

TOD建成环境对土地价值的非线性影响及其空间分布特征

——以北京市为例

李雯茜^{1,2}, 卞长志², 许奇³, 董天一⁴, 赵一新²

(1.北京交通大学交通运输学院,北京100044;2.中国城市规划设计研究院,北京100037;3.北京交通大学综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室,北京100044;4.北京交通大学自动化与智能学院,北京100044)

摘要:城市轨道交通带来的土地价值提升归因于交通邻近溢价、可达性提升溢价以及车站周边的建设溢价三方面,后两项对土地价值提升的影响研究尚不充分。融合多源城市大数据提出城市轨道交通TOD建成环境的“5D”变量及其计算方法,放松既有研究中房价与其影响因子的线性关系假设,采用基于机器学习模型XGBoost的特征价格非线性模型和局部解释方法SHAP,分析TOD建成环境对土地价值提升的非线性影响及其空间分布特征。针对北京市的案例研究表明:TOD建成环境变量对土地价值的影响程度达64.30%,其中公共交通可达性相对重要度达17.66%,较车站邻近性更重要;TOD建成环境对土地价值的影响存在明显的非线性关系和阈值效应。TOD建成环境的空间分布特征表明针对不同区域的车站用地开发应采取因地制宜的差异化发展策略,城市外围区域车站应注重资源聚集,中心城区车站应侧重出行品质和环境质量提升。

关键词:城市轨道交通;建成环境;土地价值提升;可达性;机器学习;阈值效应;北京市

The Nonlinear Impact and Spatial Characteristics of TOD Built Environment on Land Value: A Case Study of Beijing

LI Wenxi^{1,2}, BIAN Changzhi², XU Qi³, DONG Tianyi⁴, ZHAO Yixin²

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China; 3. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The improvement of land value brought by urban rail transit can be attributed to three aspects: the premium of adjacent transit stations, the premium of accessibility improvement, and the construction premium around the station. However, the research on the impact of the latter two factors on the improvement of land value remains insufficient. In response, integrating multi-source urban big data, this paper proposes the “5D” indicator system and its calculation methodology for the Transit-Oriented Development (TOD) built environment of urban rail transit. Relaxing the assumption of linear relationship between house price and its influencing factors in the existing research, the paper employs a nonlinear model for feature pricing based on the XGBoost machine learning algorithm and the local interpretation method SHAP to analyze the nonlinear impact of TOD built environment on the promotion of land value and its spatial distribution characteristics. Case studies in Beijing demonstrate that the TOD built environment around rail stations significantly influence the land value, accounting for 64.30%, and the relative importance of transit accessibility holds is 17.66%, which is more important than station proximity. The impact of TOD built environment on land value has obvious nonlinear relationship and threshold effect. The spatial distribution characteristics of TOD built environment indicate that station land development strategies should be tailored to specific regions, according to local conditions, the stations in the peripheral areas of cities should pay attention to the accumulation of resource, and the stations in the central urban area should focus on the improvement of travel quality and environmental quality.

Keywords: urban rail transit; built environment; land value uplift; accessibility; machine learning; threshold effect; Beijing

收稿日期:2024-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目“客货共运下城市轨道交通货运服务网络设计优化方法研究”(72471024)、工业和信息化部2022年产业技术基础公共服务平台项目“城市轨道交通装备信号系统检测及安全评估公共服务平台”(2022-233-225)

作者简介:李雯茜(1999—),女,四川眉山人,硕士,助理工程师,研究方向为交通规划、城市轨道交通,电子邮箱21120864@bjtu.edu.cn。

通信作者:许奇(1982—),男,云南普洱人,博士,副教授,研究方向为城市轨道交通规划,电子邮箱xuqi@bjtu.edu.cn。

0 引言

中国快速城镇化发展对城市轨道交通具有极大的刚性需求,但也面临建设资金短缺、运营入不敷出等难题。通常情况下,城市轨道交通的建设资金主要来源于政府财政拨款和低利率的商业贷款等投资手段。然而,随着城市轨道交通建设资金需求的激增,倘若缺乏其他多元化的投融资渠道,除了提高税收别无他法。此外,城市轨道交通在运营方面也普遍面临收支平衡问题,仅依靠票款收入无法维持财务可持续性,且可能导致出行者因票价提高或服务质量降低等原因变相分担运营成本,有失公平。

作为典型的公共产品,城市轨道交通具有显著的正外部性特征,集中体现在对沿线土地及物业的增值效应。但由于投资收益主体分离,使得作为主要投资方的城市轨道交通建设和运营企业较少从外部效益中获得收益。因此,充分利用外部性效益反哺城市轨道交通建设势在必行。针对这一趋势,人们开始研究多种多样、可持续的城市轨道交通投融资方式,其中包括一系列土地价值捕获工具,旨在有效地实现城市轨道交通投资所带来的土地价值提升。

以公共交通为导向的开发(Transit-Oriented Development, TOD)模式是城市轨道交通与城市融合发展的必然选择^[1],城市轨道交通与周边房地产开发可以良性互动,实现两者共赢。东京、伦敦、中国香港等世界级大都市积极发展城市轨道交通,促进其与城市融合发展,取得了举世瞩目的成功。中国等发展中国家也效仿TOD模式,城市轨道交通建设如火如荼^[2-4]。因此,有必要对TOD模式下城市轨道交通对土地价值的影响进行量化分析,从而为利用土地价值捕获等工具进行决策提供可靠依据。

根据城市土地经济学理论^[5-7],交通投资带来可达性的提升,进而降低通勤者的一般交通成本,在创造位置优势的同时促进车站周边土地和财产价值溢价。城市轨道交通带来的土地价值提升分为3部分:一是为获取出行服务而在空间上靠近城市轨道交通车站带来的交通邻近溢价;二是由出行成本降低产生的可达性提升带动配套设施发展,进而

提高周围土地价值;三是交通基础设施建设带来新的发展机会,进而导致车站周边的建设溢价。

交通方面,已有大量的理论研究和实践经验表明城市轨道交通的建设将被资本化为土地价值^[8-11],存在车站周边土地价值提升的邻近效应,且这种交通邻近溢价因研究情景不同而存在差异^[12-14]。同时,可达性作为TOD建成环境中的关键要素也是重点研究对象,邻近性和可达性共同构成了空间和时空上的多尺度公共交通邻近性。既有研究往往使用邻近性代为表示可达性^[11, 13, 15-17],但仅考虑空间邻近不足以重点体现交通与土地利用的互动能力,部分学者基于重力模型^[18]、空间句法^[19]进行改进,却并未考虑多种交通方式对可达性计算的影响。

针对TOD城市建设方面的相关研究相比于交通方面总体较少。建设溢价源于城市规划和交通规划对土地利用性质及开发的控制,例如将工业用地调整为住宅用地或提高开发强度。但在既有研究中,这种建设溢价通常表现为住房邻里环境要素的增值效应,而非聚焦于车站周边^[19-21]。聚焦TOD的研究多以“3D”原则(密度、设计、多样性)划分城市建设维度的建成环境变量,并得出TOD土地利用特征可能是影响城市轨道交通溢价效应的重要因素^[8, 16],如土地混合利用^[20, 22]、高密度开发^[20]、良好的步行环境^[16, 20, 23]可以导致土地溢价扩大。

国内外学者在城市轨道交通与土地价值领域已取得丰富的研究成果,但仍存在待完善与深化的方向。一方面,可达性对土地价值提升的作用机制值得进一步研究,城市轨道交通与建设溢价之间的内在联系源于出行成本降低驱动的可达性提升^[24],而这也是城市开发和更新的必要条件,其计算方法有待优化。另一方面,对于建设溢价的研究尚不充分,既有研究多假设TOD城市建设因素与土地价值为线性关系,其非线性影响及TOD建成环境空间分布特征仍需深入探索。

综上,本文聚焦以下2个问题开展研究:1)城市轨道交通的可用性(车站的邻近)和可达性对土地价值提升的影响哪个更显著;2)TOD建成环境尤其是城市建设因素对土地价值提升的影响及空间分布特征如何。

鉴于房价在反映土地价值方面的关键作用,本文使用房价作为研究对象。根据TOD建成环境的“5D”发展理念(密度、设计、多样性、邻近性、可达性)^[25],以北京市为例,融合多源城市大数据计算公共交通和私人小汽车的累计机会可达性及其他TOD建成环境变量,并与房价控制变量共同构成房价的影响因子。本文放松房价与其影响因子线性关系的假设,在特征价格非线性模型研究框架下,采用机器学习模型XGBoost(eXtreme Gradient Boosting)研究二者的定量关系,并采用局部解释方法SHAP(SHapley Additive exPlanation)分析影响因子的非线性关系,探讨TOD建成环境对土地价值的影响及其空间分布特征。

1 研究区域与数据说明

北京市由16个区组成,总面积16410 km²。2022年末,北京市常住人口2184.3万人,近80%的居民居住在六环内。为了满足不断增长的住房需求,房地产开发商向政府购买了大量土地的建设权。随着城市轨道交通系统不断完善,北京市经历了一次爆炸式增长的住房建设热潮,重塑了北京市的城市面貌。综合考虑城市布局及数据可获得性等因素,本文选取北京市六环以内为研究区域,采用的主要数据包括:

1) 二手房交易。

与主要分布在郊区的一手房相比,二手房交易涉及的房产种类更多,覆盖范围也更广。自2008年起,二手房已成为北京市住房交易的主角,2011—2017年交易比例甚至达到95%以上^[26]。因此,本文通过Python网络爬虫从链家网获得北京二手房交易的面板数据集(2011年1月—2016年3月),包括房龄、楼层、面积等结构特征,集计至小区层面,在时间上取平均形成截面数据,共包括5296个小区的274172笔交易。

2) 城市轨道交通系统。

选取2016年开通的18条地铁线路,总长度555 km。结合合理步行半径、住房城乡建设部2015年发布的《城市轨道交通沿线地区规划设计导则》以及“10分钟步行圈”,采用半径800 m的圆形区域作为地铁车站影响范围,即车站缓冲区。

3) 车站建成环境。

基于高德地图开放平台,获取地铁车站影响范围内兴趣点(Point of Interest, POI)数

据;通过百度地图、OpenStreetMap和Mapbox网站开源数据平台获取兴趣面(Area of Interest, AOI)、建筑物三维矢量、城市道路、等时圈等数据。上述数据的检索时间范围为2020年3月。人口数量来源于WorldPop网站2019年中国100 m×100 m栅格数据。共享单车数据来源于摩拜2017年5月10—18日工作日早晚高峰时段(7:00—9:00和17:00—19:00)订单数据。

4) 出行路径信息。

基于高德地图的出行路径规划服务,采用最短时间策略获取六环内任意两个1 km×1 km栅格中心之间分别通过私人小汽车和公共交通出行的全出行链信息。检索时间范围为2019年11月工作日早高峰时段(7:00—9:00),其信息包括起始/终点车站名称与经纬度、出行时间等,用于计算可达性。

2 建成环境变量及计算方法

城市轨道交通沿线的建成环境特征采用TOD的“5D”发展理念刻画。根据已获取数据,各维度建成环境变量及房价控制变量定义如表1所示。

其中,可达性采用累计机会计算,意为在一定时间中通过某种交通方式获得的所有机会数,其结果具有简单和可解释性高的优点。基于高德地图出行路径规划和POI数据,考虑多种交通方式的全出行链成本,并针对其中就业类POI单独计算就业可达性,可达性计算公式为

$$A_i^z = \sum O_j f(t_{ij}^z), \quad (1)$$

式中: A_i^z 为可达性,即起始点*i*在第*z*种交通方式下的累计机会/个; z 为交通方式, $z=1$ 为公共交通, $z=2$ 为私人小汽车; O_j 为第*j*个栅格的POI数量/个,POI类型包括就业、学校、医疗、购物、休闲娱乐和风景名胜6类(计算就业可达性时仅使用就业类型POI); t_{ij}^z 为路径规划下使用第*z*种交通方式从栅格*i*到*j*的出行时间/min,当 $t_{ij}^z \leq T$ 时, $f(t_{ij}^z)=1$,否则为0,其中*T*为北京市的平均通勤时间47 min。

为进一步探究公共交通可达性与私人小汽车可达性的差异对土地价值的影响,本文定义相对可达性和相对就业可达性两个变量,以体现两种交通方式在整体上和就业方面可达性的差异。

3 土地价值与TOD建成环境变量的分析模型

揭示土地和房地产市场中设施价值的有力工具，如估计城市轨道交通的溢价价值时，常默认其与影响因素呈线性关系。但TOD建成环境对土地价值的影响存在非线性特征，本文使用特征价格非线性模型作为研究框架估计房价，计算公式为

3.1 特征价格模型

特征价格模型旨在将房产特征集合用回归的计算方法估计房产的隐含价格，已成为

表1 TOD建成环境变量及房价控制变量描述性统计

Tab.1 Descriptive statistics of TOD built environment and housing price index

分类	变量	变量描述	平均值	标准差	
因变量	房价/(万元·m ²)	住房每平方米面积的售价	3.92	1.62	
邻近性	地铁车站邻近性/km	与最近地铁车站的直线距离	0.95	0.89	
	公共汽车站邻近性/m	与最近公共汽车站的直线距离	197.19	105.59	
密度	人口密度/(万人·km ²)	车站缓冲区内人口数量	1.98	0.62	
	就业岗位密度/(万个·km ²)	车站缓冲区内就业岗位数量	1.03	0.62	
	建筑密度/%	车站缓冲区内AOI上建筑占地面积之和与AOI面积之和的比值	21	6	
	容积率	车站缓冲区内平均建筑容积率	3.37	1.53	
	紧凑度	车站半径500 m范围建筑容积率与500~800 m范围建筑容积率的比值	1.05	0.41	
	多样性	土地利用混合度	$E_L = -\sum_i P_i \ln P_i / \ln(n),$ 式中： E_L 为车站土地利用混合度； P_i 为车站缓冲区内基于土地利用类型的第 <i>i</i> 种POI数量占全部类型POI数量的比例； n 为土地利用类型的数量 ¹⁾	0.48	0.04
经济行业混合度		$E_E = -\sum_j P_j \ln P_j / \ln(m),$ 式中： E_E 为车站经济行业混合度； P_j 为车站缓冲区内基于经济行业的第 <i>j</i> 种POI类型占全部类型POI数量的比例； m 为经济行业类型的数量 ²⁾	0.75	0.06	
非机动车指数		以车站为中心10 min步行等时圈与车站缓冲区面积的比值	0.42	0.13	
设计		可步行道路密度/(km·km ²)	车站缓冲区内可步行道路长度与车站缓冲区的比值	13.13	4.57
可达性	公共汽车站密度/(个·km ²)	车站缓冲区内公共汽车站数量与车站缓冲区的比值	5.80	2.36	
	骑行接驳比例/%	高峰时段车站半径200 m范围累计共享单车订单量占订单总量的比例	0.30	0.27	
	公共交通可达性/个	小区所在栅格(1 km×1 km)的公共交通可达性	19 414	12 477	
房价控制变量	相对可达性	小区的公共交通可达性与私人小汽车可达性之比	0.15	0.07	
	相对就业可达性	小区的公共交通就业可达性与私人小汽车就业可达性之比	0.25	0.12	
	结构	面积/m ²	住房面积	86.59	45.59
		卧室数/个	住房所包含卧室数	2.11	0.57
		客厅数/个	住房所包含客厅数	1.18	0.38
		朝向	朝南的住房=1，其他=0	0.78	0.26
		建筑层数/层	住房所在建筑的总楼层数	12.00	6.76
		楼层位置	位于总楼层2/3高度以下的住房=1，其他=0	0.62	0.19
税金	购买时支付较高交易税=1，其他=0	0.62	0.23		
房龄	自建造时起的年份	18.69	10.09		
区位	距城市重要中心距离/km	住房与最近城市重要中心的直线距离 ³⁾	5.21	3.25	
	交易量/次	同一小区的住房交易总量	60.63	94.07	
邻里	购物点	1 000 m内有商业设施=1，其他=0	0.82	0.39	
	学校	1 000 m内有重点中小学=1，其他=0	0.24	0.43	

1) n 为根据《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB 50137—2011)划分的POI类型的集合， $n=8$ ；2) m 的划分标准为《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)， $m=20$ ；3)城市重要中心包括区域中心(北京市中心天安门广场、副中心北京市人民政府)以及商务中心(CBD、中关村、金融街、上地、望京、亦庄、丰台科技园)。

$$Price=f(S, L, N, T, P, A), \quad (2)$$

式中： $Price$ 为房价/元； f 为非线性函数形式，影响因素包括房价研究常使用的结构因素 S 、区位因素 L 、邻里因素 N ，以及邻近性 T 、TOD城市建设因素 P 和可达性 A 。

3.2 非线性模型

机器学习模型 XGBoost 是基于梯度提升技术改进的集成树模型，其求解的核心是利用第 $d-1$ 轮决策树的残差值拟合第 d 轮基础决策树，并在达到迭代次数后计算所有决策树的结果，对各类数据的非线性特征具有良好的建模能力。因此，采用基于 XGBoost 的特征价格非线性模型研究 TOD 建成环境对房价的非线性影响，计算公式为

$$\hat{y}_x^{(d)} = \sum_{p=1}^d f_p(m_x) = \hat{y}_x^{(d-1)} + f_d(m_x), \quad (3)$$

式中： $\hat{y}_x^{(d)}$ 为第 d 轮迭代后样本 x 的房价预测值； p 为基模型数量/个； $f_p(m_x)$ 为第 p 棵决策树的模型； m_x 为表 1 确定的房价控制变量和 TOD 建成环境变量； $\hat{y}_x^{(d-1)}$ 为前 $d-1$ 棵决策树集合的房价预测值； $f_d(m_x)$ 为第 d 棵决策树的模型。

3.3 模型解释

3.3.1 SHAP 局部解释方法

本文使用局部解释方法 SHAP 对 XGBoost 模型进行解释。SHAP 借鉴了合作博弈论中的 Shapley 值，通过计算某特征对模型预测的边际贡献来解释特定实例的预测。相较于传统的重要度算法仅限于在整个种群中获得结果(如机器学习自带特征重要度排序等)，SHAP 能在每个单独的实例上获得结果，因此也能体现贡献的空间特征。Shapley 值计算方法为

$$\varphi_k(f) = \sum_{S \subseteq N \setminus \{k\}} \frac{|S|!(K-|S|-1)!}{|K|!} [f(S \cup \{k\}) - f(S)], \quad (4)$$

式中： $\varphi_k(f)$ 为特征 k 的 Shapley 值，反映特征 k 对单个预测的影响和总体预测的平均值； N 为训练集中所有特征的集合； $N \setminus \{k\}$ 为除 k 特征外所有特征的排列组合集合； S 为 $N \setminus \{k\}$ 其中的一个组合方式； K 为特征总数/个； $f(S \cup \{k\})$ 为含有特征 k 的预测值； $f(S)$ 为不含特征 k 的预测值。

SHAP 从 Shapley 值概念扩展，构建一个可加性(Additivity)的解释模型，将所有的特征都视为“贡献者”，计算得到的 SHAP 值

着重体现个体样本中每个特征对提升整个模型预测能力的贡献程度，即特征的重要性。SHAP 值若为正则表示对模型预测有正向贡献，反之亦然，可用于分析特征的重要性、影响方向和交互效应。

3.3.2 特征重要度

解释变量的重要度是机器学习模型最重要的解释工具，其值越大，相应的重要性越高。通过计算各特征对应的所有 SHAP 值的平均绝对值可得全局特征重要度，即一个特征对应一个全局特征重要度，从而为特征贡

表 2 解释变量的相对重要度排序

Tab.2 Relative importance ranking of explanatory variables

分类	变量	相对重要度/%	个体排序	相对重要度总和/%	平均值/%	类别排序	
TOD 建成环境变量	邻近性	地铁站邻近性	1.80	21	3.36	1.68	8
		公共汽车站邻近性	1.56	24			
	密度	人口密度	8.76	2	21.16	4.23	3
		就业密度	2.02	17			
		建筑密度	6.73	4			
		容积率	1.82	20			
		紧凑度	1.83	19			
	多样性	土地利用混合度	2.21	13	3.80	1.90	7
		经济行业混合度	1.59	23			
		非机动车交通指数	1.78	22			
设计	可步行道路密度	8.04	3	13.87	3.47	4	
	公共汽车站密度	1.23	27				
	骑行接驳比例	2.82	11				
可达性	公共交通可达性	17.66	1	22.11	7.37	1	
	相对可达性	1.34	25				
	相对就业可达性	3.11	10				
房价控制变量	结构	面积	3.48	9	21.91	2.74	5
		卧室数	1.94	18			
		客厅数	2.15	16			
		朝向	2.20	14			
		建筑层数	3.59	8			
		楼层位置	1.31	26			
		税金	2.16	15			
		房龄	5.08	6			
区位	距城市重要中心距离	6.72	5	9.48	4.74	2	
	交易量	2.75	12				
邻里	购物点	0.06	28	4.30	2.15	6	
	学校	4.24	7				

献排序。计算方法为

$$I_k = \sum_{x=1}^M |\varphi_k^{(x)}| / M, \quad (5)$$

式中： I_k 为特征 k 的全局重要度； M 为样本数量/个； $\varphi_k^{(x)}$ 为单个样本 x 中特征 k 的 SHAP 值。

3.3.3 SHAP 部分依赖图

SHAP 部分依赖图(SHAP Partial dependence plot)是解读机器学习模型预测结果的一个重要工具, 通过 SHAP 值散点图的方式直观反映因变量与解释变量之间的关系, 结合了部分依赖图的直观性和 SHAP 值的解释性。本文使用 SHAP 部分依赖图揭示 TOD 建成环境对土地价值影响的局部模式。

4 结果分析

以北京市为案例, 利用 Python 语言的 XGBoost 工具箱实现回归梯度提升树集合模型的求解, 数据集分为训练集(70%)和测试集(30%), 超参数最优组合采用网格搜索法和五折交叉验证计算, 最终模型包含 800 棵

最大深度为 5 的决策树, 学习率为 0.1, 解释能力达 84.2%。

4.1 解释变量相对重要度

通过公式(5)计算各特征的全局特征重要度, 将其归一化后形成相对重要度(单位%), 总和为 100%, 并将各分类下变量的相对重要度取平均值进行排序, 结果如表 2 所示。排序结果表明: TOD 建成环境变量对土地价值的影响程度达 64.30%, 最重要的变量是可达性, 其他要素依次为密度、设计、多样性。其中, 公共交通可达性相对重要度排序第一, 达 17.66%, 其次是人口密度和可步行道路密度, 分别是 8.76% 和 8.04%, 再次是建筑密度 6.73%。此外, 地铁站邻近性相对重要度(1.80%)远小于可达性, 说明土地价值的提升需要可达性的提高而非仅邻近交通设施, 相对于“最后一公里”问题, 利用公共交通获取服务的能力更加重要, 即获得服务设施、商业中心、工作地点等各类机会的便捷程度更重要。相对就业可达性的相对重要度排名第 10, 说明通勤时公共交通与私人小汽车的竞争力也是影响土地价值较为重要的变量。骑行接驳比例排名第 11, 表明“城市轨道交通+共享骑行”模式在城市交通中的作用显著, 但影响力有限, 仅能作为其他重要影响因素的补充。

此外, 不同区位各变量对土地价值的影响程度排序也不同。分行政区列出重要度排名前 5 的变量(见图 1), 可以看出: 人口密度在大兴区、房山区、昌平区、通州区和顺义区均位列前二, 而在东城区、西城区和朝阳区影响力不高, 显示出郊区地铁站的人口聚集相对于中心城区对提升土地价值的作用更显著; 东城区、西城区、朝阳区的站点周边开发强度对土地价值的影响较大, 丰台区、海淀区、昌平区和通州区则需特别关注车站非机动车交通环境的优化。

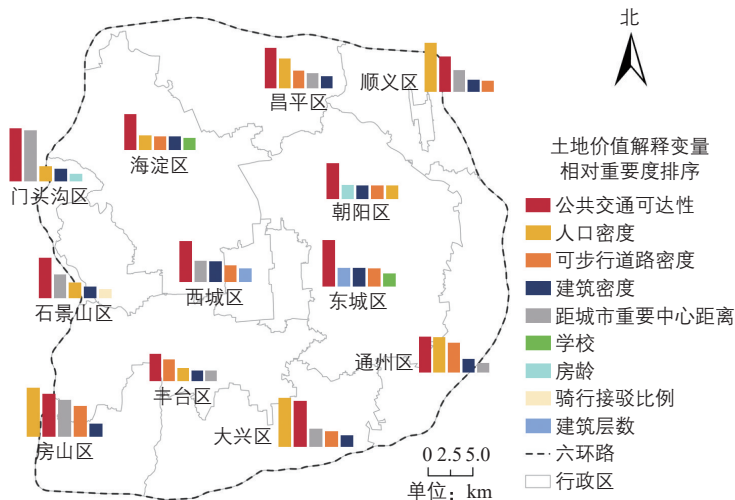


图1 北京市各区域土地价值解释变量相对重要度前五名
Fig.1 Top five relative importance of land value explanatory variables in various regions of Beijing

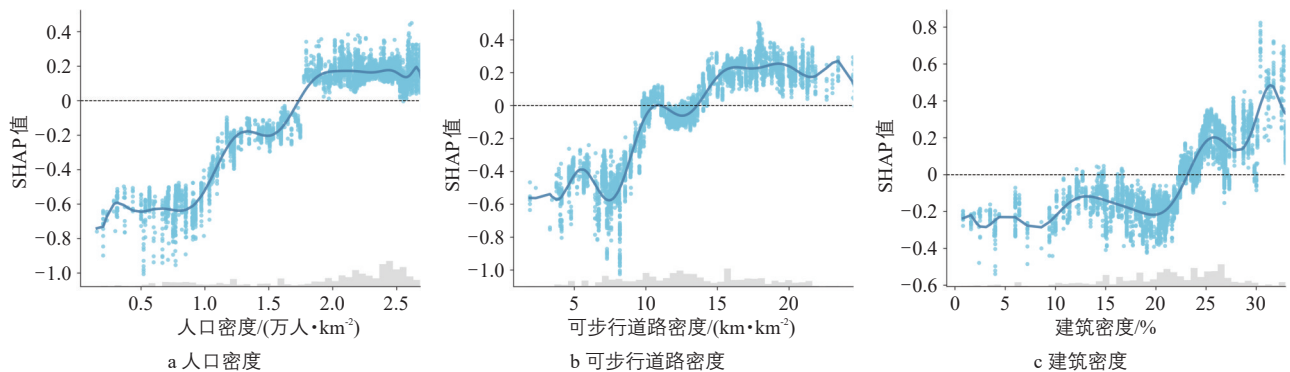


图2 TOD城市建设维度变量SHAP部分依赖图
Fig.2 SHAP partial dependence graph of TOD urban construction dimensions variables

4.2 非线性阈值效应及空间分布特征

4.2.1 TOD城市建设

选取TOD城市建设维度排名靠前的3个代表性变量进行具体分析：人口密度、可步行道路密度、建筑密度，分别排名第3(8.76%)，4(8.04%)和5(6.73%)，属于密度和设计分类。图2展示了3个变量的SHAP部分依赖图，蓝色散点为SHAP值，深蓝色实线为多项式拟合曲线，灰色柱状图为样本频数的数值分布。可以看出，TOD城市建设维度3个变量与土地价值存在显著的非线性关系和阈值效应。

图2a和图2b曲线变化大致分为3个阶段：前期呈阶梯式稳步攀升，后期均趋于稳定，变量值分别达到约1.9万人·km²和16 km·km²的阈值后基本不对土地价值产生影响。结果说明TOD建成环境影响土地价值提升存在上下限值，土地发展前期需要以人的聚集为支撑，车站周边适度的人口聚集使得土地价值提升，但超过阈值后增值效果大幅下降。

图2c中前期在建筑密度小于20%时SHAP值增加非常缓慢，达到约23%后SHAP值为正且上升幅度显著加大，因为该值以上的车站区域开发已达到一定程度，多功能建筑形成，有利于地铁车站周边聚集客流和便利生产活动，进而促进周边土地价值提升。

TOD建成环境对土地价值的影响可能因位置而异，因此进一步将上述变量SHAP值映射到空间进行可视化对比分析(见图3)。

图3a中，城市中心区域的人口密度对土地价值具有明显的正向推动作用，但其分布较为分散，一定程度反映了北京的多中心发展格局。图3b显示北部比南部地铁车站周边可步行配套设施更为完善，尤其是海淀区东南部，而城市外围区域普遍欠佳，清河、丰台科技园和木樨园应着重加强步行衔接设计。图3c体现出通州区区域因低建筑密度导致对土地价值的抑制，需关注地铁1号线与八通线沿线的建筑开发；而朝阳区北部和南部的SHAP低值则因为中密度开发的车站无法满足该区域居民的生活需求和商业活动。

因此，城市外围区域需特别注重资源向车站聚集，以提高车站周边用地活力，中心城区车站则应关心步行品质和环境质量提升。

4.2.2 邻近性和可达性维度

作为表征TOD交通方面的重要特征，

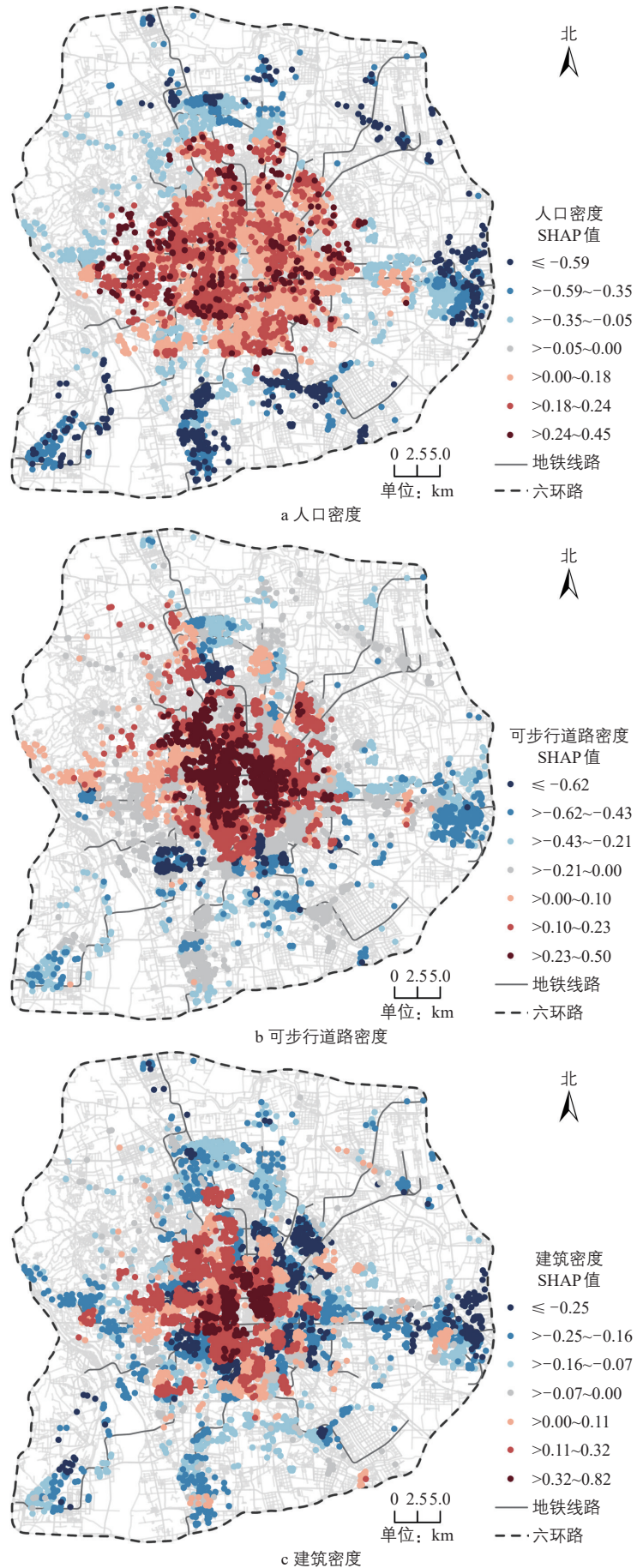


图3 TOD城市建设维度变量SHAP值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of SHAP value of TOD urban construction dimensions variables

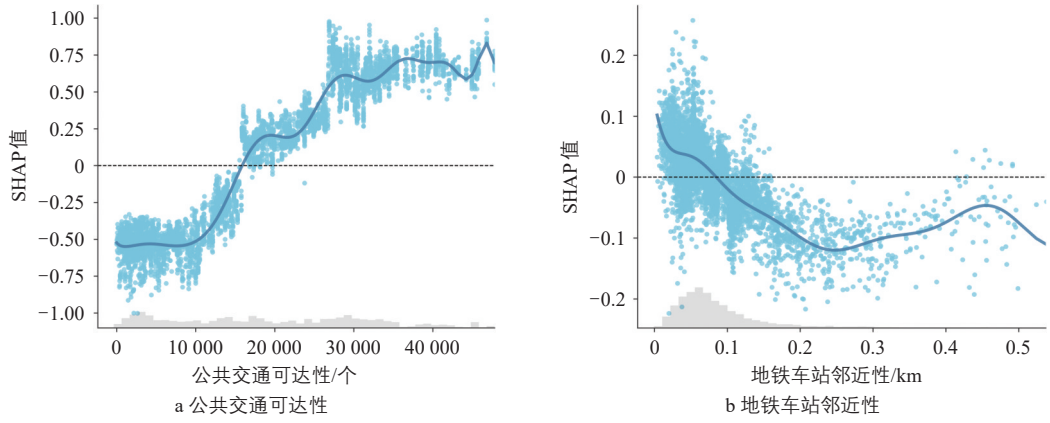


图4 可达性与邻近性变量SHAP局部依赖图

Fig.4 SHAP partial dependence graph of accessibility and proximity variables

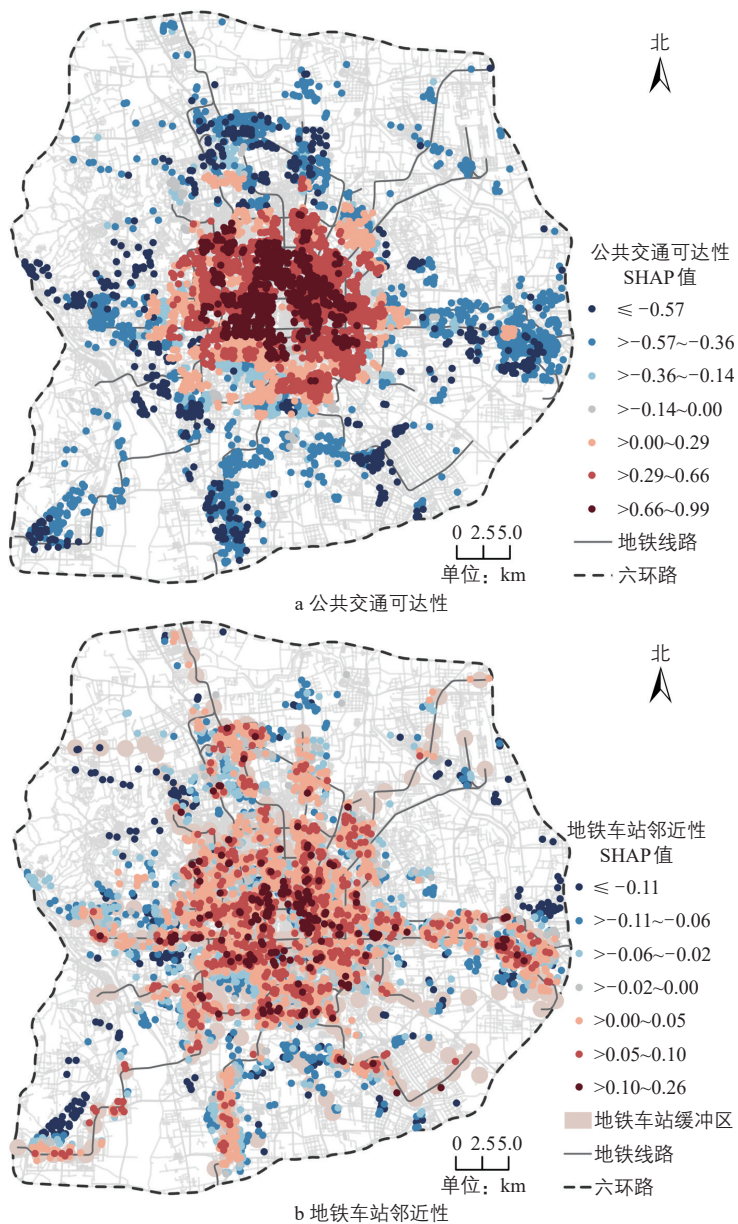


图5 可达性与邻近性变量SHAP值空间分布

Fig.5 Spatial distribution of SHAP values of accessibility and proximity variables

便程度和优劣程度，在城市发展和土地市场中发挥了重要作用。

公共交通可达性相对重要度排名第1 (17.66%)，其SHAP部分依赖图见图4a，公共交通可达性分别在约10 000个和30 000个附近有显著的阈值效应，该趋势说明公共交通可达性提高对土地价值产生正向影响，且存在上下限，约大于15 000个后产生正影响，且最终对房价的正影响趋于稳定。

车站邻近性于空间上体现为公共交通服务的可用性，地铁车站邻近性的相对重要度排名第21(1.80%)。图4b显示其在样本聚集区间0~0.2 km内与土地价值呈现显著负相关关系，若超过约800 m，则对土地价值提升产生负影响，说明800 m以内是发挥邻近地铁车站优势的最佳距离。

分析可达性与邻近性变量SHAP值空间分布(见图5)可以看出，公共交通可达性SHAP值整体呈现城市中心为正、城市外围为负的递减趋势，与特征值分布相似。具体而言，公共交通可达性优势以及对土地价值的促进作用以环状向市中心递增，而城市外围区域尤其是石景山、大兴、通州西侧的公共交通可达性亟须加强。地铁车站邻近性的SHAP正值主要聚集在地铁沿线，但市中心地铁车站高度集中的区域出现了SHAP负值，说明在此区域多种交通方式并存，除地铁外也有众多其他交通方式选择，或受地铁有噪声、拥挤等其他负面因素影响。

由以上结果可知，可达性与邻近性对土地价值的影响程度差异显著，可达性更为重要。这表明在全出行链中，相对于“最后一公里”，人们更注重“点到点”的综合出行路径，即获得服务设施、商业中心和工作地点等各类机会的便捷性更为重要。

此外，结果也表明地铁车站交通设施与

邻近性和可达性构成了空间和时空上的多尺度公共交通邻近性，对应公共交通的可用性和可达性，分别体现获得公共交通服务的方

城市建设的衔接互动在TOD建成环境对土地价值的影响中承担了重要的角色。可达性综合考虑了出行时耗和成本等因素，主要关注公共交通全出行链的便利性，但更重要的是，它一定程度上衡量了公共交通与土地利用规划有机结合的程度，强调了如地铁站、公共汽车站、自行车停车点以及与步行路径之间的相互衔接。相较于更多强调靠近公共交通设施的车站邻近性，可达性的重要性体现在它更全面地考虑了人们的出行需求和综合交通网络。

因此，应将可达性作为判断公共交通便利的主要因素，而非仅考虑车站邻近性。同时，在城市发展中应注重交通和土地利用规划的紧密结合，在综合考虑这两方面因素的基础上寻求平衡，使整个出行路径更加便捷，提高城市居民的出行效率和生活质量。

5 结论

本文构建了基于机器学习模型XGBoost的特征价格非线性模型，并采用局部解释分析方法SHAP，揭示了TOD建成环境对土地价值的非线性影响及其空间分布特征。结果表明：

1) 地铁站TOD建成环境对土地价值的非线性影响显著，影响程度达64.30%，其中关键因素是公共交通可达性，相对重要度达17.66%。TOD中交通和城市建设维度均是影响土地价值非常重要的因素，可达性的高重要性表明城市发展更新的重点方向应关注交通与土地利用规划的有机结合。

2) TOD城市建设维度中密度和设计分类变量相对重要度较高，需重视车站周边用地开发及步行、骑行等交通衔接方式，相对重要度排序高的变量与土地价值具有显著的非线性关系和阈值效应，产生正向影响。各变量的影响阈值及其空间分布特征为车站TOD开发提供了上下限参考，可为政策制定者、购房者和投资者提供有针对性的指导。

3) 交通维度中，邻近性和可达性构成了空间和时空上的多尺度公共交通邻近性，两者对房价的影响方向相反，均存在阈值效应，800 m距离以内能最大限度发挥邻近地铁车站的优势。对比之下，可达性相对重要度显著，表明相对于“最后一公里”，人们更注重“点到点”的综合出行路径。在交通方式上，公共交通仍是居民关注重点，通勤出行中公共交通与私人小汽车的竞争力以及

就业机会的分布是影响土地价值的关键因素。

4) TOD建成环境对土地价值的影响存在空间异质及不同程度的空间聚集。城市外围区域地铁站需特别注重资源向车站聚集，中心城区车站则应关心出行品质和环境质量提升。不同区域的车站用地开发应采取因地制宜的差异化发展策略，或根据周围发展规划和人群需求做出适当开发调整。

参考文献：

References:

- [1] CERVERO R. The transit metropolis: a global inquiry[M]. Washington DC: Island Press, 1998.
- [2] CERVERO R, DAY J. Suburbanization and Transit- Oriented Development in China[J]. Transport policy, 2008, 15(5): 315-323.
- [3] WANG X, TONG D, GAO J, et al. The reshaping of land development density through rail transit: the stories of central areas vs suburbs in Shenzhen, China[J]. Cities, 2019, 89: 35-45.
- [4] CAO X J, DING C, YANG J. CAO X J, DING C, YANG J. Global synthesis of transport and land use planning[M]// Urban transport and land use planning: a synthesis of global knowledge: Vol. 9. London: Academic Press, 2022: 1-8.[M]. London: Academic Press, 2022: 1-8.
- [5] ALONSO W. Location and land use: toward a general theory of land rent[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- [6] MUTH R F. Cities and housing: the spatial pattern of urban residential land use[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1969.
- [7] MILLS E S. Studies in the structure of the urban economy[M]. Baltimore: Johns Hopkins Press, 1972.
- [8] BARTHOLOMEW K, EWING R. Hedonic price effects of pedestrian- and Transit-Oriented Development[J]. Journal of planning literature, 2011, 26(1): 18-34.
- [9] HIGGINS C D, KANAROGLOU P S. Forty years of modelling rapid transit's land value uplift in North America: moving beyond the tip of the iceberg[J]. Transport reviews, 2011, 36(5): 610-634.
- [10] 熊燕飞, 张安录, 刘蒙罢. 武汉市轨道交通对住房价格影响的时空效应及异质性分析: 基于网络结构和规模视角[J]. 中国土地科学, 2022, 36(12): 47-57.

XIONG Y F, ZHANG A L, LIU M B. Spa-

- tial-temporal effect and heterogeneity analysis of the impact of rail transit on housing prices in Wuhan: from the perspective of network structure and scale[J]. *China land science*, 2022, 36(12): 47-57.
- [11] 徐涛, 陶姣. 轨道交通溢价效应差异性: 理论、现象及机制[J]. *现代城市研究*, 2020(9): 116-123.
XU T, TAO J. Research on the urban transit access premium variety: theory, phenomenon and mechanism[J]. *Modern urban research*, 2020(9): 116-123.
- [12] MOHAMMAD S, GRAHAM D, MELO P, et al. A meta-analysis of the impact of rail projects on land and property values[J]. *Transportation research part A: policy and practice*, 2013, 50: 158-170.
- [13] SEO K, GOLUB A, KUBY M J. Combined impacts of highways and light rail transit on residential property values: a spatial hedonic price model for Phoenix, Arizona[J]. *Journal of transport geography*, 2014, 41: 53-62.
- [14] 张书婧, 许奇, 贾顺平, 等. 城市轨道交通新建线路对沿线住宅价格增值的时空效应[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(4): 54-62.
ZHANG S J, XU Q, JIA S P, et al. Spatial and temporal effects of new urban rail transit lines on residential property value uplift[J]. *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 2021, 21(4): 54-62.
- [15] YANG L C, CHAU K W, SZETO W Y, et al. Accessibility to transit, by transit, and property prices: spatially varying relationships[J]. *Transportation research part D: transport and environment*, 2020, 85: 102387.
- [16] SU S, ZHANG J, HE S, et al. Unraveling the impact of TOD on housing rental prices and implications on spatial planning: a comparative analysis of five Chinese megacities[J]. *Habitat international*, 2021, 107: 102309.
- [17] 王松涛, 郑思齐, 冯杰. 公共服务设施可达性及其对新建住房价格的影响: 以北京中心城为例[J]. *地理科学进展*, 2007(6): 78-85.
WANG S T, ZHENG S Q, FENG J. Spatial accessibility of housing to public services and its impact on housing price: a case study of Beijing's inner city[J]. *Progress in geography*, 2007(6): 78-85.
- [18] HIGGINS C D, KANAROGLOU P S. Rapid transit, Transit-Oriented Development, and the contextual sensitivity of land value uplift in Toronto[J]. *Urban studies*, 2018, 55(10): 2197-2225.
- [19] JIN T, CHENG L, LIU Z, et al. Nonlinear public transit accessibility effects on housing prices: heterogeneity across price segments[J]. *Transport policy*, 2022, 117: 48-59.
- [20] LI J, HUANG H. Effects of Transit-Oriented Development (TOD) on housing prices: a case study in Wuhan, China[J]. *Research in transportation economics*, 2020, 100813: 80.
- [21] 谷一桢, 郑思齐. 轨道交通对住宅价格和土地开发强度的影响: 以北京市13号线为例[J]. *地理学报*, 2010, 65(2): 213-223.
GU Y Z, ZHENG S Q. The impacts of rail transit on property values and land development intensity: the case of No.13 line in Beijing[J]. *Acta geographica sinica*, 2010, 65(2): 213-223.
- [22] JIANG Y, GU P Q, CAO Z J, et al. Impact of Transit-Oriented Development on residential property values around urban rail stations[J]. *Transportation research record: journal of the transportation research board*, 2020, 2674: 362-372.
- [23] DUNCAN M. The impact of Transit-Oriented Development on housing prices in San Diego, CA[J]. *Urban studies*, 2011, 48: 101-127.
- [24] LIN X, NIU B, LIU W, et al. Land premium effects of urban rail transit and the associated policy insights for TOD: a case of Ningbo, China[J]. *Urban rail transit*. 2022, 8(3-4): 157-166.
- [25] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a synthesis[J]. *Transportation research record: journal of the transportation research board*, 2001, 1780: 87-114.
- [26] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制: 基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. *经济地理*, 2020, 40(3): 75-83.
SHEN T Y, YU H C, ZHOU L, et al. On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: scale law of spatial heterogeneity[J]. *Economic geography*, 2020, 40(3): 75-83.