文章编号:1673-0291(2026)03-0094-11 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250077

空间异质性下建成环境对共享单车碳减排效益的非线性影响分析

于 谦[1],陈梁玉[1],陈 磊[1],刘海海[2],邬 娜[1]
(1.长安大学 运输工程学院,西安 710064;2.本钢集团有限公司,辽宁 本溪 117000)

摘 要:为研究建成环境与共享单车碳减排效益之间的关系,提出一种地理加权(Geographically Weighted, GW)机器学习模型,分析建成环境影响的非线性和空间异质性.基于上海市和西安市的共享单车订单数据,结合生命周期核算碳排放,采用"5D"建成环境指标体系,将地理加权引入极致梯度决策提升树(eXtreme Gradient Boosting, XGBoost)模型中,使用双平方核函数计算空间权重,构建GW-XGBoost模型,通过局部加权训练捕捉变量关系的非线性和空间异质性,探讨建成环境对共享单车碳减排效益的非线性影响机理.研究结果表明:上海市与西安市共享单车平均每公里碳减排量分别为51.09 g与44.85 g;两座城市建成环境变量的重要影响程度存在差异且关键建成环境变量均呈现非线性阈值效应,如上海市和西安市人口密度低于阈值4万人/km^{2}时,在两市均呈现正向影响,但高于阈值时变量的影响不显著;空间异质性分析揭示了建成环境变量的影响存在显著空间差异,如上海市中心城区人口密度的边际碳减排效益最高,沙普利加性解释(SHapley Additive exPlanations, SHAP)值为10.01~47.52,但郊区则转为负向作用,SHAP值为-80.25~-50.01,人口每增加1万人/km^2,中心城区最多可增加碳减排量47.52 kg,郊区最多可减少碳减排量80.25 kg.研究成果可为共享单车低碳发展政策制定提供理论依据.

关键词:交通运输规划与管理;碳减排效益;机器学习;共享单车;建成环境;非线性影响
中图分类号:U491 **文献标志码**:A

Nonlinear effects of built environment on carbon emission reduction benefits for bike-sharing considering spatial heterogeneity

YU Qian[1], *CHEN Liangyu*[1], *CHEN Lei*[1], *LIU Haihai*[2], *WU Na*[1]
(1.School of transportation engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2.Bensteel group Co., Ltd., Benxi Liaoning 117100, China)

Abstract: To investigate the relationship between the built environment and the carbon emission reduction benefits of bike-sharing, a Geographically Weighted (GW) machine learning model is proposed to analyze the nonlinearity and spatially heterogeneous impacts of the built environment. Based on bike-sharing order data from Shanghai and Xi'an, and integrating life-cycle carbon emission accounting, a

收稿日期:2025-05-29;**修回日期**:2025-08-30
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划(2025JC-YBMS-446);国家自然科学基金(52002032);教育部人文社会科学研究青年基金(25XJC790010)
Foundation items: Natural Science Basis Research Plan in Shaanxi Province of China(2025JC-YBMS-446); National Natural Science Foundation of China(52002032); Youth Fund Project of Ministry of Education Humanities and Social Sciences(25XJC790010)
第一作者:于谦(1988—),女,山西太原人,讲师,博士.研究方向为交通运输规划与管理. **email**:yuqian@chd.edu.cn.
引用格式:于谦,陈梁玉,陈磊,等.空间异质性下建成环境对共享单车碳减排效益的非线性影响分析[J].北京交通大学学报,2026,50(3):94-104.
YU Qian, CHEN Liangyu, CHEN Lei, et al. Nonlinear effects of built environment on carbon emission reduction benefits for bike-sharing considering spatial heterogeneity[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(3): 94-104.(in Chinese)

"5D" built environment indicator system is established. The GW analysis is incorporated into the eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) model, utilizing a bi-square kernel function to calculate spatial weights, thereby constructing the GW-XGBoost model. Localized weighted training is then utilized to capture the nonlinearity and spatial heterogeneity of the relationships among variables, facilitating an exploration of the nonlinear mechanisms by which the built environment influences the carbon emission reduction benefits of bike-sharing. The results indicate that the average carbon emission reduction per kilometer of bike-sharing in Shanghai and Xi'an is 51.09 g and 44.85 g, respectively. The relative importance of built environment variables differs between the two cities, and key variables exhibit nonlinear threshold effects. For instance, when population density is below the threshold of 40 000 people/km^2, it exerts a positive impact in both cities. However, when the density exceeds this threshold, the impact becomes insignificant. Furthermore, spatial heterogeneity analysis reveals significant spatial variations in the impacts of built environment variables. In Shanghai, for example, the marginal carbon emission reduction benefit of population density peak is highest in the central urban area, with SHapley Additive exPlanations (SHAP) values ranging from 10.01 to 47.52. Conversely, the effect turns negative in suburban areas, with SHAP values ranging from −80.25 to −50.01. Specifically, for every increase in population density of 10 000 people/km^2, carbon emission reduction can increase by up to 47.52 kg in the central urban area, while it can decrease by up to 80.25 kg in suburban areas. These findings provide a theoretical basis for formulating low-carbon development policies for bike-sharing systems.

Keywords: transportation planning and management; carbon emission reduction benefits; machine learning; bike-sharing; built environment; nonlinear effect

截至2023年3月底,互联网租赁自行车企业在全国31个省级行政区域投放运营,3家主要互联网租赁自行车企业共投放1 497万辆,互联网租赁自行车日均订单量为2 700万单[1],共享单车已经成为居民出行的一种重要交通方式.共享单车能够通过替代其他高排放交通方式出行促进交通碳减排,无论是作为短途出行方式还是出行接驳工具,共享单车的碳减排效益都不容忽视.

研究者核算共享单车碳减排效益时,比较了共享单车和替代交通方式碳排放量的差异,以评估共享单车碳减排效益.研究方法可主要分为区域层面和行程层面,文献[2]根据不同区域划分共享单车替代率,文献[3-4]根据不同行程距离或方式划分模型确定共享单车替代率.研究表明,共享单车系统的碳减排效益受建成环境、系统运营规模、单车利用率与使用寿命等多重因素的复杂影响.文献[5]研究发现美国8个城市的共享单车系统年减排量差异显著,共享单车系统的减排潜力巨大,而文献[6]指出若系统规划不当导致车辆供过于求、利用率低或寿命缩短,共享单车甚至可能成为一种碳排放强度较高的交通方式.因此,有必要量化共享单车碳减排效益,分析建成环境对碳减排效益的影响机理,从而提高共享单车系统碳减排效益.

为解析建成环境影响共享单车出行的复杂机制,已有大量研究聚焦于建成环境对共享单车出行行为的作用.文献[7]通过构建随机森林(Random Forest, RF)模型,发现建成环境变量对共享单车集聚模式存在显著的非线性影响及阈值效应.文献[8]利用蒂森多边形识别共享单车接驳地铁出行,并采用时空地理加权回归(Geographically and Time Weighted Regression, GTMR)模型,研究表明建成环境变量对不同时段的接驳需求具有显著且非平稳的影响.文献[9]探讨了建成环境与共享单车骑行距离的非线性关系.文献[10]运用RF模型,发现共享单车替代率存在显著的时空异质性,并剖析了建成环境变量对该替代率的非线性作用.文献[11]采用聚类分析和RF模型等方法,解析了建成环境对共享单车出行的非线性影响.文献[12]采用了梯度决策提升树模型(Gradient Boosting Decision Tree, GBDT),指出人口密度和就业密度是影响共享单车骑行量最大的因素,并识别出各建成环境变量的有效作用范围与阈值效应.上述研究利用非线性模型证明道路密度、人口密度和公共交通站点密度等建成环境变量对共享单车出行特征存在显著的非线性影响,且该影响在不同地区存在差异.由于共享单车碳减排效益受这些出行特征的综合影响,因此建成环境对碳减排效益的影响也同样具有复杂的非线性和空间异质性特征.

已有针对建成环境影响碳减排效益的研究表明，不同的模型在处理这一问题时存在各自的局限性．文献[13]采用多尺度地理加权回归（Multiscale Geographically Weighted Regression，MGWR）模型研究了建成环境对共享单车碳减排效益的影响，发现建成环境因素的影响表现出明显的空间异质性，但对变量间非线性关系的刻画能力有限．文献[14]则构建了GBDT模型，揭示了建成环境与共享单车碳减排效益的非线性关系，但未能充分考虑空间异质性．可见，现有研究在分析过程中未能同时兼顾建成环境影响的非线性与空间异质性特征，限制了对影响机理的认识．而文献[15-17]表明，地理加权机器学习模型在同时处理非线性和空间异质性方面具备潜力，能够用于探究建成环境对共享单车碳减排效益的影响机理．

基于此，本文选择上海市和西安市两个不同规模的城市共享单车系统，量化共享单车碳减排效益和建成环境指标，将地理加权引入极致梯度决策提升树（eXtreme Gradient Boosting，XGBoost）模型，构建GW-XGBoost模型，以同时捕捉非线性和空间异质性特征，探讨两座城市建成环境对共享单车碳减排效益的影响机理差异．

1 数据与方法

1.1 研究范围与数据

研究数据为上海市2018年8月26日至2018年9月1日的共享单车订单数据和西安市2019年8月25日至2019年8月31日的共享单车订单数据，订单数据字段包括共享单车编号，订单起终时间和经纬度坐标．共享单车订单数据覆盖上海市（崇明区以外区域）和西安市建成区，将研究区域划分为1 km×1 km的栅格，如图1所示．上海市作为超大型城市，西安市作为特大型城市，其人口密度、公共交通发展状况、共享单车系统规模等方面存在差异．2018年上海市都市区（除崇明岛以外地区）常住人口2 439万人，面积5 243 km^2，运营公交线路1 543条，地铁线路17条，共享单车月均活跃车辆55.94万辆，日均骑行量113.2万次[18]；2019年西安市建成区常住人口604万人，面积3 226 km^2，运营公交线路355条，地铁线路5条，共享单车投放规模20.8万辆，日均骑行量42.7万次[19]．这些差异为探究不同规模城市的建成环境影响机理提供了对比条件．

1.2 建成环境变量

文献[4,13]表明，共享单车碳减排效益受到人口密度、POI设施密度、道路设施密度、公共交通站点覆盖率等建成环境变量的影响，因此采用密度、多样性、设计、目的地可达性和公共交通可达性“5D”建成环境指标框架量化建成环境变量，数据来源包括人口数据、路网数据、POI数据、公交站点数据和地铁站点数据，各建成环境变量定义及描述性统计如表1所示．

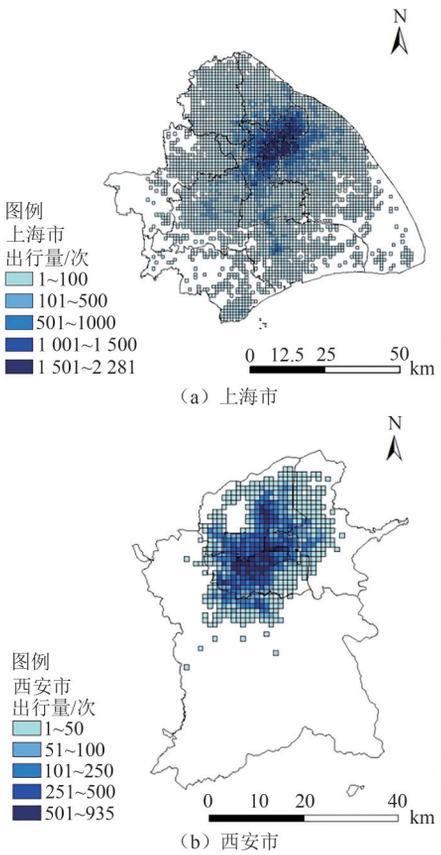


图1 共享单车出行起点分布

Fig.1 Distribution of bike-sharing trip origins

1.3 共享单车碳减排效益核算方法

为核算共享单车碳减排效益，首先基于共享单车订单数据获取共享单车出行OD．根据出行OD，通过高德地图路径规划功能，得到步行、共享单车、电动车、私家车、出租车、公交和地铁7种交通方式的出行时长、距离和费用．然后基于替代交通方式的出行属性，通过方式划分模型计算共享单车对其他交通方式的替代率．替代率表示在共享单车出现前使用其他交通方式的概率，为计算共享单车对各交通方式的替代率，参考文献[4]中建立的上海市Mixed Logit方式划分模型和文献[20]中建立的西安市Nest Logit方式划分模型．共享单车碳减排效益采用由下而上的方法，共包含3个步骤．

步骤1：共享单车骑行阶段的碳减排量为替代交通方式完成行程的碳排放量与共享单车碳排放量的差值，通过计算替代交通方式完成出行的碳排放

表 1　建成环境变量及描述性统计

Tab.1　Built environment variables and descriptive statistics

维度	变量	定义	上海市		西安市	
			最大值	平均值	最大值	平均值
密度	人口密度	栅格每平方公里人数/(万人/km^2)	24.61	0.89	14.43	0.85
多样性	土地利用多样性	辛普森多样性指数	0.75	0.42	0.74	0.57
设计	主干道密度	栅格每平方公里主干道长度/(km/km^2)	74.14	2.65	11.35	3.15
	次干道密度	栅格每平方公里次干道长度/(km/km^2)	14.31	0.85	7.94	1.98
	支路密度	栅格每平方公里支路长度/(km/km^2)	52.02	2.40	20.14	2.58
目的地可达性	住宅设施密度	栅格每平方公里住宅设施数量/(个/km^2)	298.50	21.53	129	4.08
	休闲设施密度	栅格每平方公里休闲设施数量/(个/km^2)	172.00	8.32	148	11.45
	工作设施密度	栅格每平方公里工作设施数量/(个/km^2)	684	51.46	802	39.28
	教育设施密度	栅格每平方公里教育设施数量/(个/km^2)	350	12.05	287	26.57
公共交通可达性	公交站点覆盖率	公交站点500 m缓冲区面积与栅格面积的比值/%	100	18.18	100	18.47
	地铁站点覆盖率	地铁站点1 000 m缓冲区面积与栅格面积的比值/%	100	27.74	100	32.41

量按其替代率加权计算的平均值,得到骑行阶段减排量为

$$E_{nb}=\sum(E_{nk}\times P_{nk}) \tag{1}$$

$$E_{nk}=W_k\times D_n \tag{2}$$

式中:E_{nb}为第n次行程骑行阶段共享单车碳减排量;E_{nk}为第n次行程交通方式k完成出行的碳排放量;P_{nk}为第n次行程共享单车对交通方式k的替代率;W_k为交通方式k的人均公里碳排放因子;D_n为第n次行程的出行距离.

步骤2:基于共享单车全生命周期碳排放量,计算每次行程共享单车碳排放量

$$W_{nb}=W_b\times D_n \tag{3}$$

$$W_b=W_{life}/D_{life} \tag{4}$$

式中:W_{nb}为第n次行程的共享单车碳排放量;W_b为一辆共享单车生命周期平均碳排放因子;W_{life}为一辆共享单车生命周期碳排放量;D_{life}为一辆共享单车生命周期行驶里程.

步骤3:一次行程共享单车碳减排量为骑行阶段碳减排量与共享单车碳排放量的差值,表达式为

$$E'_{nb}=E_{nb}-W_{nb} \tag{5}$$

式中,E'_{nb}为第n次行程的共享单车碳减排量.

1.4　不同交通方式的碳排放因子

上海市和西安市各交通方式的人均公里碳排放因子如表2和表3所示.考虑出行方式的不同能源类型,上海市私家车包括汽油小客车、电动小客车和汽油摩托车,出租车包括汽油和电动两种类型,公交车包括柴油和电动两种类型.西安市私家车包括汽油小客车、电动小客车和汽油摩托车,出租车包括汽油、天然气、电力和甲醇4种类型,公交车包括电力和天然气两种类型.

上海市各交通方式碳排放因子采用文献[21]

表 2　上海市交通方式碳排放因子

Tab.2　Carbon emission factors for transportation modes in Shanghai

出行方式	加权碳排放因子/(g/(人·km))	能源类型	碳排放因子/(g/(人·km))	比例/%
步行	0	步行	0	100.00
电动车	7.02	电力	7.02	100.00
私家车	125.09	汽油小客车	133.46	90.42
		电动小客车	61.01	3.99
		汽油摩托车	35.59	5.58
出租车	145.44	汽油	147.14	95.31
		电力	110.93	4.69
公交	33.36	柴油	42.36	38.50
		电力	27.73	61.50
地铁	22.47	电力	22.47	100.00

表 3　西安市交通方式碳排放因子

Tab.3　Carbon emission factors for transportation modes in Xi'an

出行方式	加权碳排放因子/(g/(人·km))	能源类型	碳排放因子/(g/(人·km))	比例/%
步行	0	步行	0	100.00
电动车	7.02	电力	7.02	100.00
私家车	131.95	汽油小客车	133.46	93.14
		电动小客车	61.01	1.98
		汽油摩托车	35.59	4.88
出租车	103.08	汽油	147.14	2.79
		天然气	124.2	5.68
		电力	110.93	54.43
		甲醇	85.02	37.10
公交车	34.69	电力	27.73	52.27
		天然气	42.32	47.73
地铁	29.79	电力	29.79	100.00

中的数据.上海市私家车能源结构数据采用文献[18]中的数据,出租车和公交车能源结构数据来源于文献[22].

西安市能源结构数据来源于文献[19].西安市电动车、私家车、汽油和电动出租车及公交的碳排放因子数据来自文献[21].西安市天然气和甲醇燃料出租车碳排放因子为能源碳排放因子和车辆公里能源消耗量的乘积与平均载客量的比值,地铁碳排放因子为2019年西安市地铁总运行电量和单位电量碳排放因子的乘积与总周转量的比值.

共享单车全生命周期包括共享单车生产、使用和处置阶段,生产阶段包括共享单车原材料加工和单车制备阶段,使用阶段包括共享单车骑行和调度运输阶段,处置阶段包括车辆维护和部件回收阶段.共享单车全生命周期碳排放量采用文献[23]中的数据,一辆共享单车全生命周期碳排放量为28.96 kg,如表4所示.

表4 共享单车生命周期排放量

Tab.4 Lifecycle emissions of bike-sharing

生命周期阶段	碳排放组成	共享单车碳排放量/kg
生产阶段	原材料碳排放	101.53
	生产碳排放	2.17
使用阶段	调度碳排放	5.84
	服务器碳排放	3.44
回收阶段	材料回收	−84.02
全生命周期	综合碳排放	28.96

1.5 GW-XGBoost模型

通过构建GW-XGBoost模型解释建成环境对共享单车碳减排效益的影响机理.GW-XGBoost模型通过调整带宽、最大树深度和学习率等模型参数,在不同区域构建局部模型,有效捕捉建成环境变量对共享单车碳减排效益影响的非线性和空间异质性.

采用文献[24]提出的GWR模型,其思想为利用局部加权最小二乘方法进行参数估计,通过获取各个回归点随地理位置变化的参数估计值,分析影响因素的空间异质性.GWR模型计算式为

$$y_i=\beta_0(\mu_i,\nu_i)+\sum_{c=1}^{C}\beta_c(\mu_i,\nu_i)x_{ic}+\varepsilon_i \tag{6}$$

式中:(μ_i,ν_i)为栅格i的经纬度坐标;ε_i为模型误差项;β_0是常数项;β_c为栅格i的回归参数;C为自变量总数;x_{ic}为栅格i的第c个自变量.

采用文献[25]提出的XGBoost模型,其为一种梯度提升算法,用于解决分类和回归问题.它在处理大规模数据集和复杂模型时表现优异,并且能够处理缺失值,揭示复杂的非线性效应.XGBoost的基本学习器是分类和回归树,基于当前的回归树不断添加新的回归树,然后通过新生成的回归树拟合之前回归树的残差.XGBoost模型计算式为

$$\hat{y}_i^m=\sum_{m=1}^{M}f_m(x_i) \tag{7}$$

式中:$\hat{y}_i^m$为第M次迭代后栅格i的共享单车碳减排效益的预测值;$f_m(x_i)$为第m棵树的模型预测值;x_i为栅格i的建成环境变量;M为迭代次数,即树的数量.

将地理加权思想引入XGBoost模型中,不使用所有栅格训练一个全局XGBoost模型,而是为栅格i训练局部XGBoost模型,在训练过程中相邻栅格的贡献根据其空间权重进行加权,即距离栅格i越近的栅格在训练栅格i处的局部模型时拥有更大的权重.

相邻栅格j对栅格i的空间权重基于位置(μ_i,ν_i)和相邻位置(μ_j,ν_j)计算,使用双平方加权核函数,并采用自适应带宽确定空间权重,其表达式为

$$w_{ij}=\begin{cases}\left[1-\left(\dfrac{d_{ij}}{H}\right)^2\right]^2 & d_{ij}\leqslant H\\ 0 & d_{ij}>H\end{cases} \tag{8}$$

式中:w_{ij}为栅格i和栅格j之间的空间权重;d_{ij}为栅格i和栅格j的质心之间的距离;H为带宽,通过自适应带宽确定.

假设GW-XGBoost模型中存在M个回归树,则模型会将所有回归树的结果相加作为最终输出,即

$$\hat{Y}_i^M=\sum_{m=1}^{M}f_m(X_i) \tag{9}$$

式中:$\hat{Y}_i^M$为第M次迭代后的共享单车碳减排效益预测值;X_i为栅格i空间权重加权的建成环境变量;$f_m(X_i)$为第m棵树对栅格i的输出结果.

为了优化回归树并减小误差,GW-XGBoost模型的目标可以最小化,计算式为

$$L^m=\sum_{i=1}^{I}l(Y_i,\hat{Y}_i^m)+\sum_{m=1}^{M}\Omega(f_m) \tag{10}$$

式中:L^m为目标函数,l为损失函数,衡量实际值Y_i和预测值$\hat{Y}_i^m$的差距;Y_i为栅格i的共享单车碳减排效益实际值;$\hat{Y}_i^m$为第m棵树对栅格i的共享单车碳减排效益预测值;$\Omega(f_m)$为用于惩罚第m棵树复杂度的正则化项.

SHAP值是一种机器学习模型解释方法,用于量化每个特征对模型预测结果的贡献.本研究使用SHAP模型解释GW-XGBoost模型结果,SHAP值的计算通过所有可能的特征组合的边际贡献加权平均得到,计算式为

$$\phi_i=\sum_{S\subseteq F\setminus\{a\}}\frac{|S|!(|F|-|S|-1)!}{|F|!}\left[f(S\cup\{a\})-f(S)\right] \tag{11}$$

式中:F为所有特征的集合;S是特征子集,其维度表示为$|S|$;$f(S\cup\{a\})$和$f(S)$分别表示使用和不使用特征a的模型结果.

为保证模型的精确性,使用五折交叉认证,以80%的数据作为训练集,其他20%的数据作为测试集,其中模型因变量为共享单车日均碳减排效益,自变量为建成环境变量.此外,为避免变量存在多重共线性而影响模型建立,对变量进行了检验,确定各变量的方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)均小于7.5.特征重要性分析是评估每个输入指标在XGBoost模型中的影响力的常用方法,通过该方法了解上海市和西安市各建成环境变量对共享单车碳减排效益的影响程度.部分依赖图(Partial Dependence Plots, PDP)是一种用于解释机器学习模型的方法,能够显示特征对机器学习模型的预测结果的边际效应,采用部分依赖图可视化各建成环境变量的非线性效应,分析每个建成环境变量与共享单车碳减排效益之间的非线性关系.

2　结果与分析

2.1　共享单车碳减排效益核算结果

基于上海市和西安市的共享单车订单数据计算共享单车碳减排效益,如表5所示.由表5可知:上海市共享单车平均每次行程碳减排量为79.21 g,平均每公里碳减排量为51.09 g;西安市平均每次行程碳减排量为76.16 g,平均每公里碳减排量为44.85 g;共享单车替代步行的碳减排效益为负值,替代其他交通方式均为正值.

表5　共享单车替代各交通方式的碳减排效益

Tab.5　Emission reduction benefits of bike-sharing as a substitute for various transport modes

替代交通方式	日均碳减排效益/t	
	上海市	西安市
步行	−1.85	−1.31
电动车	1.39	0.09
私家车	45.44	24.96
出租车	55.38	0.006
公共交通	2.99	0.32

2.2　模型拟合结果

通过GWR模型、XGBoost模型和GW-XGBoost模型,分别拟合了上海市和西安市建成环境与共享单车碳减排效益的关系.为保证模型精度,采用R^2、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)3种指标评估模型效果,通过网格搜索模型最佳参数,结果如表6所示.由表6可知:上海市和西安市XGBoost模型R^2均高于GWR模型;上海市GW-XGBoost模型R^2范围为0.67~0.86,平均值为0.79,拟合效果相较于XGBoost模型和GWR模型有所提升,证明了其融合优势,表明它同时有效地捕捉了数据中的复杂非线性关系和显著的空间异质性,从而获得了较好的拟合效果;西安市GW-XGBoost模型在不同区域的表现波动较大,可能与局部数据复杂度和样本稀疏有关,西安市栅格单元数量622个,少于上海市3 657个,局部模式学习可能不够充分,因此模型整体提升不明显.

表6　模型拟合结果

Tab.6　Model fitting results

城市	指标	GWR	XGBoost	GW-XGBoost		
				最小值	平均值	最大值
上海	R^2	0.68	0.78	0.67	0.79	0.86
	RMSE	26.07	24.97	24.22	30.33	37.33
	MAE	28.56	23.72	13.19	16.47	20.77
西安	R^2	0.62	0.67	0.31	0.53	0.74
	RMSE	27.96	27.19	21.9	33.2	43.48
	MAE	32.56	19.45	14.86	21.14	28.2

2.3　建成环境特征重要性

各建成环境变量对共享单车碳减排效益的特征重要性如表7所示.由表7可知:两座城市的显著建成环境变量及其影响程度存在差异;上海市特征重要性前六的建成环境变量为教育设施密度、住宅设施密度、休闲设施密度、地铁站点覆盖率、工作设施密度、人口密度;西安市特征重要性前六的建成环境变量为住宅设施密度、教育设施密度、公交站点覆盖率、工作设施密度、休闲设施密度、人口密度.

2.4　建成环境的非线性影响分析

通过部分依赖图解释两座城市的关键建成环境变量和共享单车碳减排效益之间的非线性关系,并将影响机理分为相似、不同阈值效应和存在差异3种形式进行分析,如图2所示.

由图2可知:①人口密度、工作设施密度和公交站点覆盖率对共享单车碳减排效益的影响机理相似.上海市和西安市人口密度在0~4万人/km^{2}时具有正向影响,高于4万人/km^{2}时碳减排效益随人口密度的增加而降低并趋于平稳;人口密度在0~4万人/km^{2}时,人口密度增加能够提高共享单车出行量,提高共享单车碳减排效益,但超过阈值后共享单车骑行量

表 7 建成环境变量特征重要性

Tab.7 Relative importance of built environment variables

建成环境变量	特征重要性	
	上海市	西安市
人口密度	5.32	6.74
土地利用多样性	1.40	3.85
主干道密度	2.72	5.61
次干道密度	1.71	3.30
支路密度	1.06	6.41
住宅设施密度	21.61	20.44
休闲设施密度	15.52	7.17
工作设施密度	11.30	8.78
教育设施密度	24.67	17.86
公交站点覆盖率	3.30	16.47
地铁站点覆盖率	11.39	3.37

饱和，且人口密集区域多位于中心城区，邻里可达性高，公共交通设施完善，居民选择步行或公共交通出行概率增加，因此人口密度超过阈值后共享单车碳减排效益趋于平稳.②上海市工作设施密度具有正向影响，西安市工作设施密度在0～120个/km²时具有正向影响，在120～400个/km²时碳减排效益随工作设施密度变化而上下波动，工作设施密度高于400个/km²时碳减排效益趋于平稳；上海市在0～400个/km²范围内工作设施密度增加，居民共享单车出行量增加，但工作设施密度超过400个/km²时再继续增加，能够增加居民在附近工作的可能性，文献[26]表明工作设施密度较高的区域短途通勤比例增加，共享单车与步行竞争加剧，因此工作设施密度超过阈值后共享单车碳减排效益趋于平稳；西安市工作密度在120～210个/km²和230～340个/km²时边际碳减排效益降低；上海市需强化高密度工作区共享单车供给，而西安市需避免共享单车设施过度集中导致的边际碳减排效益衰减.③上海市和西安市公交站点覆盖率在低于75%时影响不显著，高于75%时具有正向影响，这与文献[27]中的研究结论相似，高密度公交网络能够显著增强共享单车碳减排效益；公交站点覆盖率低于75%的区域多位于城市郊区，共享单车骑行需求有限，居民出行距离较长，可选择的交通方式少，对居民出行方式选择的影响不显著；当公交站点覆盖率高于75%时，可以有效吸引居民选择共享单车出行，提高共享单车出行量，从而提高共享单车碳减排效益.因此在公交站点覆盖率高于75%的区域优先投放共享单车，可有效提高共享单车减排潜力.④住宅设施密度和教育设施密度在两座城市间表现出不同的阈值效应.上海市住宅设施密度在0～246个/km²时碳减排效益随住宅设施密度的变化而上下波动，随后达到阈值，但整体趋势呈现正相关关系；西安市住宅设施密度在0～60个/km²时具有正向影响，高于60个/km²时影响不显著.随着住宅设施密度的提高，居民短途出行需求增加，邻里可达性提高，公共交通设施更加完善，共享单车出行量达到饱和，出现阈值效应；上海市居住密度整体大于西安市，与其多中心布局和混合用地模式相关，因此阈值更高.⑤上海市教育设施密度在0～185个/km²时具有正向影响，高于185个/km²时碳减排效益趋于平稳.西安市教育设施密度在0～100个/km²时具有正向影响，随后碳减排效益减小并趋于平稳；共享单车碳减排效益主要受益于高校和中小学周边的短途出行需求，但边际超过阈值后效益衰减主因是教育设施过度集中导致骑行需求饱和.教育设施周边应避免过度投放导致资源浪费，重点优化停放点布局.⑥休闲设施密度和地铁站点覆盖率的影响机理在两座城市间存在差异.上海

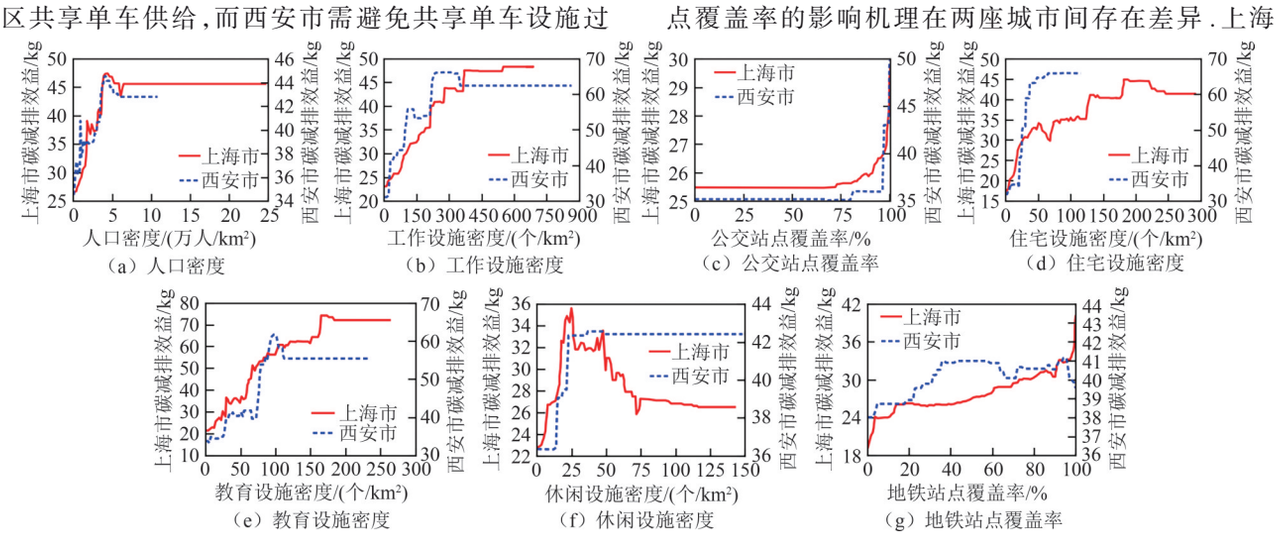


图 2 建成环境变量对共享单车碳减排效益的非线性影响

Fig.2 Nonlinear effects of built environment variables on carbon emission reduction benefits of bike-sharing

市休闲设施密度在0～25个/km²时具有正向影响,并且在25个/km²时碳减排效益达到峰值,在25～75个/km²时具有负向影响,高于75个/km²时碳减排效益趋于平稳;西安市休闲设施密度在0～25个/km²时具有正向影响,高于25个/km²时碳减排效益趋于平稳;两座城市休闲设施密度在0～25个/km²时均具有正向影响.上海市休闲设施密度高于25个/km²的地区多位于中心城区,通常与商业、办公功能混合,步行可达性高,导致共享单车与步行出行竞争加剧,共享单车碳减排效益降低,而西安市休闲设施高密度地区多位于中心城区外围,共享单车骑行需求增加,达到饱和后碳减排效益趋于平稳.⑦上海市共享单车碳减排效益随地铁站点覆盖率的增加而增加;西安市地铁站点覆盖率在55%～94%时碳减排效益随地铁站点覆盖率的变化而上下波动,在94%～100%时具有负向影响;上海市地铁沿线混合用地,短途通勤需求高,骑行效率显著高于步行,因此上海市共享单车碳减排效益随地铁站点覆盖率的增加而增加;西安市地铁站点覆盖率介于94%～97%的区域,平均骑行距离为1.72 km,平均步行替代率为56.34%;覆盖率介于97%～100%的区域,平均骑行距离为1.64 km,平均步行替代率为59.66%.骑行距离及步行替代率差异表明,随着覆盖率提高,骑行距离减少,共享单车更多用于短途接驳,替代了原本步行至地铁站的方式,此时共享单车碳减排效益为负,导致共享单车碳减排效益降低.

2.5　建成环境变量影响的空间异质性分析

SHAP值能够解释机器学习模型中某个特征如何影响某个栅格的结果,表现出影响的正负性和显著性.通过将SHAP值空间可视化,分析GW-XGBoost模型中不同地理位置各建成环境对共享单车碳减排效益的影响,如表8所示.由表8可知:各变量的局部SHAP值展现出显著的空间异质性,其最小值、最大值和标准差均表明不同地理位置的特征影响存在差异,如教育设施密度SHAP值范围达－21.40～94.12,人口密度范围达－80.25～47.52.同时,局部特征重要性也呈现空间异质性,平均值最高的是教育设施密度,为33.84%.

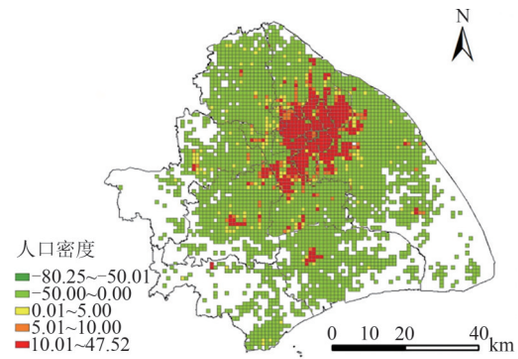
上海市关键建成环境变量SHAP值分布见图3.由图3可知:①人口密度SHAP值空间分布方面,高SHAP值集中分布在中心城区,低SHAP值主要分布在中心城区周边.负SHAP值则主要分布在郊区;人口密度的边际贡献在中等密度区域最高,与非线性拐点一致.SHAP值高值主要分布在人口密度为2万人/km²～4万人/km²的区域,该区间共享单车

表8 上海市局部SHAP值和特征重要性描述性统计

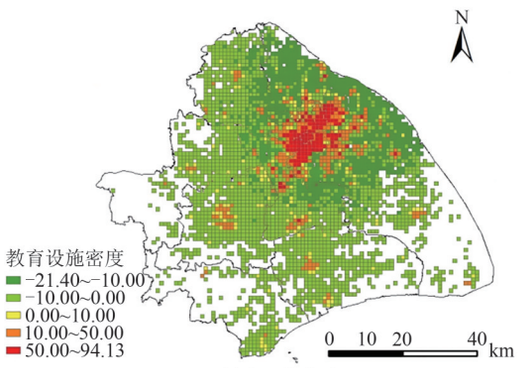
Tab.8　Descriptive statistics of Local SHAP values and relative importance in Shanghai

建成环境变量	局部SHAP值			局部特征重要性/%		
	最小值	最大值	标准差	最小值	最大值	平均值
教育设施密度	－21.40	94.12	18.55	15.19	43.58	33.84
人口密度	－80.25	47.52	11.56	5.56	25.36	8.89
住宅设施密度	－11.09	39.90	7.71	4.71	26.56	12.53
休闲设施密度	－13.14	37.20	7.63	5.92	41.66	19.14
工作设施密度	－19.57	66.29	6.72	4.07	18.32	8.70
地铁站点覆盖率	－21.78	27.05	6.40	2.46	13.15	5.66
公交站点覆盖率	－9.51	18.57	3.12	1.49	4.05	2.39
支路密度	－23.94	12.00	2.44	1.75	5.73	3.24
主干道密度	－17.45	9.28	1.97	1.57	4.42	2.62
次干道密度	－7.57	6.18	1.13	0.64	2.53	1.44
多样性	－6.32	3.17	0.64	0.54	3.34	1.55

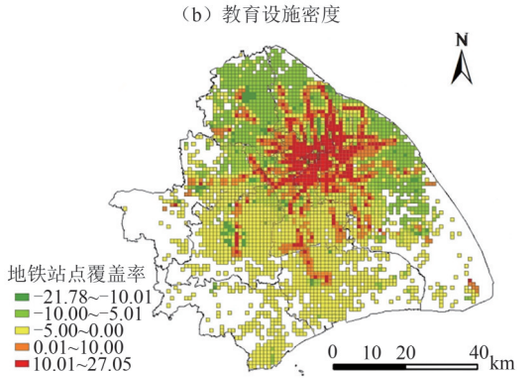
的接驳与短途通勤功能表现突出,是提升碳减排效益的关键区域.这一现象与教育设施密度、公交站点覆盖率和地铁站点覆盖率的空间异质性密切相关:在中心城区,高人口密度区域往往与教育设施密集区(如高校和中小学集中区)重叠,同时公交和地铁站点覆盖率高,形成“最后一公里”接驳需求,使共享单车与公共交通协同增效,共同提升减排潜力;在郊区(人口密度低于2万人/km²),教育设施和公共交通设施覆盖不足,共享单车因为与步行发生替代竞争,出行距离长、需求不足等原因难以发挥减排优势.②教育设施密度SHAP值空间分布方面,中心城区主要为高SHAP值区域,郊区存在负SHAP值区域;在徐汇、杨浦大学城等区域,对应教育设施密度接近或略高于阈值,SHAP值为正,表明提高教育设施高密度能够提升共享单车碳减排效益,体现出中非线性影响曲线正向增长区间对应的空间表现.特别是在人口密度超过2万人/km²且公交站点覆盖率大于80%的区域,形成了协同效应;在郊区如嘉定、青浦等区域,对应教育设施密度较低(＜100个/km²),SHAP值为负值,此时骑行需求不足或仅替代步行,其碳减排作用反而不显著.这种抑制作用在人口密度低于0.5万人/km²、公交和地铁站点覆盖率不足30%的区域尤为明显,导致骑行需求不足;教育设施密度对共享单车碳减排效益的影响具有明显的阈值效应与空间异质性,其正向效应需要结合适度的人口密度



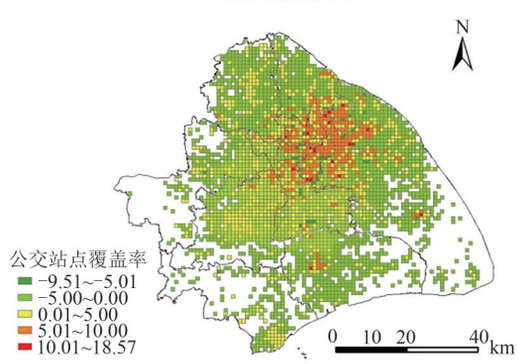
（a）人口密度



（b）教育设施密度



（c）地铁站点覆盖率



（d）公交站点覆盖率

图3 上海市关键建成环境变量SHAP值分布

Fig.3 SHAP value distribution of key built environment variables in Shanghai

和公共交通覆盖率.③地铁站点周边区域呈现较高的正SHAP值，而远离地铁站点的区域呈现负SHAP值；地铁站点覆盖率高区域（如人民广场、徐家汇、陆家嘴）SHAP值为正，表明地铁站点有效吸引共享单车接驳出行，提高共享单车碳减排效益.这主要源于高人口密度带来的高出行需求、教育设施聚集形成的潮汐通勤效应及公交与地铁网络协同构建的接驳体系，共同促进了共享单车作为“最后一公里”接驳工具的使用，从而显著提升碳减排效益；地铁站点覆盖率低的区域SHAP值为负，说明即使提升地铁覆盖率，由于骑行需求不足或替代步行，碳减排效益也可能降低；地铁站点覆盖率对共享单车碳减排效益的影响不仅存在非线性，而且在空间上存在显著差异性.SHAP值的空间分布特征与共享单车碳减排效益随地铁覆盖率提升而增加的趋势一致，也揭示了该影响存在空间异质性.这种空间异质性不仅印证了地铁覆盖率对碳减排效益的非线性影响，更揭示了公共交通与城市功能要素的协同作用对共享单车碳减排效益的重要影响.④SHAP值表示公交站点覆盖率对共享单车碳减排效益的边际贡献.中心城区多为正SHAP值区域，说明公交站点覆盖率高时，共享单车可以作为有效的短途接驳方式，提高碳减排效益.结合人口密度和地铁站点覆盖率，中心城区居民出行需求旺盛、公交与地铁网络密集，促进了共享单车与公共交通系统的接驳，进一步提高碳减排效益；郊区SHAP值多为负值或接近于0，反映这些区域共享单车与公交系统的接驳程度较低，可能原因是公交站点分布零散、共享单车供给不足或使用意愿低，导致其减排贡献有限，甚至因替代步行而降低碳减排效益；空间分布特征与非线性影响曲线揭示的阈值效应一致，进一步说明公交站点覆盖率对共享单车碳减排效益的边际效应具有显著的空间异质性.

2.6 政策建议

人口密度、工作设施密度和公交站点覆盖率对共享单车碳减排效益的影响机理相似，住宅设施密度和教育设施密度在两座城市间表现出不同的阈值效应，休闲设施密度和地铁站点覆盖率的影响机理存在差异.因此，城市共享单车系统低碳发展应当因地制宜，依据阈值给出充分发挥共享单车碳减排效益的正面因素最佳取值.为促进共享单车系统低碳发展，提出以下政策建议与实施措施：①建立基于非线性阈值与空间异质性的动态投放机制.在人口密度2万人/km^2～4万人/km^2、SHAP值为正的区域实施重点投放与车辆维护；对密度超过4万人/km^{2}的区域严格控制投放规模，建立季度动态评估机制；对人口密度低于2万人/km^{2}的郊区，结合公交站点覆盖率和教育设施密度情况投放，避免资源浪费.②制定城市差异化的公共交通接驳发展策略.在公交站点

覆盖率高于75%的区域优先增加共享单车投放,设置电子围栏停放区;在站点覆盖率低于75%的郊区,首先提升公交站点覆盖率至阈值水平,再逐步引入共享单车服务.上海市应重点提升地铁站点周边的共享单车接驳服务,形成“地铁+共享单车”低碳出行链;西安市需注意地铁站点覆盖率超过94%时产生的抑制效应,在高覆盖区域应优化步行接驳环境,控制共享单车投放数量.③实施设施密度分级管理策略.根据住宅和教育设施密度的非线性影响,在上海市住宅设施密度低于240个/km²、教育设施密度低于185个/km²的区域增加投放;在西安市住宅密度低于60个/km²、教育设施密度低于100个/km²的区域扩大服务范围.对于休闲设施密度超过25个/km²的上海市中心区域,建立高峰期弹性调度机制,避免车辆过度堆积,同时在这些区域增加停车设施规划,提升车辆周转效率.④结合碳排放效益数字化监测服务平台.集成建成环境数据、共享单车订单数据和碳排放数据,实现不同区域碳减排效益的实时可视化.建立月度评估和动态调整机制,调整投放策略,实现科学精准的低碳管理.

此外,基于构建的上海市和西安市建成环境与共享单车骑行量的XGBoost模型,发现建成环境变量对共享单车骑行量的非线性影响机理与对应的碳减排效益的影响机理相似.除了公交站点覆盖率,建成环境变量超过阈值的区域进一步增加共享单车投放量,并不能有效提高共享单车骑行量和碳减排效益.因此,在满足共享单车骑行需求的前提下,基于不同阈值调整不同区域的共享单车投放量,既可以保证共享单车企业利益,也可以提升共享单车碳减排效益.

3　结论

1)上海市共享单车平均每次行程碳减排量为79.21 g,平均每公里碳减排量为51.09 g,西安市共享单车平均每次行程碳减排量为76.16 g,平均每公里碳减排量为44.85 g.

2)两座城市建成环境变量对共享单车碳减排效益的非线性影响存在异同,其中人口密度、工作设施密度和公交站点覆盖率的影响机理相似,住宅设施密度和教育设施密度在两座城市间表现出不同的阈值效应,休闲设施密度和地铁站点覆盖率的影响机理在两座城市间存在差异.

3)建成环境变量对共享单车碳减排效益的影响具有显著的空间异质性,各建成环境变量的作用效果在空间分布上表现出明显的区域差异.

未来构建可融合时间维度的时空分析模型,基于共享单车多年运营数据,系统解析建成环境变量对共享单车碳减排效益影响的动态变化规律.通过揭示时空异质性与非线性耦合机制,为优化城市共享单车系统布局、提升低碳效益提供理论支持和实践依据.

参考文献(References):

[1] 中国道路运输协会.互联网租赁自行车行业数据信息统计和分析报告[R].北京,2023.
China Road Transport Association. Statistics and analysis report of data and information of Internet rental bicycle industry[R]. Beijing, 2023.(in Chinese)

[2] LV G Y, ZHENG S, CHEN H T. Spatiotemporal assessment of carbon emission reduction by shared bikes in Shenzhen, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 100: 105011.

[3] 马书红,朱敏,杨磊,等.基于减碳效益的共享单车骑行网络社区识别与影响因素分析[J].北京交通大学学报,2025,49(1):180-190.
MA Shuhong, ZHU Min, YANG Lei, et al. Identification and analysis of influencing factors in shared cycling network communities based on carbon reduction benefits[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(1): 180-190.(in Chinese)

[4] LI A Y, GAO K, ZHAO P X, et al. High-resolution assessment of environmental benefits of dockless bike-sharing systems based on transaction data[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126423.

[5] KOU Z Y, WANG X, CHIU S F A, et al. Quantifying greenhouse gas emissions reduction from bike share systems: A model considering real-world trips and transportation mode choice patterns[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 153: 104534.

[6] WANG Y T, SUN S H. Does large scale free-floating bike sharing really improve the sustainability of urban transportation Empirical evidence from Beijing[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 76: 103533.

[7] 戢晓峰,邓若凡,乔新,等.建成环境对共享单车时间集聚模式的非线性影响[J].吉林大学学报(工学版),2025,55(7):2233-2242.
JI Xiaofeng, DENG Ruofan, QIAO Xin, et al. Nonlinear influence of built environment on temporal aggregation modes of shared bicycles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(7): 2233-2242.(in Chinese)

[8] 马君泽,郑长江,吴非,等.面向地铁站点的共享单车接驳出行特征及影响因素分析[J].吉林大学学报(工学版),2025,55(8):2639-2650.
MA Junze, ZHENG Changjiang, WU Fei, et al. Analy-

sis of characteristics and influencing factors of dockless bike sharing connected to metro[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(8): 2639－2650. (in Chinese)

[9] CERVERO R, DENMAN S, JIN Y. Network design, built and natural environments, and bicycle commuting: Evidence from British cities and towns[J]. Transport Policy, 2019, 74: 153－164.

[10] GAO K, LI A Y, LIU Y, et al. Unraveling the mode substitution of dockless bike-sharing systems and its determinants: A trip level data-driven interpretation[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 98: 104820.

[11] WANG Y C, LI J J, SU D, et al. Spatial-temporal heterogeneity and built environment nonlinearity in inconsiderate parking of dockless bike-sharing[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2023, 175: 103789.

[12] CHEN E H, YE Z R. Identifying the nonlinear relationship between free-floating bike sharing usage and built environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124281.

[13] LIU J X, WANG M L, CHEN P F, et al. Riding towards a sustainable future: an evaluation of bike sharing's environmental benefits in Xiamen Island, China[J]. Geography and Sustainability, 2024, 5(2): 276－288.

[14] ZHAO J N, YUAN C W, MAO X H, et al. Identifying the nonlinear impacts of road network topology and built environment on the potential greenhouse gas emission reduction of dockless bike-sharing trips: A case study of Shenzhen, China[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2024, 13(8): 287.

[15] WANG S L, GAO K, ZHANG L F, et al. Geographically weighted machine learning for modeling spatial heterogeneity in traffic crash frequency and determinants in US[J]. Accident Analysis & Prevention, 2024, 199: 107528.

[16] SCHIMOHR K, DOEBLER P, SCHEINER J. Prediction of bike-sharing trip counts: Comparing parametric spatial regression models to a geographically weighted XGBoost algorithm[J]. Geographical Analysis, 2023, 55(4): 651－684.

[17] YE M, ZHU L, LI X J, et al. Estimation of the soil arsenic concentration using a geographically weighted XGBoost model based on hyperspectral data[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159798.

[18] 陈欢, 杜洽, 苏瑛. 数说2018上海综合交通: 上海市综合交通年度报告摘要[J]. 交通与运输, 2020, 36(2): 98－100.
CHEN Huan, DU Han, SU Ying. Analytic data about 2018 Shanghai comprehensive: A summary of Shanghai comprehensive transportation annual report[J]. Traffic & Transportation, 2020, 36(2): 98－100. (in Chinese)

[19] 西安市自然资源和规划局.2019年西安市城市交通发展年度报告[R].西安, 2019.
Xi'an Natural Resources and Planning Bureau.2019 Xi'an urban transport development annual report[R]. Xi'an, 2019. (in Chinese)

[20] MA S H, YU Z L, LIU C Q. Nested logit joint model of travel mode and travel time choice for urban commuting trips in Xi'an, China[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2020, 146(2): 04020020.

[21] 陈凤先, 耿直, 刘昊林, 等. 共享骑行减污降碳效益研究[J]. 中国环境管理, 2022, 14(5): 95－103.
CHEN Fengxian, GENG Zhi, LIU Haolin, et al. Study on the environmental pollution and carbon emission reduction for shared bicycle[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2022, 14(5): 95－103. (in Chinese)

[22] 上海市城乡建设和交通发展研究院.2019年上海市综合交通运行年报[J].交通与运输,2020,36(3):102－104.
Shanghai Urban-Rural Construction and Transportation Development Research Institute. 2019 annual report on comprehensive transportation in Shanghai[J]. Traffic & Transportation, 2020, 36(3): 102－104. (in Chinese)

[23] 生态环境部环境发展中心.共享骑行全生命周期减污降碳报告[EB/OL].[2025-05-29]. http://www.edcmep.org.cn/ywly_14986/pwqjy/202209/t20220909_993620.shtml.
Environmental Development Center of the Ministry of Ecology and Environment. Report on pollution reduction and carbon reduction in the whole life cycle of shared cycling [EB/OL]. [2025-05-29]. http://www.edcmep.org.cn/ywly_14986/pwqjy/202209/t20220909_993620.shtml.(in Chinese)

[24] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARLTON M. Geographically weighted regression[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (the Statistician), 1998, 47(3): 431－443.

[25] CHEN T Q, GUESTRIN C. XGBoost: A scalable tree boosting system [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco, 2016: 785－794.

[26] BI H, LI A Y, HUA M Z, et al. Examining the varying influences of built environment on bike-sharing commuting: Empirical evidence from Shanghai[J]. Transport Policy, 2022, 129: 51－65.

[27] GAO K, YANG Y, GIL J, et al. Data-driven interpretation on interactive and nonlinear effects of the correlated built environment on shared mobility[J]. Journal of Transport Geography, 2023, 110: 103604.