

多中心组团城市建成环境对轨道交通出行碳排放的影响 ——以重庆市为例

郑登耀¹, 孔奥²

(1. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074; 2. 江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330052)

摘要: 建成环境对城市轨道交通出行碳减排效率的影响存在显著空间异质性, 如何精准识别核心与外围组团之间的差异化驱动机制, 已成为多中心组团城市低碳规划面临的关键难题。以重庆市为例, 基于城市轨道交通IC卡数据, 首先分析出行特征, 继而采用“自下而上”法进行碳排放测算, 基于OLS, GWR和MGWR模型, 构建城市轨道交通出行碳排放与建成环境要素之间的关系模型, 最终系统分析各要素对碳排放的影响。模型对比结果表明, MGWR模型拟合效果最优, 其调整后的 R^2 较OLS和GWR模型分别提高48.13%和3.11%。研究发现, 建成环境对碳排放的影响具有显著空间分异: 在核心组团, POI密度、公共汽车线路数和距主要商圈距离对碳减排呈现显著正向影响, 而城市轨道交通车站周边平均坡度则表现为抑制作用; 在外围组团, 距商圈距离的影响最为突出, POI密度与车站周边平均坡度等因素影响相对较弱。

关键词: 城市轨道交通; 碳排放; 多中心组团; 建成环境; MGWR模型; 重庆市

The Impact of the Built Environment in Polycentric Agglomeration-Based Cities on Carbon Emissions from Rail Transit Travel: A Case Study of Chongqing

ZHENG Dengyao¹, KONG Ao²

(1. School of Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Jiangxi Communications Design and Research Institute Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330052, China)

Abstract: The influence of the built environment on the carbon reduction efficiency of urban rail transit travel exhibits significant spatial heterogeneity. How to accurately identify the differentiated driving mechanism between core and peripheral agglomerations has become a critical challenge for low-carbon planning in polycentric agglomeration-based cities. Using Chongqing as a case study and based on IC card data from urban rail transit, this paper first analyzes travel characteristics and subsequently applies a bottom-up approach to measure carbon emissions. Based on OLS, GWR, and MGWR models, a relationship model is developed between carbon emissions from rail transit travel and built environment factors, followed by a systematic analysis of the impact of each factor on carbon emissions. Comparative results demonstrate that the MGWR model achieves the best fit, with the adjusted R^2 values 48.13% and 3.11% higher than those of the OLS and GWR models, respectively. The findings reveal a significant spatial differentiation in the influence of the built environment on carbon emissions: in core agglomerations, POI density, number of bus routes, and distance to major commercial districts exert significant positive effects on carbon reduction, whereas the average slope around rail transit stations serves as a suppressive factor. In peripheral agglomerations, distance to commercial districts emerges as the most prominent factor, while influences from POI density and station-area slope are relatively weak.

Keywords: urban rail transit; carbon emissions; polycentric agglomerations; built environment; MGWR model; Chongqing

收稿日期: 2025-03-29

作者简介: 郑登耀(2000—), 男, 四川泸州人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输规划与管理, 电子邮箱 1026334351@qq.com。

1 研究概述

在“双碳”目标背景下, 多中心组团城

市因其功能分异与空间结构复杂性, 在城市轨道交通低碳发展规划方面面临严峻挑战。尽管城市轨道交通被公认为低碳出行的重要

载体,但既有研究表明,建成环境对其减排效率的影响存在显著空间异质性。在此类城市中,如何精准识别核心组团与外围组团之间差异化的碳排放驱动机制,已成为实现低碳发展目标亟待解决的关键问题。

既有研究显示,建成环境对出行行为具有显著影响。部分研究聚焦于单中心或空间均质城市,探讨建成环境对出行碳排放的作用机制,多采用全局回归模型或单一空间尺度进行分析。例如:Yang W. Y. 等^[1]构建结构方程模型,分析社区建成环境对不同出行目的碳排放的影响;基于出行数据,张赫等^[2]探讨小城市建成环境对居民出行碳排放的影响机制,指出可通过建成环境调控措施引导居民出行方式选择;从居民出行行为理论出发,敖仪斌等^[3]总结了建成环境测度指标对家庭车辆保有量和出行碳排放的影响规律;孔凡秋^[4]指出,商业密度高、土地利用混合度强的社区中,出行碳排放水平普遍较低;基于普通最小二乘法(Ordinary Least Square, OLS)和台湾省部分城市数据,Shen Y. S. 等^[5]分析了影响碳排放的关键因素与路径。

另有研究关注多中心组团城市的功能分异与空间异质性,尝试揭示传统模型难以捕捉的变量空间分异与多尺度效应。例如:Wu X. Y. 等^[6]采用梯度提升决策树模型研究建成环境对出行碳排放的影响;张纯等^[7]指出,通勤出行碳排放同时受建成环境的物质空间因素和个体社会经济属性的间接影响,并强调传统全局模型在空间假设上存在局限性;张鸣^[8]针对北京市部分城市轨道交通车站进行分析,发现车站与道路及交通服务功能的距离同周边碳排放呈显著负相关关系;以广州市居民出行数据为基础,杨文越等^[9]探讨了多尺度建成环境对通勤出行碳排放的影响;张琳杰^[10]指出,随着人口密度增大,碳排放也呈现相应上升趋势。F. R. Ashik 等^[11]通过结构方程模型分析建成环境对通勤出行碳排放的直接与间接影响。

地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)在捕捉建成环境与交通行为之间的空间异质性方面具有显著优势。基于天津市城市轨道交通数据,朱敏清等^[12]验证了时空地理加权回归(Geographically and Temporally Weighted Regression, GTWR)模型在分析客流时空异质性方面具备较高精度。结合GTWR模型与

随机森林(Random Forest)模型,许心越等^[13]探索建成环境对客流的复杂影响机制。基于南京市出租汽车出行数据,马健霄等^[14]验证了多尺度地理加权回归(Multiscale Geographically Weighted Regression, MGWR)模型的精度较传统方法提升超过50%。上述研究为本文采用MGWR模型提供了方法论参考,但其研究内容尚未延伸至碳排放领域。

综上所述,既有研究虽已关注建成环境对出行行为的影响,但将其与城市轨道交通出行碳排放相结合的研究仍相对缺乏。因此,本文通过MGWR模型对多中心组团城市建成环境要素的空间异质性影响进行分析,以揭示其对城市轨道交通出行碳排放的差异化驱动机制,为该类城市的低碳交通规划提供理论依据与决策支持。

2 研究思路与方法

2.1 研究思路

首先,基于IC卡数据,对城市轨道交通出行特征进行分析;其次,利用“自下而上”法进行碳排放测算;随后,基于OLS模型、GWR模型和MGWR模型,构建城市轨道交通出行碳排放与建成环境要素之间的关系模型;最后,系统分析建成环境要素对城市轨道交通出行碳排放的影响机制。

2.2 要素选取

为分析建成环境与城市轨道交通出行特征之间的关系,并契合多中心组团城市的空间结构特征,本文基于重庆市“核心-外围”功能分异显著、空间异质性强的典型特点,依据影响出行行为的“5D”理论框架——密度(Density)、多样性(Diversity)、设计(Design)、目的地可达性(Destination Accessibility)及与交通设施的距离(Distance to Transit),选取8项指标作为该类城市建成环境的表征要素(见表1)。所选要素旨在量化核心组团的高密度、高混合度特征以及外围组团的功能单一性和对核心组团的依赖关系,从而能够有效捕捉和解释碳排放驱动机制在空间上的差异性。

2.3 碳排放测算方法

“自下而上”法以个体出行数据为基础,广泛应用于城市和社区层面的出行碳排放测算。其核心思路是从最小单元的出行活

动出发,逐层聚合至更大空间尺度(如车站、组团、城市等)的碳排放量。

1) 城市轨道交通出行碳排放量。

$$PE=PD_{metro}\times EF_{pkm,metro}\times 10^{-3}, \quad (1)$$

式中: PE 为项目情景下城市轨道交通出行碳排放量/kg; PD_{metro} 为城市轨道交通客运周转量/(人·km); $EF_{pkm,metro}$ 为城市轨道交通单位人公里排放因子/(g·人⁻¹·km⁻¹)。

$$EF_{pkm,metro}=\frac{EF_{km,metro}}{OC_{metro}}, \quad (2)$$

式中: $EF_{km,metro}$ 为城市轨道交通单位里程排放因子/(g·km⁻¹); OC_{metro} 为城市轨道交通平均客运量/人。

$$EF_{km,metro}=SEC_{el,metro}\times EF_{el}, \quad (3)$$

式中: $SEC_{el,metro}$ 为城市轨道交通单位里程耗电量/(kWh·km⁻¹); EF_{el} 为电网排放因子/(g·kWh⁻¹)。

2) 其他交通方式碳排放量。

$$BE=\sum_i(EF_{pkm,i}\times PD_i)\times 10^{-3}, \quad (4)$$

式中: BE 为基准线情景下其他交通方式的碳排放总量/kg; i 为交通方式(包括公共汽车、出租汽车、网约车和私人汽车等); $EF_{pkm,i}$ 为交通方式 i 的单位人公里排放因子/(g·人⁻¹·km⁻¹),采用重庆市生态环境局公布的数据^[15]; PD_i 为交通方式 i 的客运周转量/(人·km)。

$$EF_{pkm,i}=\frac{EF_{km,i}}{OC_i}, \quad (5)$$

式中: $EF_{km,i}$ 为交通方式 i 的单位里程排放因子/(g·km⁻¹); OC_i 为交通方式 i 的平均客运量/人。

$$EF_{km,i}=\sum_i(SEC_{el}\times EF_{el}+SFC_{n,i}\times NCV_{n,i}\times EF_{CO_2,n}), \quad (6)$$

式中: SEC_{el} 为电动交通方式 i 的单位里程耗电量/(kWh·km⁻¹); $SFC_{n,i}$ 为使用燃料 n 的交通方式 i 的单位里程燃料消耗量/(kg·km⁻¹); $NCV_{n,i}$ 为燃料 n 的低位发热量/(MJ·kg⁻¹); $EF_{CO_2,n}$ 为燃料 n 的单位热值的 CO₂ 排放因子/(g·MJ⁻¹)。

3) 碳排放量差值。

$$EF_a=\sum_i(T_a\times\beta_i\times EF_{pkm,i})\times 10^{-3}-T_a\times EF_{pkm,metro}\times 10^{-3}, \quad (7)$$

式中: EF_a 为基准线情景与项目情景的碳排放差值^[15]/g; T_a 为城市轨道交通车站 α 的平均客运周转量/(人·km); β_i 为交通方式 i 的调整后出行分担率/%。

$$T_a=P_a\times D_a, \quad (8)$$

式中: P_a 为城市轨道交通车站 α 的平均客运量/人; D_a 为城市轨道交通车站 α 的平均运距/km。

3 碳排放影响分析

3.1 影响机理

为深入分析多中心组团城市建成环境对轨道交通出行碳排放的影响机理,本文基于2.2节所建立的“5D”维度框架及其选取的建成环境要素,系统阐释各要素对碳排放的作用路径。各要素定义及对城市轨道交通出行碳排放的影响机理见表2。

3.2 回归模型构建

本文采用 OLS 模型、GWR 模型和 MGWR 模型,分析多中心组团城市建成环境对城市轨道交通出行碳排放的影响,并从中选取精度最优的模型。具体方法为:基于工作日早高峰时段城市轨道交通出发/到达客流和周末上午出发/到达客流4种情形下的平均客运量、平均出行距离及碳排放量数据进行模型求解,并选取阿凯克信息准则校正值(Akaike Information Riterion correction, AICc)、 R^2 以及调整后的 R^2 作为评价指

表1 多中心组团城市建成环境要素及数据来源
Tab.1 Built environment factors of polycentric agglomeration-based cities and data sources

变量类型	变量名称	数据来源
自变量 (建成环境)	POI 密度	高德地图 API
	土地利用混合度	基于 POI 数据计算得出
	道路网密度	开放街道地图(OpenStreetMap)道路网数据
	距主要商圈距离	通过 ArcGIS 软件计算得出
	公共汽车线路数	2022 年重庆市公共交通线路网络地理信息数据
	城市轨道交通车站周边平均坡度	使用 ArcGIS 软件中的坡度分析工具进行处理
	城市轨道交通线路开通年限	重庆市城市轨道交通官网数据
因变量 (城市轨道交通出行)	平均房价	基于 Python 对重庆市安居客平台二手房数据进行爬取
	平均客运量	重庆市城市轨道交通 IC 卡数据
	平均出行距离	重庆市城市轨道交通 IC 卡数据
	碳排放量	“自下而上”法测算

标，对各模型的拟合效果进行综合诊断与比较。以下将分别阐述各模型的构建原理及设定形式。

1) OLS 模型。

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^m \beta_k x_{ik} + \epsilon_i, i \in [1, n], \quad (9)$$

式中： y_i 为第 i 个样本点的碳排放量； β_0 为全局截距项； β_k 为第 k 个自变量的全局回归系数； x_{ik} 为第 i 个样本点在第 k 个解释变量上的取值； n 为样本容量； ϵ_i 为随机误差项。

2) GWR 模型。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i, i \in [1, n], \quad (10)$$

式中： (u_i, v_i) 为第 i 个样本点的经纬度坐标； $\beta_0(u_i, v_i)$ 为随地理位置变化的截距项； $\beta_k(u_i, v_i)$ 为第 k 个自变量在空间坐标 (u_i, v_i) 处的局部回归系数。

3) MGWR 模型。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \epsilon_i, i \in [1, n], \quad (11)$$

式中： (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个样本点的经纬度与实践维度组成的三维坐标； $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为随时空位置变化的截距项； $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 k 个自变量在时空坐标 (u_i, v_i, t_i) 处的局部回归系数。

3.2.1 OLS 模型

OLS 模型是一种广泛应用于估计线性回归模型中未知参数的回归分析方法^[16]。其拟合效果通常通过 R^2 和调整后的 R^2 (取值范围为 0~1，数值越大表示拟合优度越高)以及 AICc(数值越小表示模型性能和拟合度越好)等指标进行评价。4 种客流情形下的 OLS 模型评价指标结果见表 3。

OLS 模型对自变量与因变量关系的整体拟合效果一般。从因变量类型来看，该模型对平均出行距离的拟合效果最佳，平均客运量次之，对碳排放量的拟合效果最弱，三者调整后的 R^2 平均值分别为 0.608 3，0.447 0 和 0.341 8。从时段来看，周末上午的模型拟合效果优于工作日早高峰时段，综合比较工作日早高峰和周末上午两个时段下所有客流情景的拟合优度，其调整后的 R^2 平均值分别为 0.484 8 和 0.446 5。从客流类型来看，出发客流的拟合效果优于到达客流，二者调整后的 R^2 平均值分别为 0.475 8 和 0.455 5，表明在使用 OLS 模型进行拟合时，应更加关注出发地周边的建成环境特征。

3.2.2 GWR 模型

通过为研究区域中的每个位置分别建立局部回归模型，GWR 模型能够有效揭示变量在局部空间上的关联以及空间异质性^[17]。平均解释程度反映了模型对因变量预测或解释能力的整体水平^[18]。4 种客流情形下的

表2 多中心组团城市建成环境要素对城市轨道交通出行碳排放的影响机理
Tab.2 Mechanisms of the impact of built environment factors of polycentric agglomeration-based cities on carbon emissions from urban rail transit travel

建成环境要素	定义与测度	对碳排放的影响机理
POI 密度	单位区域内各类 POI 的数量，用于量化功能设施的集聚程度	高密度能够有效促进短距离出行和减少对小汽车的依赖，有助于降低人均出行碳排放
土地利用混合度	表征区域内居住、商业、办公等不同土地用途的多样性与混合布局程度	高混合度能够有效缩短出行距离，减少机动车使用需求，从而降低交通碳排放
道路网密度	单位面积内城市道路的总长度，反映路网结构的密集性与连通性	高路网密度可提高通达效率，缩短绕行距离和出行时间，进而减少机动车碳排放
距主要商圈距离	城市轨道交通车站与主要商业中心之间的空间距离	距离越近，非工作出行越易集中于城市轨道交通服务范围，从而降低碳排放
公共汽车线路数	城市轨道交通车站周边可接驳的公共汽车线路数量	公共汽车线路数增多可提升“最后一公里”接驳便利性，增强城市轨道交通吸引力，减少私人小汽车使用，降低碳排放
城市轨道交通车站周边平均坡度	城市轨道交通车站周边一定范围内地表坡度的平均值，反映地形起伏状况	较大坡度会增加机动车行驶阻力及能耗(尤其在上坡路段)，同时可能降低步行和自行车接驳意愿，间接导致碳排放增加
城市轨道交通线路开通年限	城市轨道交通线路开通时长	新开通线路通常能显著转移原小汽车出行需求，减排效应初期显著，随时间推移可能逐渐趋于平稳
平均房价	车站周边住宅单位的平均市场价格，间接反映居民社会经济属性及区位条件	房价较高可能对应更长通勤出行距离或更高小汽车保有率，但也可能因公共交通服务较完善而抑制碳排放，影响方向需结合实证判定

表3 OLS 模型评价指标结果

Tab.3 Results of OLS model evaluation metrics

因变量	指标	工作日早高峰时段出发平均客运量	工作日早高峰时段到达平均客运量	周末上午出发平均客运量	周末上午到达平均客运量
平均客运量	R^2	0.456	0.465	0.488	0.462
	调整后的 R^2	0.435	0.444	0.468	0.441
	AICc	1 399	823.4	1 053	594.4
平均出行距离	R^2	0.616	0.562	0.640	0.672
	调整后的 R^2	0.602	0.545	0.626	0.660
	AICc	-2 227	-4 020	-1 897	-3 058
碳排放量	R^2	0.368	0.336	0.404	0.358
	调整后的 R^2	0.343	0.310	0.381	0.333
	AICc	1 225	770.6	950.3	593.8

GWR模型评价指标结果见表4。

由表4可知，与OLS模型相比，GWR模型在各项自变量与因变量的拟合效果上均有显著提升。调整后的 R^2 的明显提高表明，GWR模型通过引入空间非平稳性，捕捉了OLS全局模型未能反映的局部空间关系，增强了对因变量的解释能力。AICc值的全面下降也表明GWR模型具有更好的拟合性能与可靠性。带宽值(Bandwidth used)因具体情景和因变量不同而存在差异，该带宽值为GWR模型优化后所得的最优自适应核

表4 GWR模型评价指标结果
Tab.4 Results of GWR model evaluation metrics

因变量	指标	工作日早高峰时段出发平均客运量	工作日早高峰时段到达平均客运量	周末上午出发平均客运量	周末上午到达平均客运量
平均客运量	R^2	0.553	0.656	0.557	0.612
	调整后的 R^2	0.494	0.581	0.504	0.534
	AICc	434.527	417.988	427.990	434.468
	Bandwidth used	154	114	162	120
平均出行距离	R^2	0.875	0.780	0.857	0.853
	调整后的 R^2	0.833	0.715	0.809	0.803
	AICc	272.850	363.712	297.234	303.071
	Bandwidth used	82	91	82	82
碳排放量	R^2	0.587	0.596	0.548	0.559
	调整后的 R^2	0.508	0.507	0.479	0.470
	AICc	442.397	448.574	444.714	458.658
	Bandwidth used	124	114	142	120

表5 MGWR模型采用的带宽值
Tab.5 Bandwidth values adopted by the MGWR model

建成环境要素	工作日早高峰时段出发平均客运量	工作日早高峰时段到达平均客运量	周末上午出发平均客运量	周末上午到达平均客运量
POI密度	128	45	187	43
城市轨道交通线路开通年限	187	43	43	43
土地利用混合度	187	187	187	187
距主要商圈距离	187	43	187	43
道路网密度	187	45	152	44
公共汽车线路数	187	177	187	187
城市轨道交通车站周边平均坡度	61	50	170	50
平均房价	187	74	187	187

带宽。其数值代表局部回归分析所采用的空间范围，带宽值越大，表明变量关系的空间平稳性越高，反之则表明空间异质性越强。由此得出，建成环境对客运量、出行距离及碳排放的影响具有明显的尺度效应，这为后续引入多尺度MGWR模型提供了理论依据。

3.2.3 MGWR模型

通过对自变量独立优化带宽，MGWR模型能够更有效地分析空间异质性，从而得到更为可靠的结果。与GWR模型为所有变量赋予一个全局统一带宽不同，MGWR模型允许不同自变量依据其自身空间分布特征采用不同的最佳带宽，同一变量在不同情境下的带宽也可能发生变化。MGWR模型带宽如表5所示。

在进行系数回归时，该模型充分考虑了不同自变量空间分布异质性的尺度差异，并依据数据特征选择差异化的空间尺度和核函数^[19]。4种客流情形下的MGWR模型评价指标结果见表6。

相较于GWR模型，MGWR模型的拟合效果进一步提升。不仅调整后的 R^2 继续提高，AICc值也全面下降，表明MGWR采用变量独立带宽的策略具有显著效果。该模型能够更精细地刻画不同建成环境要素在空间作用尺度上的差异，从而揭示多中心组团城市中空间异质性的复杂本质。

3.3 模型对比分析

MGWR模型、GWR模型与OLS模型的评价指标可视化结果见图1和图2。3种模型对比表明，MGWR模型在各项指标上均表现出最优性能：在平均客运量方面，MGWR模型调整后的 R^2 相较于OLS模型平均提高18.90%，相较于GWR模型平均提高0.62%；在平均出行距离方面，MGWR模型调整后的 R^2 相较于OLS模型平均提高36.58%，相较于GWR模型平均提高5.16%；在碳排放量方面，MGWR模型调整后的 R^2 相较于OLS模型平均提高48.13%，相较于GWR模型平均提高3.11%。此外，图2的AICc值对比显示，MGWR模型的AICc值在所有因变量要素中均显著低于GWR和OLS模型，进一步证实了其整体拟合性能的优越性。

上述结果表明，MGWR模型能够更有效地刻画多中心组团城市建成环境与城市轨道交通出行碳排放之间的复杂空间关系。其

多尺度建模框架显著提升了对空间异质性的解释能力，是本研究中拟合效果最优的建模方法。

4 重庆市案例

4.1 城市轨道交通出行碳排放量测算

采集 2022 年 6 月 13—19 日重庆市城市轨道交通 IC 卡数据，共包含 31 099 103 条刷卡记录。每条记录包含卡号、进出站标识、刷卡日期、刷卡时间、车站编号和上次刷卡车站编号等 6 个字段属性。

为更准确地划分城市轨道交通出行的客运周转量，本文根据 2022 年重庆市中心城区机动化出行分担率，对基准线情景下各交通方式的出行分担率进行相应调整，最终计算得到各城市轨道交通车站的客运周转量以及碳排放量(见表 7)。

重庆市中心城区呈现“一城五片，多中心组团式”的空间结构，包含中部、北部、南部、西部和东部 5 个片区，共 21 个城市组团。各组团在片区格局中相互联系、有机协调，实现了城市功能与人口分布的合理组织。本文选取在功能与交通特征上差异显著的 4 个典型组团进行深入分析：核心-输入型(渝中组团，涵盖华新街、朝天门等 45 座车站)、核心-输出型(南坪组团，涵盖高庙村、重庆交通大学等 45 座车站)、外围-输入型(礼嘉组团，涵盖园博园、王家庄等 35 座车站)以及外围-输出型(北碚组团，涵盖鱼洞、沙河坝等 63 座车站)。4 个典型组团的城市轨道交通出行碳排放量见图 3。

从城市轨道交通出行碳排放特征来看，核心-输入型组团的到达客流碳排放量明显高于出发客流，表明该组团对其他组团居民具有较强吸引力；核心-输出型组团在工作日早高峰时段和周末上午的碳排放特征较为一致；外围-输入型组团在工作日早高峰时段的到达客流碳排放量显著高于该时段的出发客流及周末上午的总体碳排放量，说明其在工作日早高峰时段对外部组团表现出较强吸引力；而外围-输出型组团的碳排放量则明显低于其他 3 个组团。

4.2 建成环境要素对碳排放的影响

基于 MGWR 模型对 4 个典型组团开展回归分析，以探讨建成环境要素对城市轨道交通出行碳排放的影响。分析结果表明，不

同组团区域内建成环境要素的影响存在明显差异。

对核心-输入型与核心-输出型组团的 MGWR 模型回归系数进行分析(见图 4)，结果显示：POI 密度、公共汽车线路数、距主要商圈距离对碳排放具有显著正向影响，而城市轨道交通车站周边平均坡度则表现为负向影响。

1) POI 密度的回归系数平均值为 0.232，与碳排放呈正相关关系。随着 POI 密度提高，回归系数显著上升，表明 POI 集聚程度的增加能够显著提高城市轨道交通使用频率，从而有助于减少碳排放。

2) 公共汽车线路数的回归系数平均值为 0.243。该值的增加意味着公共汽车线路增加增强了与城市轨道交通的接驳便利性，促使更多居民选择城市轨道交通出行，进而降低碳排放量。

3) 距主要商圈距离的回归系数平均值为 0.287。结果表明，距商圈越近，回归系数越高，说明邻近商圈的区位优势会激发居民使用城市轨道交通出行的需求，从而减少碳排放。

4) 城市轨道交通车站周边平均坡度对碳排放的影响为负，回归系数平均值为-0.116。坡度增加会抑制城市轨道交通的碳排放，这可能源于地形条件对出行便利性和接驳效率的制约。

对外围-输入型和外围-输出型组团的 MGWR 模型回归系数进行分析(见图 5)，结果显示：距主要商圈距离、公共汽车线路数和城市轨道交通线路开通年限的回归系数平均

表 6 MGWR 模型评价指标结果

Tab.6 Results of MGWR model evaluation metrics

因变量	指标	工作日早高峰时段出发平均客运量	工作日早高峰时段到达平均客运量	周末上午出发平均客运量	周末上午到达平均客运量
平均客运量	R^2	0.563	0.626	0.601	0.585
	调整后的 R^2	0.505	0.564	0.533	0.524
	AICc	430.809	413.735	427.249	425.836
平均出行距离	R^2	0.898	0.837	0.878	0.889
	调整后的 R^2	0.859	0.781	0.834	0.849
	AICc	252.972	325.321	275.466	258.881
碳排放量	R^2	0.652	0.608	0.578	0.527
	调整后的 R^2	0.553	0.519	0.497	0.456
	AICc	445.104	445.710	446.644	452.105

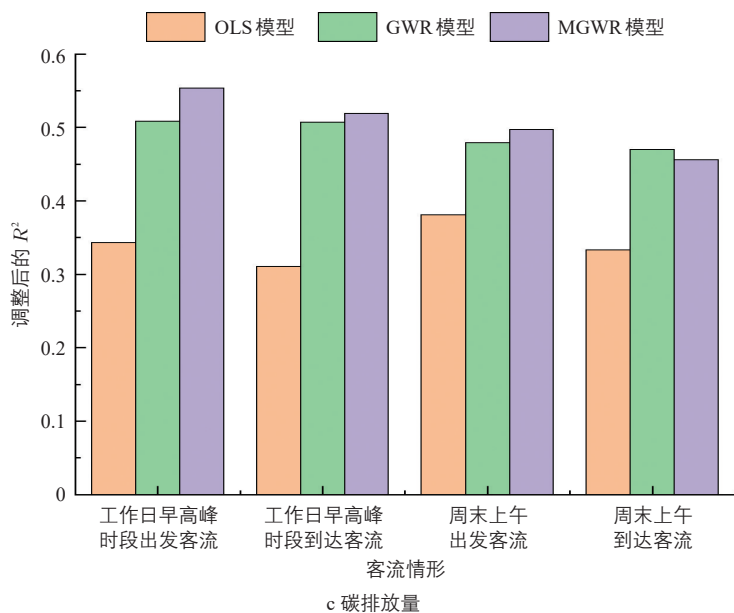
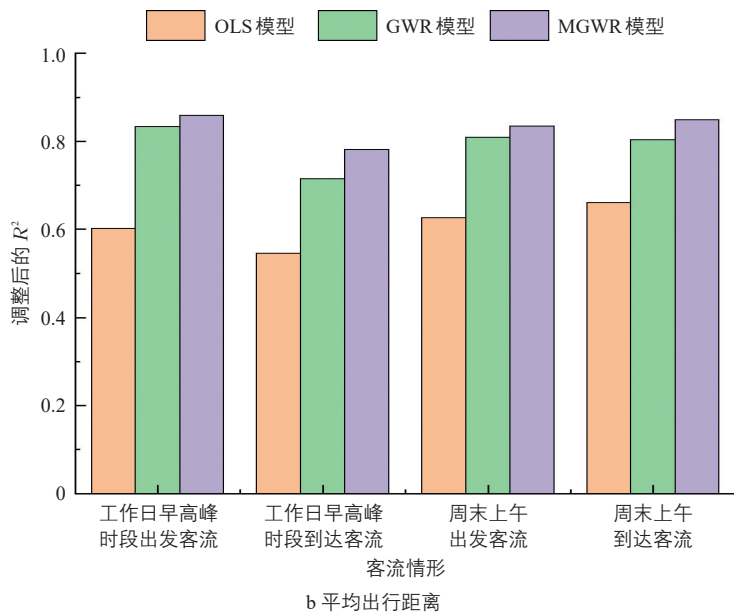
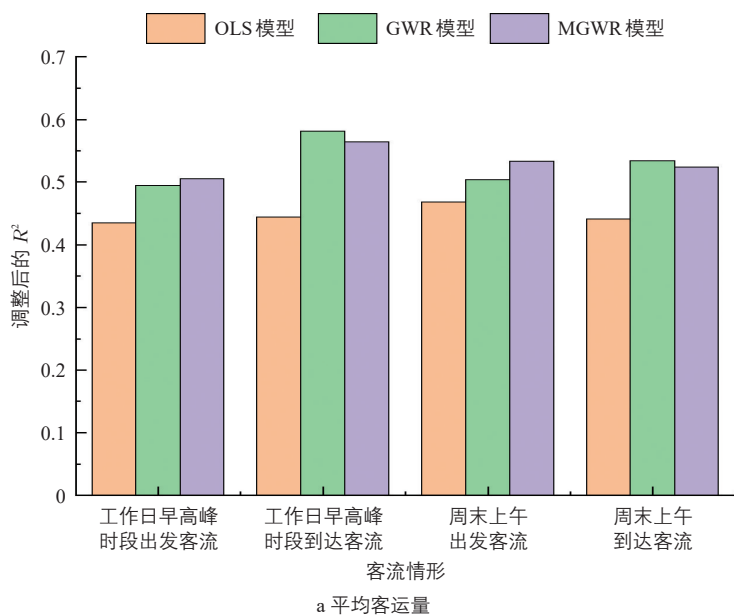


图1 3种模型因变量要素调整后的 R^2 值对比

Fig.1 Comparison of adjusted R^2 values of dependent variables across the three models

值较大(均超过0.15),表现出显著的正向影响。

1) 距主要商圈距离的回归系数平均值为0.437,对碳排放的正向影响最强。对外围组团而言,商圈距离越远,预测碳排放量反而越高。这一现象归因于外围组团功能单一与山地地形限制:本地商业服务不足迫使居民跨区消费(如北碚站至观音桥商圈出行比例达67%),形成长距离出行刚性需求;同时,山地地形导致道路网密度较低^[20],使私人汽车长距离出行成本显著高于城市轨道交通;加之定制公交与微循环接驳模式有效降低了“最后一公里”阻力,提升了城市轨道交通可达性。因此,商圈距离越远,居民越倾向于选择城市轨道交通完成跨区出行。这一机制与核心区“商圈邻近促进短距离城市轨道交通出行替代高碳方式”的减排逻辑存在本质差异。

2) 公共汽车线路数的回归系数平均值为0.217,表明公共汽车线路数量增加能够显著提升城市轨道交通使用频率,进而减少碳排放。完善的公共汽车网络增强了与城市轨道交通的接驳便利性,促使更多居民采用“公共汽车+城市轨道交通”的组合出行方式。

3) 城市轨道交通线路开通年限的回归系数平均值为0.16~0.23,呈现稳定的正向影响,表明随着外围组团城市轨道交通系统日益成熟,其服务吸引力持续增强,更多居民使用城市轨道交通出行,从而持续降低碳排放量。

4) 其余建成环境要素在外围组团中未表现出显著影响,对城市轨道交通出行碳排放的驱动作用有限。这表明外围组团与核心组团在建成环境对碳排放的影响机制上存在明显差异,因而有必要采取差异化、有针对性的规划策略。

4.3 空间异质性验证与规划启示

综上所述,核心组团与外围组团在建成环境对城市轨道交通出行碳排放的影响方面既存在统一性,也表现出显著的空间异质性。

1) 统一性特征。

城市轨道交通线路开通年限对降低碳排放量始终具有促进作用,但其边际效应随年限增长趋于平缓;距主要商圈距离和公共汽车线路数能够以较高效率促进碳排放量减少;土地利用混合度、道路网密度和平均房价对碳排放呈正向影响,但作用强度相对有限。

2) 空间异质性机制。

建成环境对碳排放的影响在4个典型组

团中呈现出明显的空间异质性。在核心组团中, POI密度(回归系数0.232)与公共汽车线路数(回归系数0.243)对碳减排表现出强驱动作用, 这源于其高密度混合用地特征: POI集聚有效缩短居民日常出行距离, 密集的公共汽车网络提升了城市轨道交通可达性, 共同形成“短距离-低碳化”的良性循环。相比之下, 外围组团功能相对单一, 居民更依赖城市轨道交通满足跨组团消费需求, 因此距主要商圈距离成为长距离出行的主要影响因素。该结果验证了“核心区功能融合-外围区功能互补”的多中心组团规划理论^[1], 表明功能分异梯度对建成环境与碳排放的关系具有重要调节作用。

3) MGWR模型的优越性。

MGWR模型在多尺度带宽优化方面表现出显著优势。传统OLS模型假设全局均质, 难以充分解释核心与外围组团的差异化效应(例如POI密度在外围组团作用微弱, 其调整后的 R^2 仅为0.31); GWR模型虽可刻画空间异质, 但受单一带宽限制, 难以准确识别变量在不同尺度下的作用强度。MGWR通过为变量独立优化带宽, 调整后的 R^2 较OLS和GWR模型分别提升48.13%和3.11%。与既有研究对比发现, 本文识别出多中心组团外围区碳排放主要受距商圈距离主导, 而张赫等^[2]针对小城市外围区的研究则指出土地利用混合度起主导作用。这一差异反映出城市功能分异程度的调节效应: 小城市外围区功能混合程度较高, 可通过用地混合缩短出行距离; 而多中心组团城市外围区由于功能互补需求更强, 更依赖城市轨道交通实现跨区联系。

4) 规划策略建议。

多中心组团城市应制定差异化低碳规划策略。核心区应重点优化功能混合度与地形适应性, 外围区则应加强城市轨道交通与商圈的协同布局, 并通过“城市轨道交通干线+中运量公共交通+微循环接驳”三级网络推动全域低碳发展。针对外围区, 在地形约束和接驳条件改善的前提下, 商圈距离的增大反而能促进私人汽车出行向城市轨道交通转移, 实现整体碳排放降低, 但过度依赖跨区消费可能加剧职住分离和延长通勤距离。若简单抑制跨区出行, 则可能影响城市轨道交通规模经济性, 形成减排阻力。因此, 本文建议采用“需求分级管理”策略: ①在城市轨道交通车站1 km范围内配套完善公共

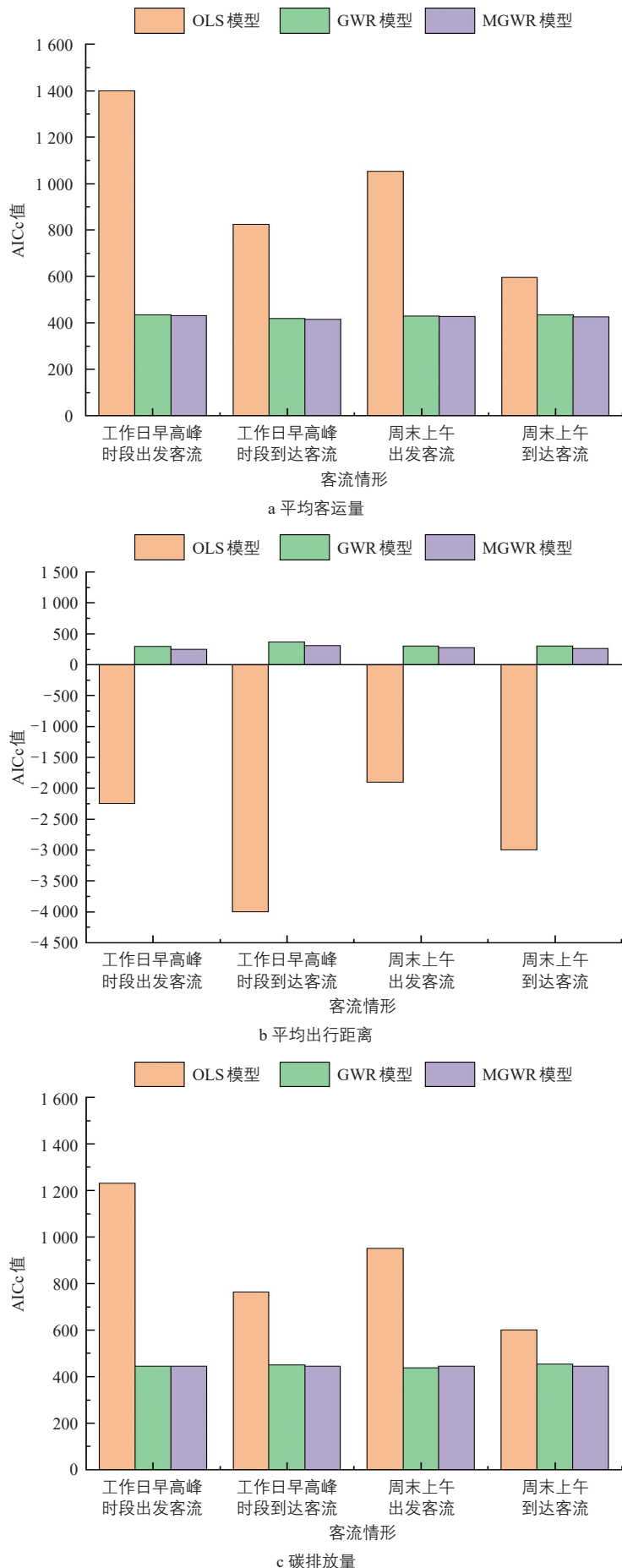


图2 3种模型因变量要素AICc值对比

Fig.2 Comparison of AICc values of dependent variables across the three models

表7 重庆市城市轨道交通车站客运周转量及出行碳排放量

Tab.7 Passenger turnover and travel-related carbon emissions of urban rail transit stations in Chongqing

车站	客运周转量/(万人·km ⁻¹)				碳排放量/kg			
	工作日早 高峰时段 出发客流	工作日早 高峰时段 到达客流	周末上午 出发客流	周末上午 到达客流	工作日早 高峰时段 出发客流	工作日早 高峰时段 到达客流	周末上午 出发客流	周末上午 到达客流
朝天门	1 226	3 512	2 976	5 450	617	1 768	1 498	2 744
较场口	4 314	8 300	6 889	9 455	2 172	4 178	3 468	4 760
...	...	...	...	...	...	...	...	...
丹鹤	692	543	558	542	348	273	281	273
园博中心	1 881	1 815	1 360	1 628	947	914	685	820
合计	827 941	824 350	910 860	903 381	416 815	415 007	458 559	454 794

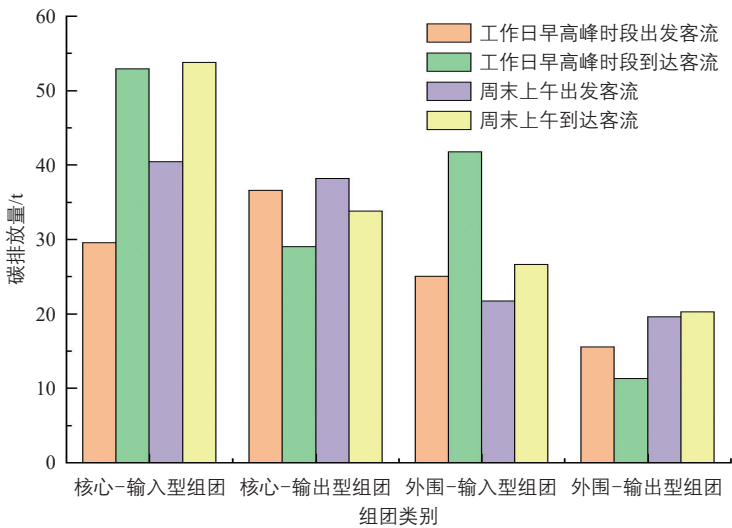


图3 重庆市4个典型组团的城市轨道交通出行碳排放量

Fig.3 Carbon emissions from urban rail transit travel in four typical agglomerations of Chongqing

服务设施，减少高频短距离跨区出行需求；②区域级商圈定位于大宗消费服务，通过差异化票价与接驳优化引导中长距离出行集约利用城市轨道交通。此外，还应建立动态监测与弹性调整机制，不断提升碳减排策略的适应性和可持续性。

5 结论

本文以重庆市为例，通过 MGWR 模型揭示了多中心组团城市建成环境对城市轨道交通出行碳排放的影响机制。主要结论如下：

1) 多中心组团城市建成环境对城市轨道交通出行碳排放的影响存在显著的空间异质性。核心组团凭借高密度混合用地缩短出行距离，促进碳减排；而外围组团因功能互补需求较强，表现出城市轨道交通与商圈联

动的典型特征。这一差异突破了传统“5D”框架在均质城市中的普适性假设，反映出“核心-外围”组团结构下城市功能互补关系对建成环境与碳排放关系的调节作用。

2) 山地地形与公共交通系统的协同机制塑造了独特的碳减排路径。在核心区，车站周边坡度较大抑制了步行接驳意愿，对城市轨道交通的碳减排效益产生了制约，说明单纯依靠密度优化难以化解山地城市的减排瓶颈，应将缓坡设计等工程措施与交通网络优化紧密结合，协同推进；外围组团则需通过协调区域与本地商业服务功能的策略统筹城市功能与低碳目标，例如在车站周边布局公共服务设施以减少非必要跨区出行，同时强化城市轨道交通与区域商圈的联动效应，并辅以差异化票价政策，以实现中长距离出行客流与系统能效的平衡。

3) MGWR 模型对多中心组团碳排放的空间分异具备优越的解释能力。其变量独立带宽机制可精准捕捉同影响要素的尺度差异，适用于多中心城市的精细化低碳规划与空间政策评估。

未来研究需在以下方向进一步深化：拓展数据时空维度以增强模型稳健性与泛化能力，探索 MGWR 模型在跨尺度、跨系统协同规划中的应用潜力，以支持更复杂的城市空间治理与低碳决策。

参考文献：

References:

[1] YANG W Y, CAO X S. Examining the effects of the neighborhood built environment on CO₂ emissions from different residential trip purposes: a case study in Guangzhou, China[J].

Cities, 2018, 81: 24-34.

- [2] 张赫, 张建勋, 王睿, 等. 小城市建成环境对居民出行交通碳排放的影响机理[J]. 城市问题, 2020(7): 4-10.

ZHANG H, ZHANG J X, WANG R, et al. Built environment factors influencing CO₂ emissions from residential trips in small Chinese cities[J]. Urban problems, 2020(7): 4-10.

- [3] 敖仪斌, 周仲礼, 王艳. 建成环境对居民出行碳排放的影响研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(4): 94-105.

AO Y B, ZHOU Z L, WANG Y. Progress of research on the impacts of built environment on travel carbon emissions[J]. Science & technology review, 2022, 40(4): 94-105.

- [4] 孔凡秋. 寒地城市空间对空气质量的影响及规划应对研究: 以哈尔滨市为例[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.

KONG F Q. Impact of urban space on air quality and planning response research in winter cities: take Harbin as an example[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.

- [5] SHEN Y S, LIN Y C, CUI S H, et al. Crucial factors of the built environment for mitigating carbon emissions[J]. Science of the total environment, 2022, 806: 150864.

- [6] WU X Y, TAO T, CAO J, et al. Examining threshold effects of built environment elements on travel-related carbon-dioxide emissions[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2019, 75: 1-12.

- [7] 张纯, 宁延豪, 梁颖. 城市建成环境对通勤碳排放的影响: 以北京市为例[J]. 上海城市规划, 2023(6): 18-24.

ZHANG C, NING Y H, LIANG Y. Study on the impact of urban built environment on commuting carbon emissions: a case study of Beijing[J]. Shanghai urban planning review, 2023 (6): 18-24.

- [8] 张鸣. 公共交通引导下的轨道交通站域内居民出行碳排放分布特征及优化研究: 以北京市地铁6号线为例[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.

ZHANG M. Characteristics and optimization of carbon emissions distribution for residents' travel within rail station areas under public transit guidance: a case study of Beijing subway line 6[D]. Beijing, North China University of Technology, 2023.

- [9] 杨文越, 梁斐雯, 曹小曙. 多尺度建成环境对居民通勤出行碳排放的影响: 来自广州的实证研究[J]. 地理研究, 2020, 39(7): 1625-1639.

YANG W Y, LIANG F W, CAO X S. Examining the effects of the multi-scale built environment on residents' CO₂ emissions from com-

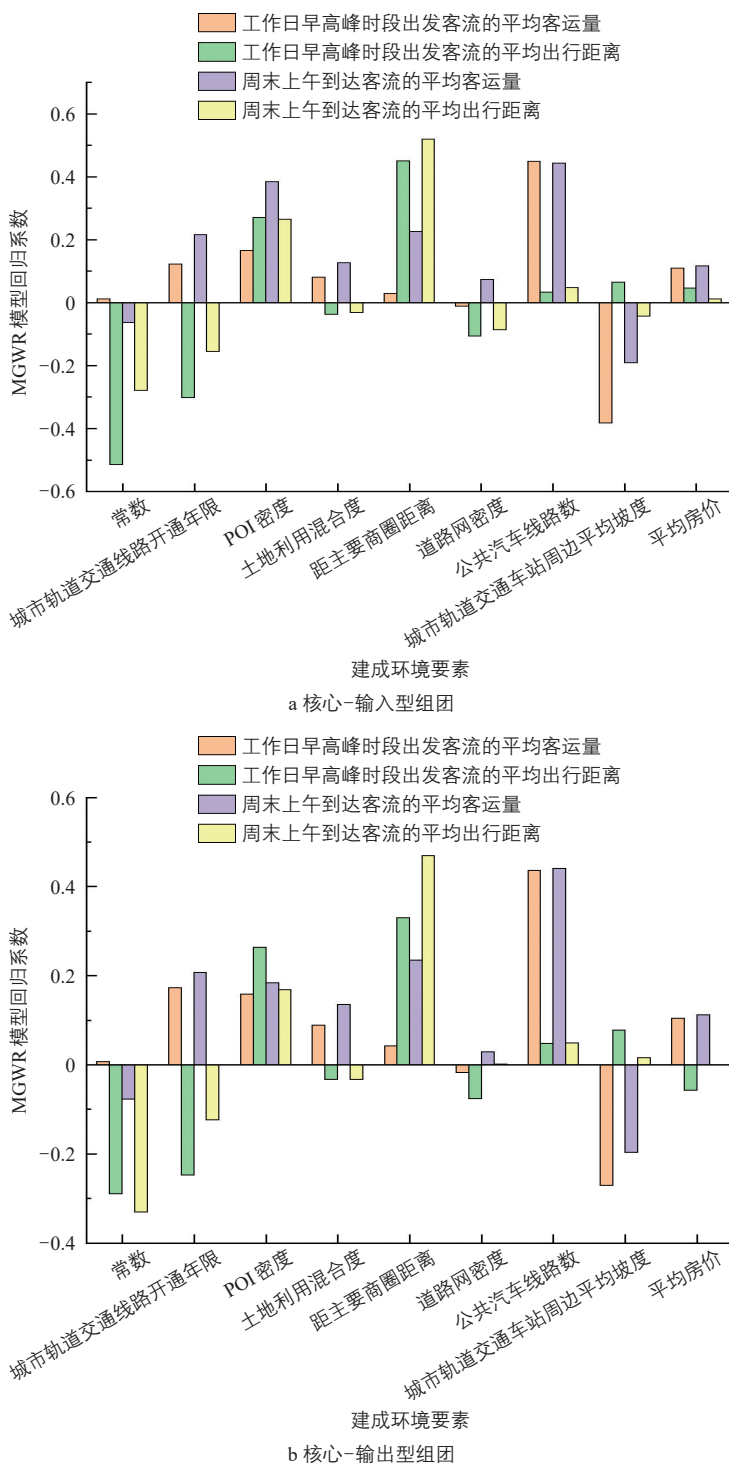


图4 核心-输入型和核心-输出型组团建成环境要素MGWR模型回归系数
Fig.4 MGWR model regression coefficients of built environment factors in core-input and core-output agglomerations

muting: an empirical study of Guangzhou[J]. Geographical research, 2020, 39(7): 1625-1639.

[10] 张琳杰. 异质性环境规制策略互动如何影响碳排放[J]. 生态经济, 2023, 39(9): 179-188.

ZHANG L J. How the heterogeneous environmental regulatory strategies interactions

affects carbon emissions[J]. Ecological economy, 2023, 39(9): 179-188.

[11] ASHIK F R, RAHMAN M H, ANTIPOVA A, et al. Analyzing the impact of the built environment on commuting-related carbon dioxide emissions[J]. International journal of sustainable transportation, 2023, 17(3): 258-272.

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

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

[13] 许心越, 孔庆雪, 李建民, 等. 建成环境对轨道交通客流的时空异质性影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(4): 194-202.

XU X Y, KONG Q X, LI J M, et al. Analysis of spatio-temporal heterogeneity impact of built environment on rail transit passenger flow[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2023, 23(4): 194-202.

[14] 马健霄, 印杰祥, 邵春福, 等. 时空异质性建成环境对出租车出行需求影响[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(1): 119-127.

MA J X, YIN J X, SHAO C F, et al. Impact of spatiotemporal heterogeneity in built environment on taxi travel demand[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(1): 119-127.

[15] 重庆市生态环境局. 重庆市共享电动助力车骑行项目方法学[R]. 重庆: 重庆市生态环境局, 2023.

[16] 赵志毫. 建成环境对共享电动滑板车出行影响的时空异质性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.

ZHAO Z H. Spatiotemporally varying effects of built environment on trip duration of shared electric scooter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[17] 贺鹏, 李雯茜, 李妍, 等. 建成环境对轨道交通客流非线性影响的空间特征[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(3): 187-194.

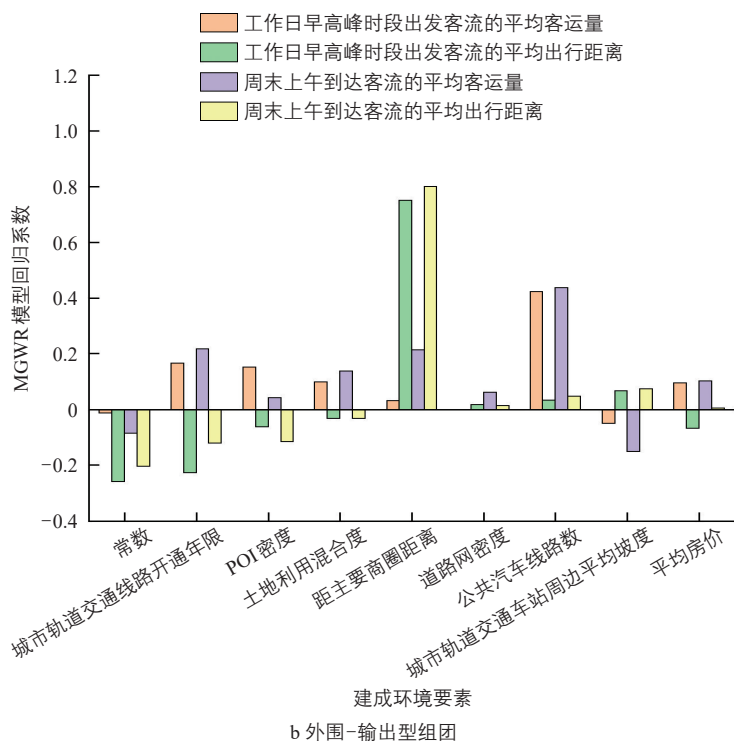
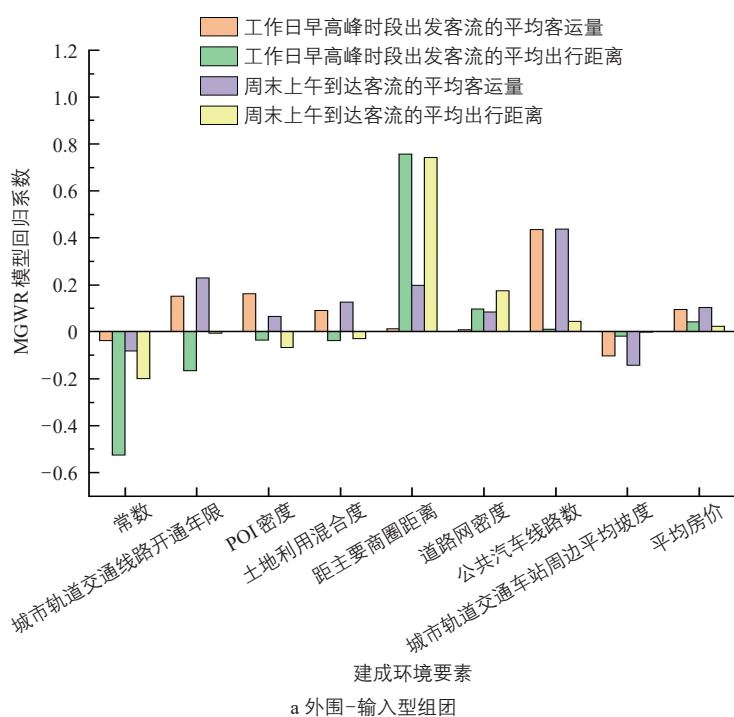


图5 外围-输入型和外围-输出型组团建成环境要素MGWR模型回归系数

Fig.5 MGWR model regression coefficients of built environment factors in peripheral-input and peripheral-output agglomerations

(下转第16页)