与土地利用之间的内在联系.在大数据日渐丰富的背景下,利用高分辨率遥感影像数据及兴趣点数据,从时间和空间 2 个维度精细化研究城市轨道交通对土地利用的影响;利用非线性机器学习模型和 SHAP 解释模型,结合轨道交通刷卡客流量数据分析土地利用对轨道交通站点客流量的影响,以期为石家庄市轨道交通与土地利用协同发展提供技术支撑.

### 1 数据来源与研究方法

#### 1.1 研究区轨道交通发展概况

自 2012 年 9 月石家庄市首段地铁正式开工建设以来,石家庄市已经建成 3 条地铁线路,石家庄市共有地铁站点 60 个,地铁运营总里程 76.5 km,日均客运量 25.5 万人次,最高日客运量 38.17 万人次.根据石家庄市新一轮轨道交通建设规划(2020—2025 年),石家庄市地铁里程将增至近 140 km.考虑到多元大数据的可获得性,研究范围仅限于石家庄市中心城区(桥西区、裕华区、长安区、新华区),涉及地铁站点共计 55 个.石家庄市地铁修建和开通运营时间及线路分布见表 1 和图 1.

表 1 石家庄市地铁 1 号线、2 号线、3 号线建设及运营时间表

Tab.1 Construction and Operation Schedule of Shijiazhuang City Metro Line 1, Line 2 and Line 3

线路名称	开工建设时间	开通运营时间
1 号线	2012 年 9 月	2017 年 6 月
2 号线	2016 年 9 月	2020 年 8 月
3 号线	2012 年 9 月	2017 年 6 月

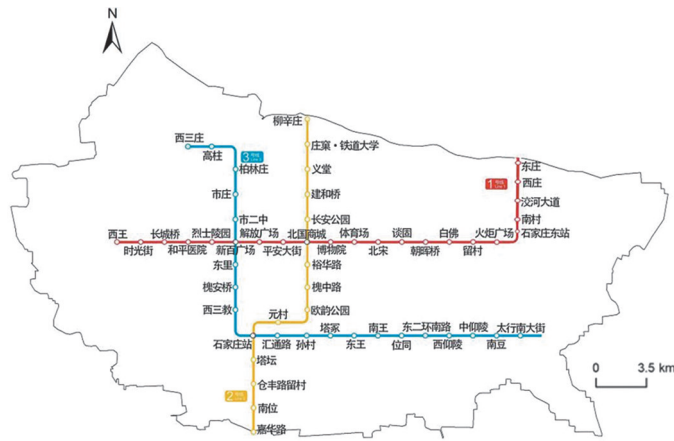


图 1 石家庄市地铁线路图

Fig.1 Shijiazhuang Metro Line Map

### 1.2 数据来源

研究所用数据主要包括土地利用现状、石家庄市兴趣点(POI)和石家庄市轨道交通刷卡数据等。

1) 石家庄市 2010、2015、2020 年 3 期土地利用现状数据.通过 Google Earth 下载高分辨率遥感影像,并对遥感影像进行解译;选取的 3 期 Landsat TM 遥感影像,平均云量为 0.18,且云层未覆盖研究区域,分辨率为 30 m,即图中每个栅格对应地面实际尺寸为 30 m×30 m.

2) 石家庄市 POI 数据.POI 是指地图上任何有意义的点的位置信息.通过 Python 语言平台及网络爬虫算法抓取石家庄市内的开源 POI 数据(采用 2021 年 6 月数据),共获取地铁线路 3 条,地铁站点 55 个(截至 2021 年 6 月 10 日),爬取其他各类型 POI 数据共计 57 638 条.

3) 石家庄市轨道交通刷卡数据.来源于石家庄市轨道交通总公司,IC 卡属性包括卡号、刷卡日期、站点名称、站点类型、IC 卡类型、价格等信息.

### 1.3 数据预处理

采用高分辨率遥感影像对土地利用现状进行解译,目视解译即能收到良好的解译效果.目视解译土地利用分类,采用《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB 50137—2011)<sup>[9]</sup>,将土地利用现状分为 6 类:居住用地 R、公共服务用地 A、商业用地 B、工业用地 M、交通设施用地 S、绿地广场用地 G.其中,居住用地进一步划分为 3 类,即以别墅区为代表的一级居住用地(R<sub>1</sub>)、以高档小区和新建设小区为代表的二级居住用地(R<sub>2</sub>)和以城中村为代表的三级居住用地(R<sub>3</sub>)<sup>[10]</sup>,公共服务用地包括公共管理用地和公用设施用地,工业用地包括物流与仓储用地.遥感影像虽然提供了丰富的地表细节信息,但是由于缺乏地物的社会属性信息,解译结果会与现实有一定的差异<sup>[11]</sup>.POI 数据具有更新快、建筑物社会属性准确等优点<sup>[12]</sup>,结合 POI 数据可有效弥补高分辨率遥感数据的不足,能更加精准地提取城市土地利用信息,部分土地利用类型需综合 POI 一级和二级分类进行综合区分.高德地图一级 POI 类别属性与遥感解译地类的对应关系如表 2 所示.

表 2 高德地图一级 POI 类型与土地利用类型对应关系

Tab.2 Correspondence Between First-level POI Types and Land Use Types in Amap

POI 类别	土地利用类型	POI 类别	土地利用类型
汽车服务	M	风景名胜	G
汽车销售	M	商务住宿	B
汽车维修	M	政府机构及社会团体	A
摩托车服务	M	科教文化服务	A
餐饮服务	B	交通设施服务	S
购物服务	B	金融保险服务	B
生活服务	B	公司企业	B、M
体育休闲服务	A、B	道路附属设施	S
医疗保健服务	A	公共设施	A
住宿服务	B、R	通行设施	S

首先,基于 2020 年 6 月采集的 POI 数据及 2020 年的 Google Earth 高分辨率土地利用遥感影像,通过目视解译得到 2020 年土地利用数据 L<sub>2020</sub>.在对 2015 年和 2010 年遥感影像进行解译时,对于土地利用未发生变化的地块,L<sub>2020</sub> 该地块的土地利用类别即为 L<sub>2015</sub> 该地块的土地利用类别<sup>[13]</sup>;对于发生变化的地块,首先使用 2020 年遥感影像找出发生变化的地块,根据建筑面积、纹理和空间分布判断其土地利用类型<sup>[14]</sup>,一般为第三级居住用地或工业用地.重复上述步骤得到 L<sub>2010</sub>.利用高德地图的街景功能,结合已有的土地利用现状图,随机生成 1 200 个采样点,分别对解译的 2010、2015、2020 年土地利用类型图进行精度验证.结果一致的数据点分别有 1 095、1 122、1 162 个,精度分别为 91.25%、93.50% 和 96.83%,能够满足研究需求.石家庄市 2010、2015、2020 年 3 期土地利用现状数据如图 2~4 所示.

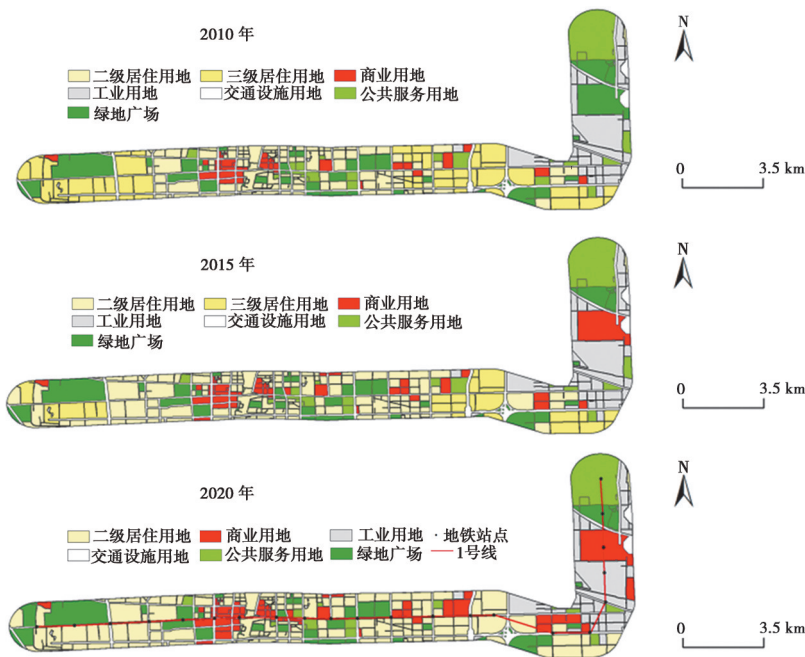


图2 石家庄市地铁1号线2010、2015、2020年沿线土地利用分布图

Fig.2 Land Use Distribution Map of Shijiazhuang City Metro Line 1 in 2010,2015 and 2020

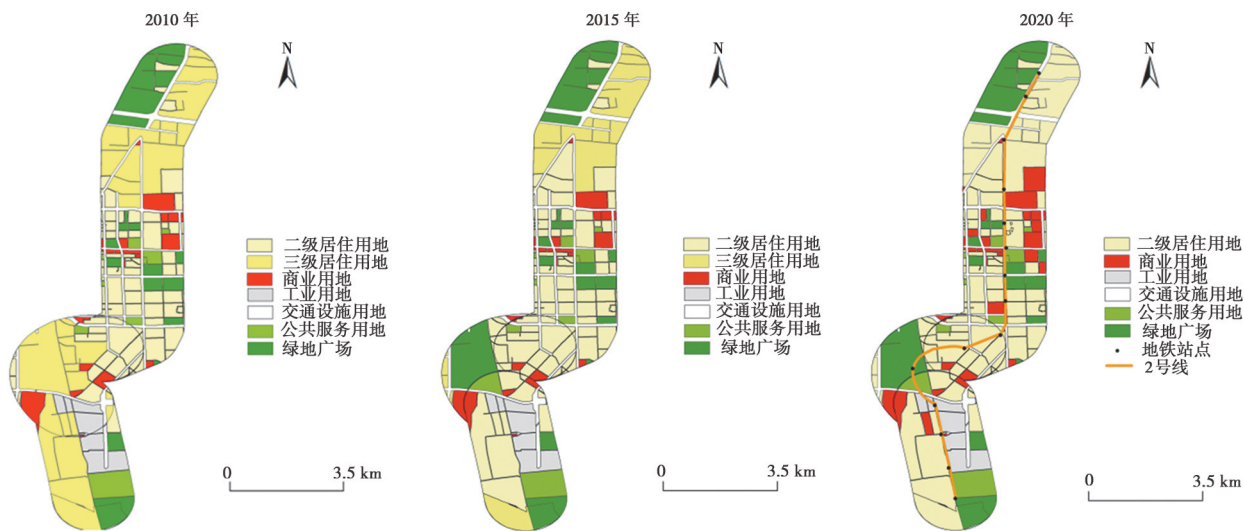
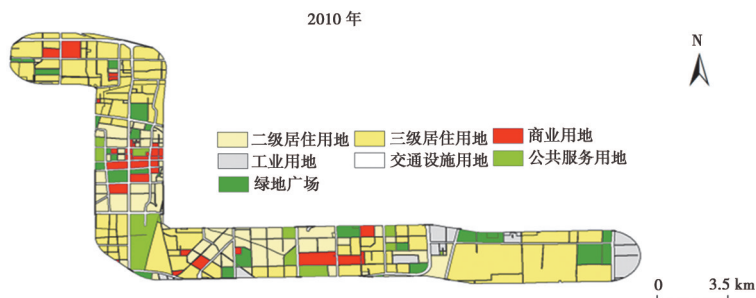


图3 石家庄市地铁2号线2010、2015、2020年沿线土地利用分布图

Fig.3 Land Use Distribution Map of Shijiazhuang City Metro Line 2 in 2010,2015 and 2020



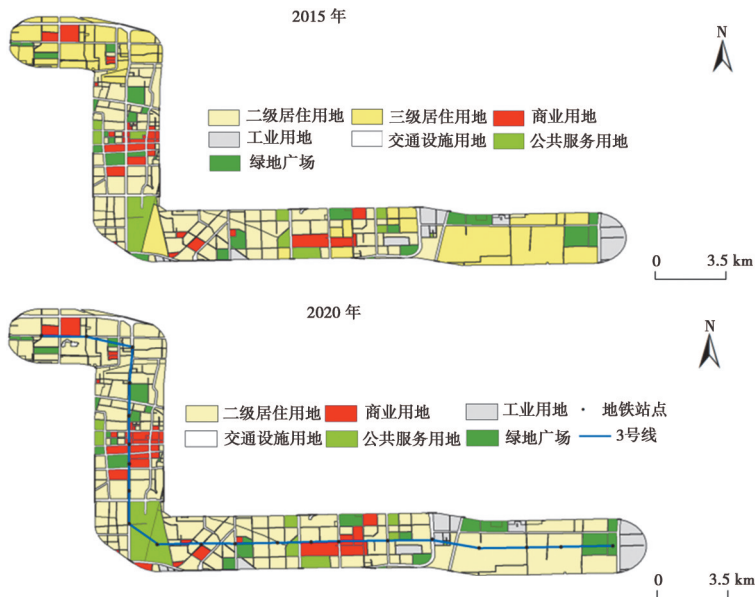


图 4 石家庄市地铁 3 号线 2010、2015、2020 年沿线土地利用分布图

Fig.4 Land Use Distribution Map of Shijiazhuang City Metro Line 3 in 2010,2015 and 2020

### 1.4 研究方法

#### 1.4.1 非线性机器学习模型

为探究不同土地利用类型对站点客流影响的复杂作用,通过机器学习 XGBoost 模型构建土地利用对站点客流的非线性影响.XGBoost 模型是一种基于梯度提升决策树的新型集成机器学习算法,具有相对良好的稳定性和适用性,因其快速且准确的优点而被广泛用于机器学习和数据挖掘<sup>[15]</sup>.该模型通过学习已有模型的残差来生成新的模型,从而使新的模型目标函数值最小化,并不断重复,最终将多个简单的模型组合成一个高度精确的模型<sup>[16]</sup>.具有  $K$  个加法函数的树集成模型公式为

$$\hat{y} = \phi(x_i) = \sum_{k=1}^k f_k(x_i), f_k \in F, \tag{1}$$

式中  $F$  是分类和回归树的空间,每个  $f_k$  对应 1 个独立的树结构.回归树与常规的决策树不同,回归树在每个节点上都包含 1 个连续的值,并通过叶子节点中的分数求和来计算最终预测值<sup>[17]</sup>.

按照叶子节点进行分组,分组归并到各个叶子节点上的样本之和,表达式为参数  $\omega$  的函数.进一步可以通过求导并令导数等于 0 来求  $\omega$  的极值点<sup>[18]</sup>,然后回代到公式中计算目标表达式的值,即

$$\hat{L}_{(\omega)} = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^T \frac{(\sum_{i \in I_j} g_i)^2}{\sum_{i \in I_j} h_i + \lambda} + \lambda T. \tag{2}$$

#### 1.4.2 SHAP 解释模型

不同土地利用类型对交通客流量的影响不同,当居住用地面积不断增加时,附近交通站点客流量会有明显的提升,但随着居住用地不断增加并达到一定程度后,客流量将会达到顶峰,出现“阈值现象”<sup>[19]</sup>.通过计算工作日和周末的 XGBoost 模型训练集,得到  $R^2$  分别为 0.814 和 0.837.尽管机器学习模型对研究非线性问题有很好的精度,但在模型解释方面仍存在不足<sup>[20]</sup>.因此引入 SHAP 解释模型来对机器学习模型结果进行分析<sup>[21]</sup>,在博弈论的基础上,SHAP 解释模型对每个解释因素分配了 1 个 SHAP 值,可以表达各影响因素的不同作用<sup>[22]</sup>.SHAP 值的计算公式如下:

$$\phi_i = \sum_{s \in N(i)} \frac{|s|! (N - |s| - 1)!}{N!} (f_{s \cup \{i\}}(X_{s \cup \{i\}}) - f_s(X_s)). \tag{3}$$

式中:  $\sum_{s \in N(i)} \frac{|s|! (N - |s| - 1)!}{N!}$  表示所有影响因素的加权平均值;  $N$  是客流量的影响因素值;  $f_{s \cup \{i\}}(X_{s \cup \{i\}})$  表示第  $i$  个影响因素的 SHAP 值.

1.4.3 K-means 聚类算法

为研究各个站点的客流量特征,利用石家庄市 55 个地铁站点 2021 年 7 月的地铁乘车刷卡数据,得到各个站点每小时进站和出站的客流量信息,计算所有轨道交通站点的每日进站和出站客流量与当日总客流量的比值,即 HF(hour factor)值,公式为

$$F_{in} = R_{in} / R_i \tag{4}$$

式中: $i$  代表轨道交通站点; $F_{in}$  表示  $i$  站点第  $n$  个小时的进站或出站 HF 值; $R_{in}$  表示  $i$  站点第  $n$  个小时的进站或出站人数; $R_i$  表示  $i$  站点的出站或进站总人数。

2 结果分析

2.1 轨道交通对土地利用变化的时空效应分析

2.1.1 时间效应

1) 轨道交通建设使土地利用变化率增大,商住用地集聚态势明显

土地利用变化率是指某一特定区域某种土地利用类型在一定时间段内的面积变化率.土地利用变化率为正值,表示这段时间内该土地利用类型的面积比原面积有所增加;反之则减少<sup>[23]</sup>.利用遥感解译数据计算石家庄市地铁线路 1 km 缓冲区内 2 个阶段的土地利用变化率,以反映轨道交通在建设和运营不同时期对土地利用的差异性影响<sup>[24]</sup>.可以看到,石家庄市 3 条地铁线路及其缓冲区,无论是在建设时期,还是运营时期,除工业用地外,其他各类用地的土地利用变化率均为正值,说明从地铁开工建设之初就呈现工业用地减少、其他用地增加的变化态势;地铁正式运营后这种变化更加明显,其中交通设施用地、居住用地和商业用地增幅最大(见表 3).

表 3 石家庄市地铁线路 1 km 缓冲区内各阶段土地利用变化率情况

Tab.3 Land Use Change Rate at Each Stage Within the 1 km Buffer Zone of Shijiazhuang Metro Line %

阶段	土地利用类型	1 号线	2 号线	3 号线
建设时期	居住	7.2	6.8	7.7
	商业	6.8	7.3	5.1
	工业	-9.2	-3.7	-4.9
	交通设施	4.7	6.4	3.7
	公共服务	5.8	6.9	2.8
	绿地广场	6.7	7.8	4.6
运营时期	居住	10.8	7.7	8.1
	商业	8.9	10.2	7.6
	工业	-12.7	-5.5	-7.4
	交通设施	8.9	10.6	11.7
	公共服务	8.2	7.4	4.5
	绿地广场	5.8	8.1	5.3

工业用地与其他用地的此消彼长,反映了轨道交通对沿线土地利用方式、土地价值及产业布局的多重影响.发达的交通系统有助于社会各种资源的有效调用,促使城市发展保持旺盛的活力,同时也伴随着地铁沿线土地价值的抬升,对工业区的集聚造成较大的冲击.工业集聚区需要统筹原料、运输、市场等多方面因素,因此通常选址于综合地价相对较低的城市郊区.而商业用地、住宅用地等更依赖交通便利性,因此会沿城市轨道交通系统布局.地铁运营时期土地利用变化率高于地铁建设时期的主要原因:地铁建设时期存在一定的不确定因素,同时地铁建设会出现封路、噪声、大气污染等情况,各类用地面积相对呈现小幅变化;地铁运营时期,工业用地外迁趋势未减,交通运输通达度的提升必然引起交通用地的快速增长,地铁带来的大量人

流与便捷出行,配合城市配套设施的完善,有效促进人口集聚,形成居住与商业功能区,从而提高居住用地和商业用地的增长。

## 2) 地铁线路周边区域土地开发利用呈现由中低强度向高强度转换的趋势

地铁建设可极大增强沿线周边土地的开发强度.以住宅小区为例,利用 Python 从安居客网上获取石家庄市住宅小区数据,包括坐标、竣工年份、容积率等相关属性信息.通过数据处理,得出石家庄市 2000 年以来竣工的地铁周边住宅小区平均容积率以及全市住宅小区平均容积率情况(见图 5).可以看出,2010 年以前石家庄市地铁线周边小区平均容积率与全市平均容积率相差不大;2011 年石家庄地铁建设获得国务院批准后,地铁线周边小区平均容积率迅速提升;2012 年地铁 1 号线一期工程开工兴建,地铁线周边小区平均容积率猛增至峰值 4.8,显著高于全市平均容积率(3.3);2016 年地铁 2 号线和 3 号线动工建设,当年地铁周边小区的平均容积率达到全市平均容积率的 1.5 倍,远远超出全市平均水平;此后地铁站点周边小区平均容积率增幅减缓或略有下降,但仍远高于全市平均水平。

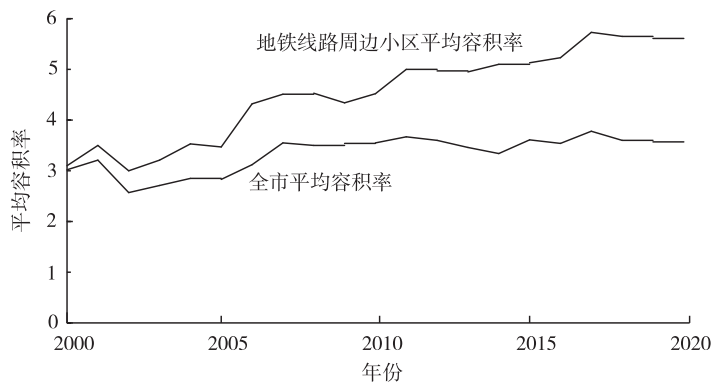


图 5 石家庄市竣工小区平均容积率

Fig.5 Average Plot Ratio of Completed Residential Districts in Shijiazhuang City

城市轨道交通的建设和发展,有助于提升资源配置与运行效率,使在人口密集区域建设高密度建筑成为可能.地铁开通显著提高了站点周边区域的交通可达性,带动了土地价值的提升,促使沿线土地利用类型由中低层开发向高密度住宅和商业用地转变,进而提高土地利用效率、减少土地资源浪费。

### 2.1.2 空间效应

#### 1) 轨道交通对郊区土地利用变化影响显著

将石家庄市地铁各站点 2010—2020 年 6 类城市用地面积变化率的绝对值求和,得到各站点土地利用综合变化率(见表 4);将各类用地在所有站点面积变化率的绝对值求和,得到各类城市用地综合变化率(见表 5)。

由表 4 可以看出,3 条地铁线路两端的土地利用变化率与线路中段的土地利用变化率差异显著,线路两端(多位于郊区)明显高于中段(城市中心).由表 5 可知,整个地铁沿线,商业用地和二级居住用地呈快速增长趋势,平均增长率分别为 22.1% 和 74.3%,而三级居住用地和工业用地呈减少趋势,分别减少 88.2% 和 68.9%。

城市中心区域开发利用时间较长,基础设施较为成熟,缺乏土地利用空间;同时,可搬迁的工业用地和可用来改造的三级居住用地已不多见.市区内除了老火车站由交通设施用地转变为公共服务用地外,再无较大面积的土地利用变化.因此,轨道交通中间段土地利用变化率相对较低.而对线路两端的郊区而言,轨道交通的开通大大提高了城市边缘地区的交通可达性,相对缩短了郊区到城市中心的物理距离,利于“城中村改造”的推进,工业用地的迁出也大多发生在线路两端区域,迁入地则在城市更边缘地区.因此,线路两端三级居住用地和工业用地不断减少,二级居住用地和商业用地明显增加。

#### 2) 发生用地类型改变的站点大多远离城市中心

轨道交通从建设到开通运营,沿线及周边的土地利用类型会发生变化<sup>[25]</sup>,交通站点(尤其是换乘站点)对土地利用类型变化的影响尤为显著.通过站点周围 1 km 缓冲区内的遥感解译影像,能够准确识别土地利用类型发生变化的站点(见表 6)。

表 4 2010—2020 年石家庄市各地铁站点 1 km 缓冲区内土地利用变化率

Tab.4 Land Use Change Rate in 1 km Buffer Zone of Each Subway Station in Shijiazhuang City from 2010 to 2020

1 号线(由西向东)		2 号线(由北向南)		3 号线(由西向东)	
地铁站	变化率/%	地铁站	变化率/%	地铁站	变化率/%
西王	48.9	柳辛庄	50.1	西三庄	46.8
时光街	40.1	庄窠·铁道大学	37.9	高柱	52.4
长城桥	36.7	义堂	42.5	柏林庄	57.4
和平医院	37.8	建和桥	35.8	市庄	44.2
烈士陵园	12.8	长安公园	24.5	市二中	33.4
新百广场	9.4	裕华路	19.8	东里	24.5
解放广场	27.4	槐中路	20.7	槐安桥	18.7
平安大街	17.4	欧韵公园	15.4	西三教	27.5
北国商城	8.5	元村	47.9	汇通路	47.9
博物馆	10.7	石家庄站	62.5	孙村	42.5
体育场	13.5	塔坛	52.7	塔冢	35.6
北宋	24.5	仓丰路留村	58.8	东王	27.8
谈固	27.8	南位	39.9	南王	32.5
朝晖桥	36.8	嘉华路	42.1	位同	38.8
白佛	27.9	—	—	东二环南路	42.3
留村	31.5	—	—	西仰陵	51.7
火炬广场	25.4	—	—	中仰陵	49.6
石家庄东站	21.3	—	—	南豆	53.4
南村	23.7	—	—	太行南大街	44.5
洺河大道	36.7	—	—	—	—
西庄	27.8	—	—	—	—
东庄	30.2	—	—	—	—

表 5 2010—2020 年石家庄市地铁线路 1 km 缓冲区内各类土地利用变化率

Tab.5 Change Rates of Various Land Use Types in 1 km Buffer Zone of Shijiazhuang Metro Line from 2010 to 2020

土地利用类型	变化率/%
二级居住用地	74.3
三级居住用地	-88.2
商业用地	22.1
工业用地	-69.9
交通设施用地	25.4
公共服务用地	13.0
绿地广场用地	23.3

表 6 石家庄市土地利用类型发生改变的地铁站点

Tab.6 Metro Stations with Changed Land Use Types in Shijiazhuang City

站点名称	最终站点类型	变化过程	所处区域
塔坛	商业型	居住型—交通型—商业型	2号线路偏南端
元村	混合型	居住型—交通型—混合型	2号线路偏南端
谈固	商业型	居住型—交通型—商业型	1号线路偏东端
高柱	商业型	居住型—商业型	3号线路偏西端
位同	商业型	居住型—混合型—商业型	3号线路偏东端
柳辛庄	混合型	居住型—混合型	2号线路偏北端
西三庄	交通型	居住型—交通型	3号线路最西端
石家庄站	混合型	交通型—混合型	2号线路偏南端、3号线路中心

由表 6 可知,用地类型发生改变的站点大多远离城市中心,用地方式多由土地利用强度较低的居住型转变为利用强度较高的商业型或混合型,城市中心站点类型基本未发生变化。

## 2.2 城市土地利用对轨道交通站点客流的影响分析

### 2.2.1 站点划分

石家庄市地铁官方公布的早、晚高峰时间分别为 7:00~9:00、17:00~19:00,一般来说,地铁站点的高峰时段人流与上班和下班的时间相吻合,以各轨道交通站点早、晚高峰时段每小时进出站的 HF 值作为客流量时变特征的指标,基于客流时序特征利用 K-means 聚类算法对 55 个地铁站点开展分类研究,最终将所有站点划分为 5 种类型。通过统计轨道交通站点周边 1 km 缓冲区内各类 POI 的数量及占比,对站点所属类型进行进一步验证,各站点进出站 HF 值及分类结果见表 7。站点类型与城市主要土地利用类型的对应关系:工作型站点对应工业用地和商业用地,居住型站点对应住宅用地,公共服务型站点对应公共服务用地和绿地广场,工作混合型站点对应工业用地和公共服务用地,居住混合型站点对应居住用地和商业用地。

表 7 K-means 聚类结果及站点分类结果

Tab.7 K-means Clustering Results and Site Classification Results

站点类型	进站 HF 值		出站 HF 值		站点名称
	早高峰	晚高峰	早高峰	晚高峰	
工作型站点	0.14	0.61	0.57	0.22	东里、槐安桥、西三教、汇通路、位同、时光街、平安大街、北宋、洺河大道、裕华路、槐中路、嘉华路
居住型站点	0.49	0.17	0.11	0.59	高柱、西三庄、孙村、东二环南路、西仰陵、中仰陵、留村、南村、西庄、东庄、义堂、元村、塔谈、仓丰路留村、南位
公共服务型站点	0.13	0.47	0.31	0.32	石家庄站、和平医院、烈士陵园、解放广场、博物院、体育场、石家庄东站、长安公园
工作混合型站点	0.31	0.39	0.42	0.28	市庄、市二中、南王、南豆、长城桥、朝晖桥、白佛、火炬广场、新百广场、北国商城、柳辛庄、建和桥
居住混合型站点	0.45	0.24	0.18	0.26	柏林庄、塔冢、东王、太行南大街、西王、谈固、庄窠·铁道大学、欧韵公园

工作型站点:POI 数据以工业类型为主,工业用地占区域总面积的 38%;其次是商业用地,占 28%。站点周边的就业岗位多由工业和商业用地提供,如槐中路站点(见图 6),从进出站 HF 值看,出站(流入)在早高峰期间出现 HF 高峰,进站(流出)在晚高峰期间也出现 HF 高峰,与上班族进出站规律十分契合,所以此类站点属于工作型站点。

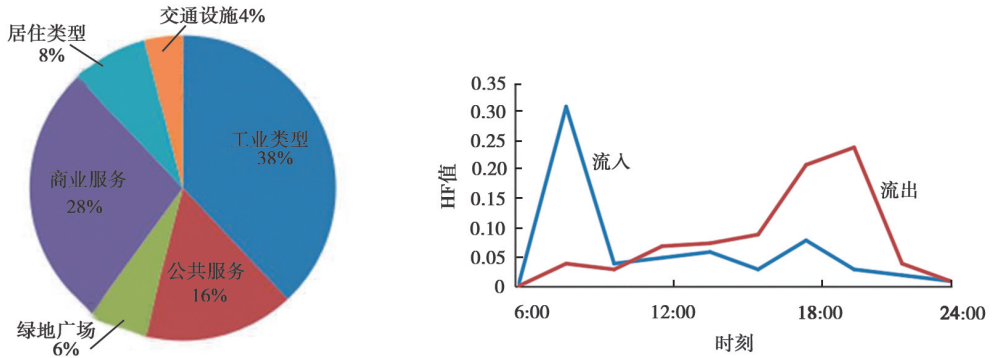


图 6 工作型站点 POI 数据和进出站 HF 值

Fig.6 The Number of POI and HF Value of Inbound and Outbound Stations at Work-oriented Station

居住型站点:POI 数据以居住类型为主,居住用地占比达到 42.80%。例如,从电子地图上,留村地铁站(见图 7)附近存在大量住宅小区,土地利用类型以居住用地为主,周边还拥有一系列商业服务、公共服务等配套设施,从进出站 HF 值看,进站(流出)在早高峰期间出现 HF 高峰,出站(流入)在晚高峰期间出现 HF 高峰,符合居民白天出门工作、晚上回家休息的出行规律,故将这类站点定义为居住型站点。

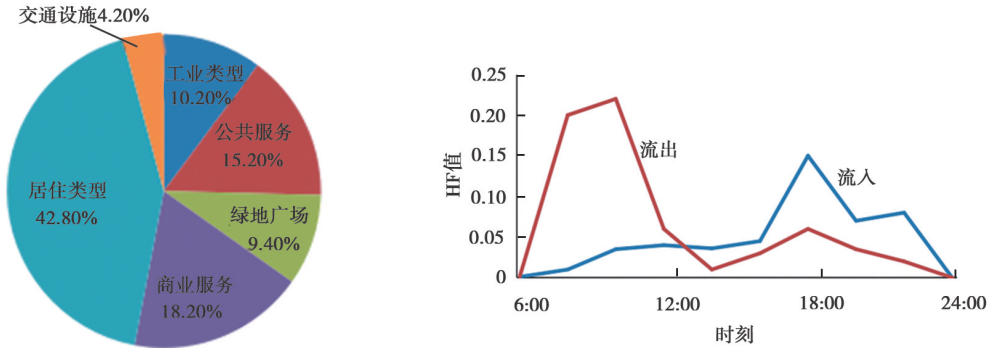


图 7 居住型站点 POI 数据和进出站 HF 值

Fig.7 The Number of POI and HF Value of Inbound and Outbound Stations at Residential Stations

公共服务型站点:POI 数据以公共服务和绿地广场类型为主,公共服务用地和绿地广场面积分别占区域总面积的 26%和 24%。此类型站点,如体育场、石家庄站、和平医院、长安公园等周边区域的土地利用具有明显的公共服务属性。以体育场站(见图 8)为例,从进出站 HF 值看,出站(流入)于 9:00 和 19:00 出现 HF 高峰,居民大多选择在这 2 个时间前后进入公共服务场所或绿地广场进行休闲娱乐活动;进站(流出)于 18:00 和 21:00 出现高峰,这是由于城市居民在这 2 个时间节点需回家吃饭或休息,符合公共服务型站点的客流量特征,所以将体育场站点定义为公共服务型站点。

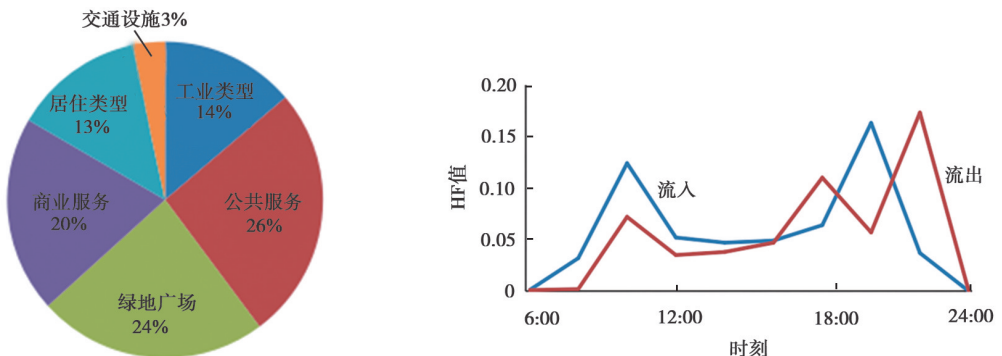


图 8 公共服务型站点 POI 数据和进出站 HF 值

Fig.8 The Number of POI and HF Value of Inbound and Outbound Stations at Public Service Stations

工作混合型站点:POI 数据以工业类型为主,占比为 30%;其他类型占比也较大.工作混合型站点与工作型站点相比,其差异主要体现为工业用地优势不突出.以南王站(见图 9)为例,从进出站 HF 值看,进出站在早高峰和晚高峰期间几乎同时出现 HF 高峰.出站(流入)在早高峰期间、进站(流出)在晚高峰期间出现 HF 高峰,表明站点具有工作型站点属性;而进站(流出)在早高峰期间、出站(流入)在晚高峰期间出现 HF 高峰,则表明站点同时具有居住和公共服务功能.因此,此类站点属于工作混合型站点.

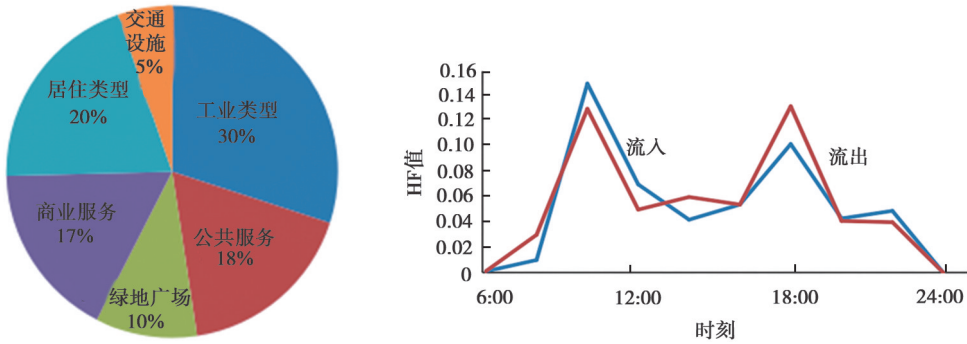


图 9 工作混合型站点 POI 数据和进出站 HF 值

Fig.9 The Number of POI and HF Value of Inbound and Outbound Stations at Working Hybrid Stations

居住混合型站点:POI 数据以居住类型占比较大,同时商业类型与公共服务类型也有一定占比.以谈固站(见图 10)为例,从进出站 HF 值看,进站(流出)在早高峰期间出现 HF 高峰,出站(流入)在晚高峰期间出现 HF 高峰,这符合居住型站点的特征.同时出站(流入)在 10:00 出现 1 个 HF 次高峰,符合受商业或公共服务吸引来此购物或娱乐的人群的出行特点;而进站(流出)在 18:00 出现的 HF 次高峰,反映的是从商业区或公共服务中心返家人群的出行规律.此类站点人口密集、出行活动频繁,为居住混合型站点.

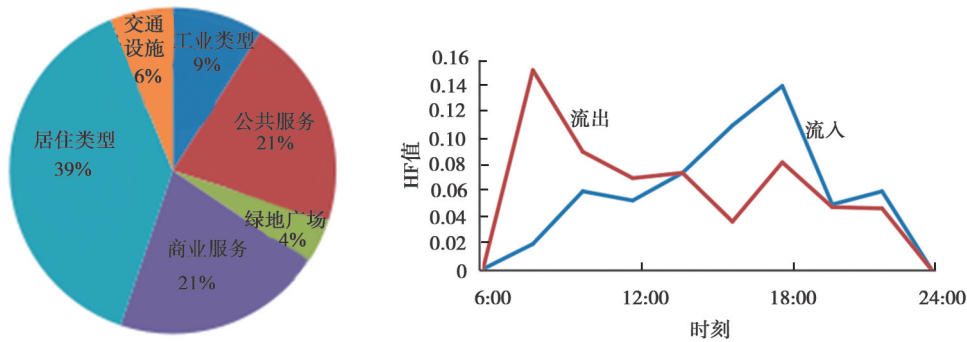


图 10 居住混合型站点 POI 数据和进出站 HF 值

Fig.10 The Number of POI and HF Value of Inbound and Outbound Stations at Mixed Residential Stations

综上可知,不同站点类型本质上反映了站点周边的城市土地利用类型.不同土地利用类型所承载人口的出行规律,直接影响站点各时段客流量与出行强度,这一特征在早、晚高峰时段表现尤为显著.通过获取与分析各站点周边区域的 POI 数据,可准确把握城市用地结构,进而为轨道交通主管部门制定合理的行车方案提供依据.

### 2.2.2 土地利用对轨道交通客流量影响的时序规律

土地利用对轨道交通站点客流量的影响存在工作日与周末差异.基于 XGBoost 机器学习模型,分析 5 类城市土地利用类型对站点客流量的影响,因交通设施用地与客流量具有高度一致性,故不再对其展开分析.利用 SHAP 解释模型分析 XGBoost 模型中的因子特征,结果如图 11 所示.

工作日与周末的 SHAP 图中(见图 11),特征值由上至下依次递减,特征值大小反映了各类土地利用类型对客流量的影响程度.图中每个点代表 1 个样本,影响程度越大,颜色越偏暖色调,反之则越偏冷色调;横坐标的正负表示该影响因素与客流量之间的正负相关关系.

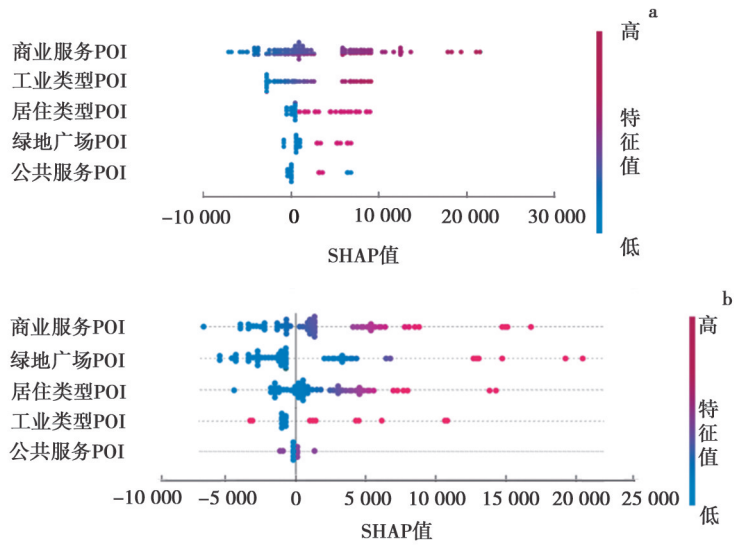


图 11 工作日(a)和周末(b)的 SHAP 图

Fig.11 SHAP Chart of Working Days(a) and Weekends(b)

在工作日,商业用地与客流量呈显著正相关,商业用地兼具购物、休闲、就业等多重功能,站点周边商业用地的开发建设能显著提升客流量.受通勤工作日上班需求的影响,工业用地对客流同样具有较强吸引力,大面积工业用地集聚通常会带来可观的客流量.

在周末,商业用地同样与客流量呈正相关,说明城市商业用地的分布对客流具有全天候的导向作用.绿地广场对客流量的影响程度位居第 2 位,站点周边绿地广场面积增加时,客流量显著增长,这主要是因为绿地广场是居民周末休闲游憩、修养身心的重要场所.

可见,无论是工作日还是周末,商业用地对客流量均具有显著影响.为应对商业中心集聚的大规模客流,可适当调整商业中心周边轨道交通的发车频次,以缓解出行压力.在周末时段,可适当增加到绿地广场周边站点的车次,进一步提升轨道交通运营效率.

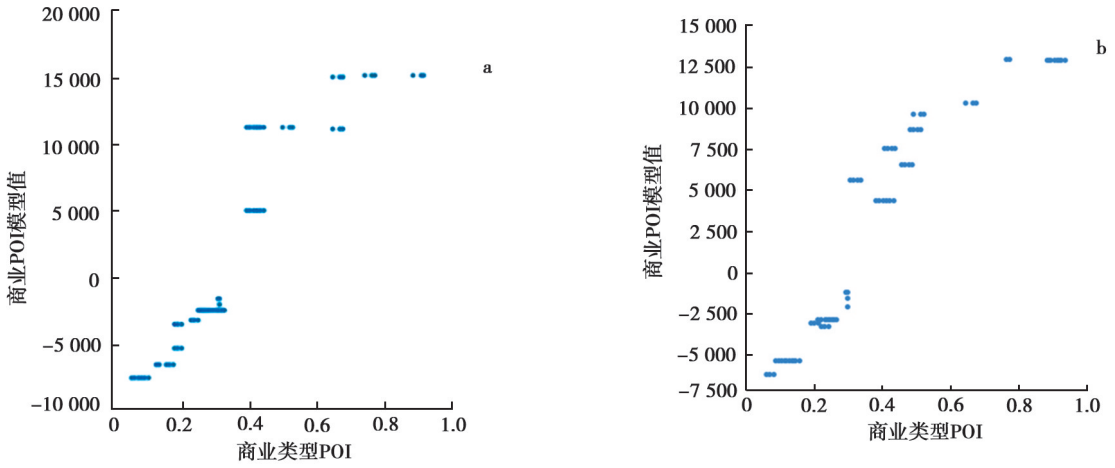
### 2.2.3 土地利用对轨道交通客流量的非线性特征及阈值效应

土地利用对轨道交通客流量影响表现出显著的非线性特征与阈值效应.利用 SHAP 解释模型分析单个要素的非线性特征与阈值效应,形成各种地类或要素的 SHAP 主要影响图(见图 12~17,图中横坐标对应的各类型用地的因子值表示某一用地的密集程度,纵坐标表示各类型用地所对应的站点客流).

商业用地与客流量呈非线性特征.当因子值 $<0.15$ 时,商业用地开发程度尚未完善,呈点状分布,商业点较为稀疏,商业贸易处于起步阶段,对客流量的影响较小.随着商业的不断发展,当 $0.15 < \text{因子值} < 0.75$ 时,商业用地面积迅速扩大,用地逐步连片并形成集聚效应,进而发展成为城市核心区域,此时商业用地对客流的吸引作用显著增强.当因子值 $>0.75$ 时,商业发展较为成熟,商业开发趋于饱和,若继续增加商业用地,其对客流的吸引作用反而会减弱.

工业用地 SHAP 分析结果显示,工业用地面积的增加可为居民提供大量工作岗位,因而对客流具有一定的吸引力,但其吸引强度低于商业用地.从时间维度来看,工业用地在工作日对客流的吸引力显著高于周末,这与居民通勤作息规律相一致.

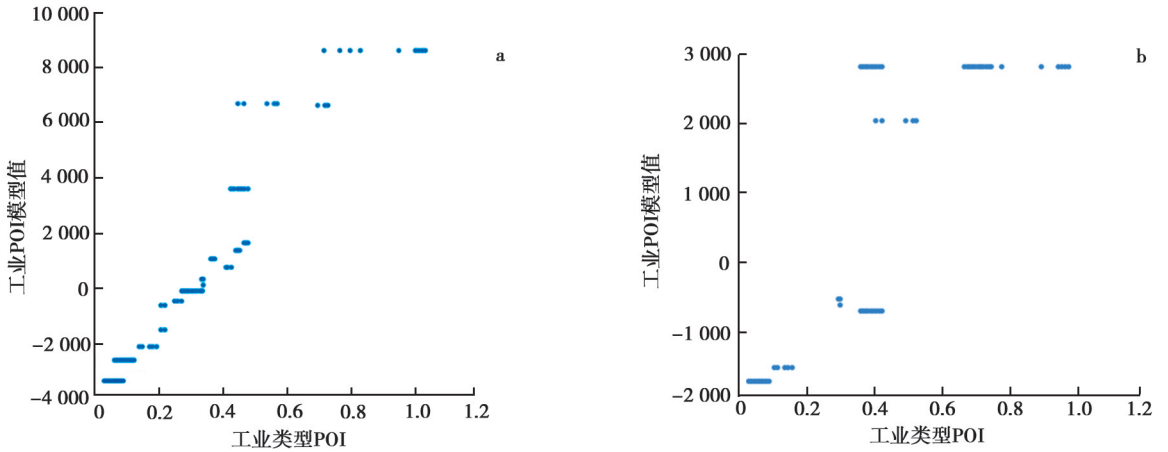
居住用地 SHAP 图分析结果显示,居住用地面积增加会带动人口集聚,进而出行需求相应提升,其增长过程呈一定的非线性特征.当因子值 $<0.3$ 时,居住用地较少,人口密度较低,现有道路可以满足居民出行需要,居民出行方式选择多样,居住用地对站点客流量的影响较小.当 $0.3 < \text{因子值} < 0.7$ 时,随着人口持续集聚,站点服务范围内居住型用地不断增加,对客流的吸引作用逐步增强.当因子值 $>0.7$ 时,站点周边居住用地规模进一步扩大,人口高度集聚易引发交通拥堵,站点运营压力显著上升,若未能及时优化交通设施,居住用地对客流量的提升作用将十分有限.



a、b.分别为工作日和周末 XGBoost 非线性模型回归结果.

图 12 商业用地 SHAP 主要影响图

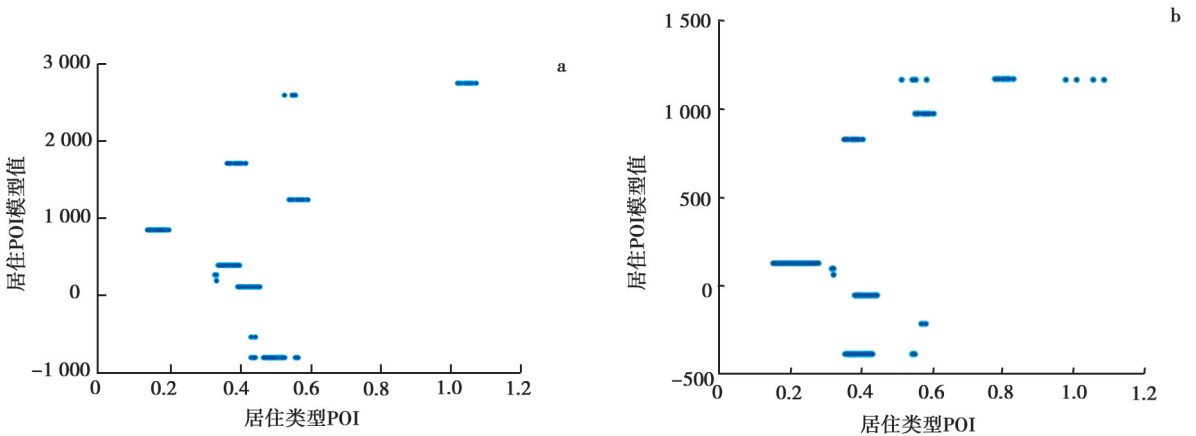
Fig.12 SHAP Main Impact Chart for Commercial Land Use



a、b.分别为工作日和周末 XGBoost 非线性模型回归结果.

图 13 工业用地 SHAP 主要影响图

Fig.13 SHAP Main Impact Chart for Industrial Land Use



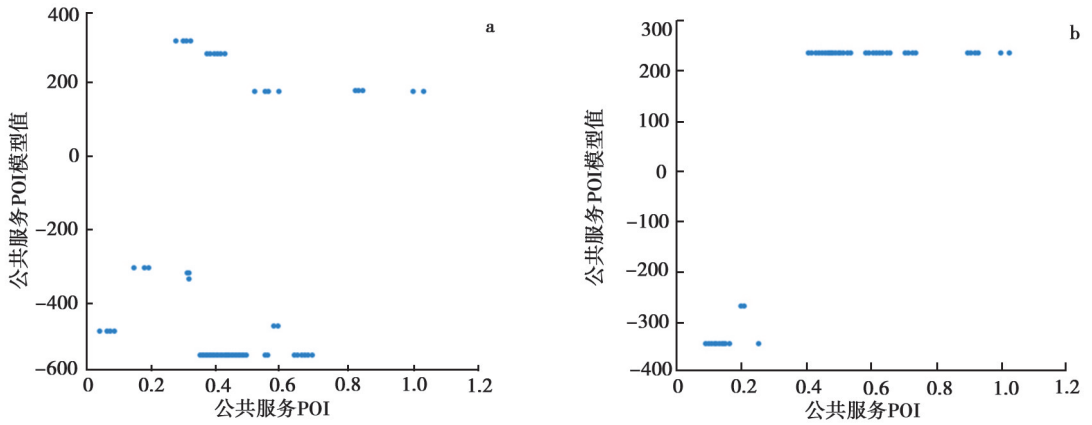
a、b.分别为工作日和周末 XGBoost 非线性模型回归结果.

图 14 居住用地 SHAP 主要影响图

Fig.14 SHAP Main Impact Chart for Residential Land Use

公共服务用地 SHAP 分析结果显示,公共服务用地与客流量在工作日呈负相关,周末呈正相关.这反映居民多在周末前往公共服务场所休闲游憩,而工作日因工作繁忙,休闲出行需求较低.

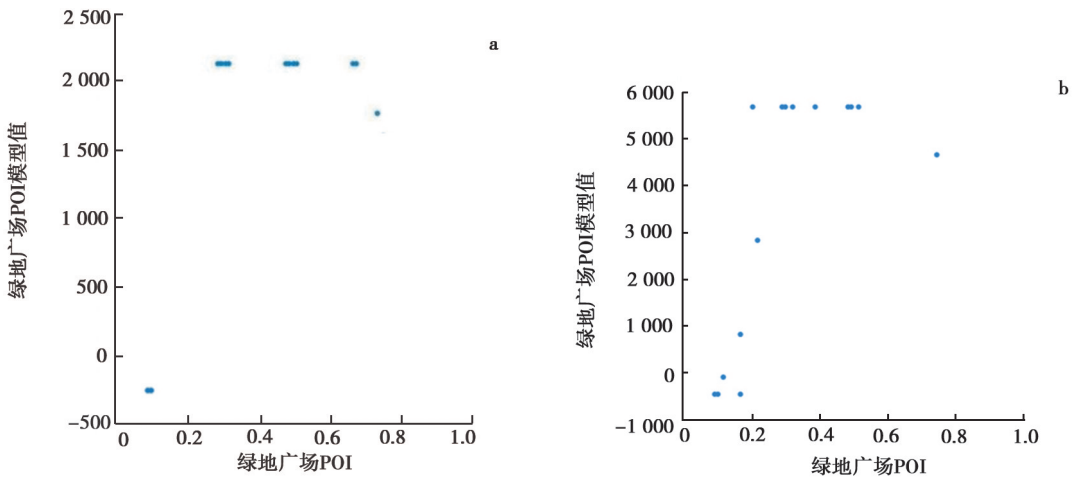
绿地广场 SHAP 分析结果显示,绿地广场对客流量增长具有显著的提升作用,且周末对客流量的提升作用强于工作日,这与居民的出行时间安排相一致.



a、b.分别为工作日和周末 XGBoost 非线性模型回归结果.

图 15 公共服务 SHAP 主要影响图

Fig.15 SHAP Main Impact Chart for Public Services



a、b.分别为工作日和周末 XGBoost 非线性模型回归结果.

图 16 绿地广场 SHAP 主要影响图

Fig.16 SHAP Main Impact Chart for Greenland Square

到中央商务区(CBD)距离是分析轨道交通与土地利用关系的重要参量.依据石家庄市城乡规划局发布的关于《石家庄市中央商务区(CBD)控制性详细规划》,设定解放广场为石家庄市中央商务区,采用各站点到解放广场(CBD)的距离作为分析变量.距离 CBD 越近,该因素对站点客流量的提升作用越显著.由图 17 可见,当到 CBD 的距离(DTC)为 0~1.5、1.5~4 km 时,其对客流量的影响相对稳定;当到 CBD 的距离超过 4 km 后,该因素对客流量的影响程度显著减弱.

### 3 结论与讨论

本文中,笔者采用非线性机器学习模型和 SHAP 解释模型,结合高分辨率遥感影像、石家庄市 POI 数据及轨道交通刷卡数据,从多维度分析了石家庄市轨道交通与土地利用的相互作用关系.

1) 利用 2010、2015、2020 年 3 期 Landsat TM 遥感影像解译数据,分析石家庄市地铁线路 1 km 缓冲区内轨道交通对土地利用变化的时间效应,从地铁建设至运营阶段,土地利用变化率呈逐渐上升趋势,线路周边土地开发利用由中低强度向高强度转换.

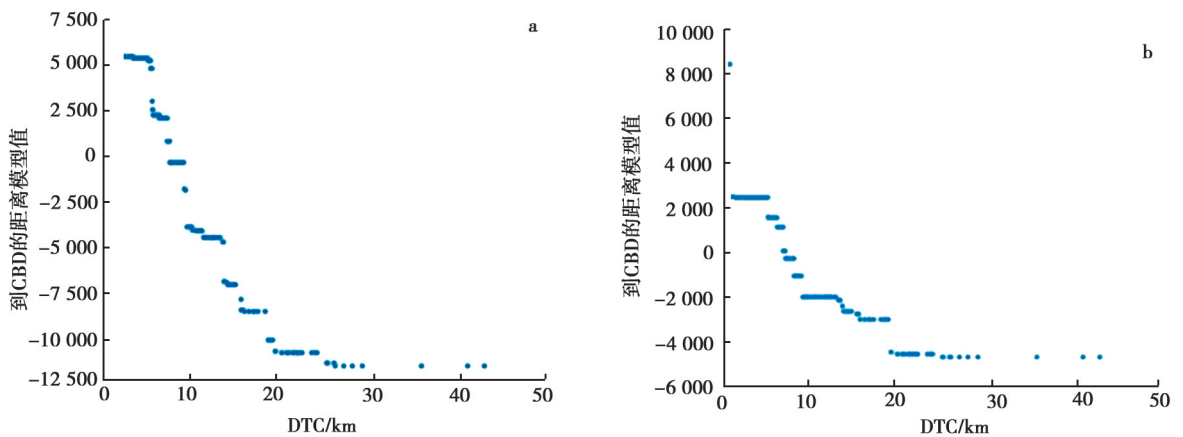
2) 轨道交通对城市土地利用的影响存在空间异质性,对线路两端的郊区土地利用变化影响显著,对建设成熟的市中心地区影响较弱,用地类型发生转变的站点多远离市中心。

3) 以各站点早、晚高峰进出站的 HF 值作为客流量时变特征指标,基于 K-means 聚类方法,从客流时序特征角度对 55 个地铁站点进行聚类,最终将站点划分为工作型、居住型、公共服务型、工作混合型和居住混合型 5 类,以间接表征相应的城市土地利用类型,不同土地利用类型所承载人群的出行规律,直接影响站点各时段客流量与出行率,这一特征在早、晚高峰时段表现尤为显著。

4) 采用 XGBoost 模型分析土地利用对轨道交通客流量影响的时序规律后发现,工作日和周末时段,商业用地均对客流量有显著影响;周末期间,绿地广场对客流的吸引作用同样显著。据此,可针对商业中心周边站点加密轨道交通发车频次,以疏解高峰人流;周末可适当增加绿地广场沿线站点的运力投放,从而提升轨道交通运营效率。

5) 土地利用对轨道交通客流量的影响呈现非线性特征与阈值效应,商业用地、居住用地对客流的吸引作用,响应最为显著的因子值分别为 0.15~0.75 和 0.3~0.7,到 CBD 的距离对客流的吸引作用主要集中在 0~4 km。

本文基于多元数据精细化解析了石家庄市轨道交通与土地利用的互动关系,可为地铁建设尚处于起步阶段的城市开展相关研究提供一定参考。但因历史 POI 数据获取难度较大,导致本研究在分析精度与研究范围上受限。未来研究应融合其他相关数据,从而更加全面地揭示石家庄市轨道交通与土地利用的互动机制。



a, b. 分别为工作日和周末 XGBoost 非线性模型回归结果。

图 17 到 CBD 的距离 SHAP 主要影响图

Fig.17 SHAP Main Effect Chart of Distance to CBD

## 参考文献:

- [1] 刘蓓佳,刘勇.基于 Hedonic 模型的城市轨道沿线房价特征分析[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(8):83-89.doi:10.13718/j.cnki.xdzk.2016.08.014  
LIU Peijia, LIU Yong. Exploring Housing Prices Around City Metro Line Based on Hedonic Model[J]. Journal of Southwest University(Natural Science), 2016, 38(8): 83-89.
- [2] PEZESHKNEJAD P, MONAJEM S, MOZAFARI H. Evaluating Sustainability and Land Use Integration of BRT Stations via Extended Node-place Model: An Application on BRT Stations of Tehran [J]. Journal of Transport Geography, 2020, 82: 102626.doi:10.1016/j.jtrangeo.2019.102626
- [3] 田恬,谷达华,牛德利,等.城市土地利用与城市交通协调关系评价:以重庆市主城区为例[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(7):96-104.doi:10.13718/j.cnki.xdzk.2019.07.014  
TIAN Tian, GU Dahua, NIU Deli, et al. Evaluation on Coordination Relationship Between Urban Land Use and Urban Traffic: A Case Study of Main Urban Area of Chongqing[J]. Journal of Southwest University(Natural Science), 2019, 41(7): 96-104.

- [4] 谭章智,李少英,黎夏,等.城市轨道交通对土地利用变化的时空效应[J].地理学报,2017,72(5):850-862. doi: 10.11821/dlxb201705007  
TAN Zhangzhi, LI Shaoying, LI Xia, et al. Spatio-temporal Effects of Urban Rail Transit on Land Use Change[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 850-862.
- [5] 陈少沛.城市轨道交通网络通达性度量与空间特征分析:以广州市为例[J].地理与地理信息科学,2013,29(3):118-122. doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2013.03.025  
CHEN Shaopei. Urban Rail Transit Network Accessibility Measure and Spatial Characteristics Analysis: A Case Study of Guangzhou[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(3): 118-122.
- [6] 王爱,张强,储金龙,等.轨道交通沿线不同区段土地利用的差异性测度[J].测绘科学,2021,46(9):190-198. doi:10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.09.028  
WANG Ai, ZHANG Qiang, CHU Jinlong, et al. Study on Difference Measurement of the Impact of Rail Transit on Land Use in Different Sections[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(9): 190-198.
- [7] 冯长春,李维瑄,赵蕃蕃.轨道交通对其沿线商品住宅价格的影响分析:以北京地铁5号线为例[J].地理学报,2011,66(8):1055-1062.  
FENG Changchun, LI Weixuan, ZHAO Fanfan. Influence of Rail Transit on Nearby Commodity Housing Prices: A Case Study of Beijing Subway Line Five[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(8): 1055-1062.
- [8] 韩寒,陈兴鹏,赵基伟.基于换乘速效度的北京轨道交通网络通达性研究[J].地理与地理信息科学,2019,35(1):64-68. doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2019.01.010  
HAN Han, CHEN Xingpeng, ZHAO Jiwei. Research on Accessibility of the Rail Transit Network in Beijing Based on Transfer Speed-efficiency[J]. Geography and Geo-Information Science, 2019, 35(1): 64-68.
- [9] 吴琳琳,李晓燕,毛德华,等.基于遥感和多源地理数据的城市土地利用分类[J].自然资源遥感,2022,34(1):127-134. doi: 10.6046/zrzyyg.2021061  
WU Linlin, LI Xiaoyan, MAO Dehua, et al. Urban Land Use Classification Based on Remote Sensing and Multi-source Geographic Data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 127-134.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50137—2011城市用地分类与规划建设用地标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for Classification of Urban Land Use and Planning Standards of Development Land[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [11] 徐勇,赵燊,段健.国土空间规划的土地利用分类方案研究[J].地理研究,2019,38(10):2388-2401. doi: 10.11821/dlyj020171111  
XU Yong, ZHAO Shen, DUAN Jian. Studies on the Land Use Classification Scheme for Territory Spatial Planning [J]. Geographical Research, 2019, 38(10): 2388-2401.
- [12] 彭诗尧,陈绍宽,许奇,等.基于POI的土地利用与轨道交通客流的空间特征[J].地理学报,2021,76(2):459-470. doi: 10.11821/dlxb202102015  
PENG Shiyao, CHEN Shaokuan, XU Qi, et al. Spatial Characteristics of Land Use Based on POI and Urban Rail Transit Passenger Flow[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(2): 459-470.
- [13] 张鹏,胡守庚,杨剩富,等.基于多源数据和集成学习的城市住宅地价分布模拟:以武汉市为例[J].地理科学进展,2021,40(10):1664-1677. doi:10.18306/dlkxjz.2021.10.005  
ZHANG Peng, HU Shougeng, YANG Shengfu, et al. Modeling Urban Residential Land Price Distribution Using Multi-source Data and Ensemble Learning: A Case of Wuhan City[J]. Progress in Geography, 2021, 40(10): 1664-1677.
- [14] 周春江,徐丽华.遥感影像镶嵌中拼接缝消除方法研究[J].西南大学学报(自然科学版),2010,32(9):136-140. doi:10.13718/j.cnki.xdzk.2010.09.032  
ZHOU Chunjiang, XU Lihua. Study on Seam-line Removal Under Mosaicking of Remote Sensing Images[J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2010, 32(9): 136-140.
- [15] 谷岩岩.大数据支持下的城市公共交通与土地利用互动研究[D].武汉:武汉大学,2020. doi: 10.27379/d.cnki.gwhdu.2020.000030  
GU Yanyan. Research on Interaction Between Urban Public Transportation and Land Use Using Big Data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.

- [16] 彭诗尧.基于土地利用的城市轨道交通客流时空特性分析[D].北京:北京交通大学,2020.doi:10.26944/d.cnki.gbfju.2020.003037  
PENG Shiyao.Spatial and Temporal Characteristics Analysis of Urban Rail Transit Passenger Flow Based on Land Use [D].Beijing:Beijing Jiaotong University,2020.
- [17] 胥海威,何宽.改进随机决策树群算法在监督分类中的应用[J].地理与地理信息科学,2010,26(6):38-40.  
XU Haiwei,HE Kuan.An Improved Random Decision Trees Algorithm with Application to Supervised Classification [J].Geography and Geo-Information Science,2010,26(6):38-40.
- [18] 王方民,骆畅,杨朝现,等.基于兴趣点密度与城市扩张曲线的城市建成区边界识别[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(12):115-126.doi:10.13718/j.cnki.xdzk.2021.12.014  
WANG Fangmin,LUO Chang,YANG Chaoxian,et al.Identifying the Boundary of Urban Built-up Area Based on Density of POI and Urban Expansion Curve[J].Journal of Southwest University(Natural Science),2021,43(12):115-126.
- [19] RATNER K A,GOETZ A R.The Reshaping of Land Use and Urban Form in Denver Through Transit-oriented Development[J].Cities,2013,30:31-46.
- [20] 王宇环,靳诚,杜家祺.基于 Space-P 复杂网络的南京市轨道交通换乘可达性研究[J].地理与地理信息科学,2020,36(1):87-92.doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2020.01.013  
WANG Yuhuan,JIN Cheng,DU Jiashen.Research on Accessibility of Nanjing Metro Based on Space-P Complex Network[J].Geography and Geo-Information Science,2020,36(1):87-92.
- [21] CERVERO R,MURAKAMI J,MILLER M.Direct Ridership Model of Bus Rapid Transit in Los Angeles County,California[J].Transportation Research Record,2010,2145(1):1-7.
- [22] ZHAO J,DENG W,SONG Y,et al.Analysis of Metro Ridership at Station Level and Station-to-station Level in Nanjing: An Approach Based on Direct Demand Models[J].Transportation,2014,41(1):133-155.
- [23] 何尹杰,吴大放,刘艳艳,等.城市轨道交通对土地利用变化的影响:以广州市 3、7 号线为例[J].经济地理,2021,41(6):171-179.doi:10.15957/j.cnki.jjdl.2021.06.019  
HE Yinjie,WU Dafang,LIU Yanyan,et al.The Influence of Urban Public Rail Transport on the Land Use Change:A Case Study of the Metro Line 3 and Line 7 in Guangzhou[J].Economic Geography,2021,41(6):171-179.
- [24] 高岩琰,张晓瑞,张奇智,等.基于 POI 大数据和可达性双重约束的城市空间结构研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(3):59-64.doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2021.03.009  
GAO Yanyan,ZHANG Xiaorui,ZHANG Qizhi,et al.Research on Urban Spatial Structure Based on Double Constraints of POI Big Data and Accessibility[J].Geography and Geo-Information Science,2021,37(3):59-64.
- [25] CASCHILI S,de MONTIS A.Accessibility and Complex Network Analysis of the US Commuting System[J].Cities,2013,30:4-17.

(责任编辑 柴 键)