

不同时期建成环境对居民小汽车 依赖的影响

孙轶琳^{1,2}, 蔡余坤¹, 贾方圆¹, 疏 阳²

(1. 浙江大学 工程师学院, 杭州 310015; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要:为探究不同时期建成环境对居民小汽车依赖影响的差异,基于杭州市 2010 年和 2023 年的居民出行调查数据,构建了轻量级梯度提升机模型,并结合部分依赖图和沙普利加性解释方法进行了非线性分析。结果表明:轻量级梯度提升机模型精准捕捉了建成环境与居民小汽车依赖之间的非线性关系,建成环境对居民小汽车依赖有显著影响,且在不同时期存在显著差异。相比 2010 年,2023 年建成环境对居民小汽车依赖的影响明显减弱,且人口和道路密度因素的影响呈现阈值效应,当居住地人口密度超过 2 万人/ km^2 或道路密度超过 0.04 km/缓冲区时,青年群体的小汽车出行占比反而升高,表明应准确把握阈值效应的影响,以避免建设资源浪费及过度建设带来的负向效应。

关键词:交通运输系统工程;建成环境;小汽车依赖;轻量级梯度提升机;阈值效应

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)08-2095-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250050

Impact of built environment on residents' car dependence in different periods

SUN Yi-lin^{1,2}, CAI Yu-kun¹, JIA Fang-yuan¹, SHU Yang²

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To explore the differences in the impact of built environment on residents' car dependence in different periods, a light gradient boosting machine (LightGBM) model was constructed based on the residents' travel survey data of Hangzhou in 2010 and 2023. Nonlinear analysis was carried out using partial dependence plots and shapley additive explanations. The results show that the LightGBM model accurately captured the nonlinear relationship between built environment and residents' car dependence. The built environment has a significant impact on residents' car dependence, and there are significant differences in different periods. Compared with 2010, the impact of built environment on residents' car dependence in 2023 has significantly weakened. The influence of population and road density shows a threshold effect. When the population density of the residential area exceeds 20 000 people/ km^2 or the road density exceeds 0.04

收稿日期: 2025-01-14.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52131202); 浙江省“尖兵”、“领雁”研发攻关计划项目(2023C01240).

作者简介: 孙轶琳(1977-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 交通规划, 交通行为分析与智能交通.

E-mail: yilinsun@zju.edu.cn

km/buffer zone, the proportion of car travel among young people increases instead. This indicates that it is necessary to accurately grasp the impact of threshold effect to avoid the waste of construction resources and the negative effects brought by over-construction.

Key words: engineering of communication and transportation system; built environment; car dependence; light gradient boosting machine; threshold effect

0 引言

城市化进程和居民生活水平的提升促使小汽车成为城市居民日常出行的重要工具,然而其广泛使用引发了交通拥堵、环境污染和能源消耗等诸多问题。降低居民小汽车依赖并推动绿色出行的普及,已成为城市规划和交通管理的关键课题。城市建成环境对小汽车保有和使用的影响是交通地理学、城市规划学等领域的研究焦点。

国内外学者已围绕小汽车保有和使用开展广泛研究。Shao 等^[1]基于梯度提升决策树模型探讨了建成环境对小汽车保有的非线性影响,结果表明,多中心化发展和建成环境密度提高可以有效抑制小汽车增长。袁晓瑞^[2]、Wu 等^[3]、尹超英等^[4]从多尺度建成环境角度分析了其对居民小汽车保有量的影响差异,发现个人及家庭属性影响最为显著。Cao 等^[5]基于梯度提升决策树模型揭示了建成环境与小汽车依赖之间存在阈值效应。王晓全等^[6-8]利用多级贝叶斯模型和条件自相关模型确定空间效应对建成环境与小汽车依赖之间的关系有影响。Yin 等^[9]和 Chowdhury 等^[10]在建成环境方面的研究进一步证实了土地混合使用、紧凑型城市发展是抑制汽车出行的有效政策手段。

现有研究已深入探讨建成环境与小汽车保有和使用间的影响效应和机理,但未充分考虑不同时期社会经济环境变化对建成环境属性影响居民小汽车依赖行为的动态性^[10-12]。自 2010 年以来,杭州市经济飞速发展,城市交通进入快速发展阶段,地铁从无到有,形成包含 12 条线路的地铁网络,城市道路总里程实现了翻倍增长,城市拥堵状况得到了有效缓解,城市建成环境(尤其是交通设施状况)发生了巨大改变,这推动了居民出行行为的转变。因此,本文基于 2010 年和 2023 年杭州市居民出行调查数据,以小汽车保有量和出行占比表征居民的小汽车依赖行为^[13],运用轻量级梯度提升机(Light gradient boosting machine, Light-GBM)方法构建非线性模型,旨在探究不同时期

下随时期动态变化的建成环境对居民小汽车依赖行为的非线性影响,为城市规划与交通管理提供科学依据。

1 研究区域及数据描述

1.1 研究区域概况

本文聚焦于浙江省杭州市市区的核心区域,涵盖了西湖区、拱墅区、上城区、滨江区,以及余杭区、临平区、钱塘区、萧山区的部分区域,详细范围如图 1 所示。截至 2021 年底,杭州市居民小汽车保有量已超过 340 万辆^[14]。尽管近年来杭州市地铁网络迅速扩张,公共交通设施不断完善,但交通拥堵问题仍然是城市发展中的一个重大挑战。因此,本文选取了杭州市的主城区这一交通问题最为突出的区域作为研究对象,旨在为改善交通状况提供更有有效的交通需求管理政策建议。

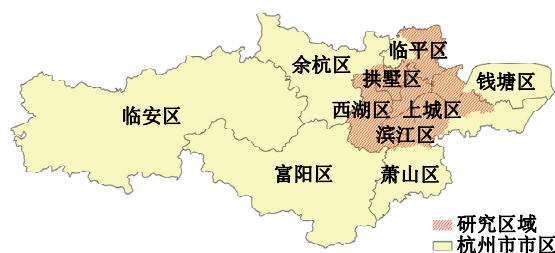


图 1 杭州市研究区域

Fig. 1 Study area of Hangzhou

1.2 数据描述

本文使用的是 2010 年和 2023 年杭州市居民出行调查数据。这些调查通过入户访问和网络调查的方式收集,在预发放和检验通过的基础上采用问卷调查的形式对居民进行分区域按比例抽样。具体而言,2010 年的出行调查共回收了 16 874 份有效样本,而 2023 年的调查则回收了 5 828 份有效样本,总计获得了 22 702 个有效样本个体。社会经济属性包括受访者的性别、年龄、家庭收入和学历,其中,性别变量与 2011 年和 2024 年杭州市统计年鉴中变量比例差异均在 3% 以内,年龄变量差异均在 5% 以内。此外,问卷调查严格遵循学术伦理规范,所有被调查者均在充分

知情的情况下签署了受试者知情同意书,且此调查已通过浙江大学科技伦理委员会的审批。

建成环境指的是城市中的建筑和空间布局,尤其是那些能够通过政策手段进行调整和优化的部分。本文主要关注居民居住地周边的建筑要

素,并采用“5D”框架全面描述建成环境的特征,包括密度(Density)、多样性(Diversity)、设计(Design)、目的地可达性(Destination accessibility)和公交邻近度(Distance to transit)。具体定义和指标详见表1。

表 1 解释变量描述性统计分析
Table 1 Descriptive of built environment

属性指标		变量描述	2010年		2023年	
			均值/占比	标准差	均值/占比	标准差
小汽车依赖变量	小汽车保有量	家庭小汽车保有数量	0.249	0.431 9	0.230	0.183 3
	小汽车出行占比	一日出行中小汽车出行的占比	0.167	0.362 3	0.205	0.388 7
建成环境变量	人口密度	单位面积内的居住人口数	14 108	10 382.8	11 441	7 957.18
	土地利用混合度	熵指数	0.740	0.234	0.824	0.066 2
	道路密度	单位面积内的道路里程数	0.010 5	0.007 52	0.022 4	0.007 13
	商圈易达性	距离最近商圈的距离	0.396	4.15	0.274	0.642
	公交邻近度	居住地附近的公交地铁站点数	5.543	3.90	4.46	4.08
社会经济变量	性别	0:女性	51.2%(50%)	0.499 9	48.5%(51%)	0.499 9
		1:男性	48.8%(50%)		51.5%(49%)	
	年龄	1:20~35岁	27.5%(32%)	14.99	26.9%(24%)	14.21
		2:35~60岁	50.4%(47%)		46.3%(45%)	
		3:60岁以上	22.1%(21%)		26.8%(31%)	
	家庭收入	1:收入小于1 000	3%	1.229	<0.1%	1.337
		2:收入为1 000~3 000	45.6%		0	
		3:收入为3 000~5 000	28.2%		0.2%	
		4:收入为5 000~7 000	12.7%		4.1%	
		5:收入为7 000~10 000	6.2%		5.5%	
		6:收入为10 000~12 000	2.7%		14.7%	
		7:收入为12 000~15 000	0.8%		24.9%	
		8:收入为15 000~20 000	0.9%		34.9%	
		9:收入为20 000~25 000	<0.1%		13.4%	
		10:收入为25 000~30 000	0		2.0%	
		11:收入为30 000以上	0		0.2%	
		学历	1:小学及以下		14.2%	
2:中学	55.7%		45.0%			
3:大专、本科及以上	30.1%		43.0%			

注:性别与年龄变量的括号中为杭州市统计年鉴数据。

兴趣点(Point of interest,POI)数据因其庞大的数据量、高精度的坐标位置以及丰富的建成环境信息而备受青睐。每条POI记录都包含名称、类型以及经纬度坐标等信息,能够精确地描绘出建筑环境和城市设施在地图上的具体位置和分布。因此,本文利用POI数据提取建成环境属性,以期更准确地反映实际建成环境的情况。

本文数据涵盖了13种不同类型的POI数据,包括餐饮服务、风景名胜、公共设施、购物服务、交通设施服务、金融保险服务、科技文化服务、商务住宅、生活服务、体育休闲服务、医疗保险服务、政府

机构及社会团体、住宿服务。根据《城市综合交通体系规划标准》(GB/T 51328—2018),本文提取了交通设施服务POI中公交车站和地铁站的地理位置信息,计算居民居住地半径500 m缓冲区内的公交车站点数量和半径800 m缓冲区内的地铁站点数量,并以此表征公交邻近度指标。

密度维度由人口密度表征,这一指标依据2010年和2020年全国人口普查数据以及杭州市街道面积统计信息综合计算得到。多样性维度则通过土地利用混合度这一指标衡量。土地利用混合度是指居住地附近POI类型的多样性和丰富程

度,用熵指数^[1]定量分析,具体计算公式如下:

$$L_i = \frac{-\sum P_{ij} \cdot \ln P_{ij}}{\ln N_i} \quad (1)$$

式中: L_i 为第*i*个缓冲区内的土地利用熵指数; P_{ij} 为第*i*个缓冲区内第*j*种POI数量占总数的比例; N_i 为第*i*个缓冲区内包含POI的类型数量。

土地利用混合度的值在0~1之间,值越接近1,说明该区域的土地POI类型越丰富。

设计维度在本文中通过路网密度表征,包括快速路、主干路、次干路和支路的密度,根据路网级配比综合相加得到,路网数据来源于OpenStreet-Map平台,并借助ArcGIS软件对缓冲区内各类型路网密度进行统计和分析。目的地可达性维度则用商圈易达性表征,即居住地到最近商圈的距离,通过百度地图开放平台进行最短路径计算,商圈共选用杭州市最大的10个商圈,包括武林商圈、湖滨商圈、吴山商圈、钱江新城商圈、滨江商圈、人民广场商圈、申花商圈、新天地商圈、下沙商圈、西溪商圈,取最近商圈距离的倒数作为指标。

2 非线性模型构建

梯度提升决策树(Gradient boosting decision tree, GBDT)模型是一种通过迭代训练弱分类器(决策树)构建最优模型的机器学习方法。它在工业界的多个领域得到了广泛应用,近年来在交通领域也获得了广泛的关注和应用^[1,3-5,13,15-19]。与传统的统计学模型相比,GBDT模型具有以下几个显著优势:①可以更好地拟合数据;②能够灵活处理各类型数据,无论是连续变量还是分类变量;③对异常值具有较强鲁棒性,抗干扰能力强;④可以揭示自变量与因变量之间的非线性关系,不需要自变量服从正态分布,解决了多重共线性问题。

此外,与其他机器学习模型(如支持向量机(Support vector machine, SVM)或神经网络(Neural network, NN))相比,GBDT模型也兼具树模型的优点,有更好的可解释性,可以通过输出特征相对重要性、非线性部分依赖图(Partial dependence plots, PDP)以及结合沙普利加性解释(SHapley additive explanation, SHAP)等方法解释自变量与因变量之间的非线性关系。

近年来,为了在保持模型准确率的同时提高GBDT模型的训练速度,并更好地处理大规模数据,微软亚洲研究院^[20]提出了LightGBM。相

较于其他传统基于树的学习算法,LightGBM模型在训练速度、计算效率和预测准确性等方面均实现了显著提升,广泛应用于出行分类、交通方式预测、目的地识别等任务。LightGBM模型的核心在于其采用改进的直方图算法(见图2)进行决策树学习。对于一维特征(如年龄),该算法通过离散化分箱生成梯度统计直方图,每个分箱存储梯度累加值和样本频数;对于多维特征,则采用基于梯度排序的特征并行化分割策略,通过互斥特征绑定技术实现高效多维空间划分。相较于传统GBDT算法,该方法通过直方图降维、基于梯度的单边采样(Gradient-based one-side sampling, GOSS)及直方图差加速技术,在保持分割精度的同时显著提升训练速度,并降低75%内存占用,有效解决了高维稀疏数据场景下的计算效率瓶颈问题。

此外,LightGBM模型还改进了分裂策略,传统GBDT采用的是深度分裂策略(见图3(a))构建决策树,这种策略在每个层次上对所有节点进行分裂,导致计算效率不高。而LightGBM引入了叶分裂策略(见图3(b)),在每一层选择分裂效益最大的节点从而更高效利用节点信息,减少无效的节点分裂,大幅提高了模型训练速度。

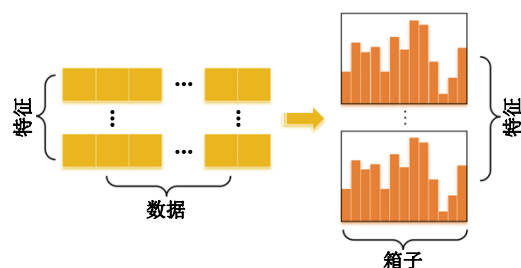


图2 直方图算法

Fig. 2 Histogram algorithm

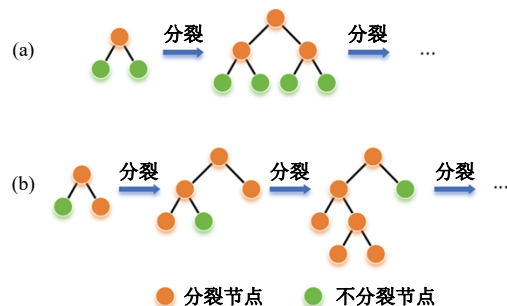


图3 决策树分裂策略

Fig. 3 Splitting tactics of decision tree

本文分别对4种树模型进行建模比较,结果发现LightGBM模型在解释方差、均方根误差、均方误差、相对绝对误差4个评价指标中均优于其他3个模型,如图4所示。

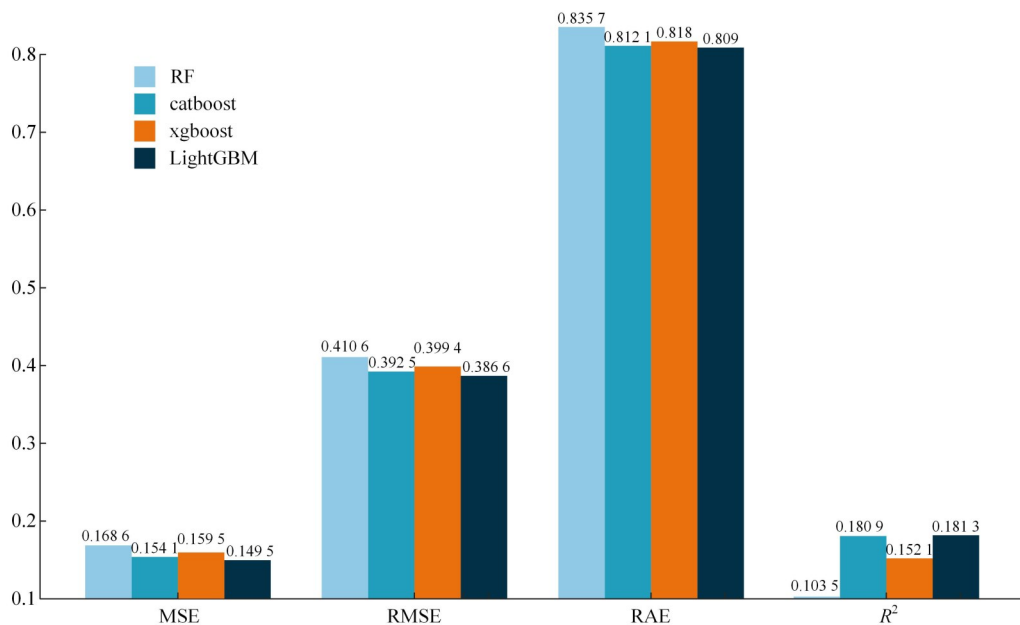


图 4 机器模型效果对比图

Fig. 4 Machine model effect comparison chart

3 结果及分析

本文构建了 LightGBM 模型,具体如表 2 所示。总体而言,建成环境属性对小汽车保有和使用的影 响显著,但从 2010 年到 2023 年建成环境的影响显著减弱,从 2010 年的 30.75%、18.91% 下降至 2023 年的 16.19%、10.86%,这与其他学者^[6,7,15]的研究结果相符。其中,人口密度因素在 2010 年对居民小汽车依赖影响最大,而道路密度因素在 2023 年对居民小汽车依赖影响最大。

表 2 变量相对重要性

Table 2 Feature importance		小汽车保有量/%		小汽车出行占比/%	
变量		2010 年	2023 年	2010 年	2023 年
社会经济属性	家庭收入	28.89	37.13	16.19	6.52
	年龄	18.52	22.29	31.76	41.46
	学历	11.48	24.39	12.49	5.4
	性别	10.37	0.92	20.7	34.08
建成环境属性	人口密度	16.05	2.54	9.38	3.22
	商圈易达性	5.91	3.17	4.33	1.49
	道路密度	6.21	4.02	4.26	3.66
	公交邻近度	1.41	3.44	0.4	1.71
	土地利用混合度	1.17	2.1	0.49	2.47

3.1 单因素非线性分析

为了深入分析各因素对居民小汽车依赖的具体影响,本文绘制了部分依赖图,如图 5 和图 6 所示。

在小汽车保有量分析中,图 5(a)~(c)反映了不同时期社会经济因素对居民小汽车保有量的不同影响,图 5(d)~(h)则反映了不同时期建成环境因素对小汽车保有量的影响。由图 5(a)可见,2010 年和 2023 年的年龄因素对居民小汽车保有量影响不同,在 2010 年,40~50 岁的居民小汽车保有量最多,且 60 岁以上居民明显更少保有小汽车;在 2023 年,30 岁左右的居民小汽车保有量最多,且在各年龄段分布更均衡,可见随着时代变化,居民小汽车保有量呈均衡化和年轻化。图 5(b)(c)反映了相较于 2010 年,在 2023 年不同学历和家庭收入群体中小汽车保有量的差距缩小。由图 5(d)可知,在 2010 年人口密度因素与小汽车保有量呈负相关,居住地人口密度越大,居民的小汽车保有量越少;而在 2023 年,不同人口密度区域居民的小汽车保有量无明显区别,人口密度因素的影响显著降低。由图 5(e)可看出,2023 年土地利用混合度更高,但对小汽车保有量的影响更小。由图 5(f)可见,2010 年和 2023 年商圈易达性因素均与小汽车保有量呈负相关,但 2023 年商圈易达性因素的影响更小。由图 5(g)可见,不同时期的差别主要在高道路密度区域,2010 年高道路密度区域居民小汽车保有量较低,而 2023 年则与其他区域居民相比无明显降低。在 2010 年,当出发地周围超过 10 个公交或地铁站点时,公交邻近度对小汽车保有量的影响显著降低,而在

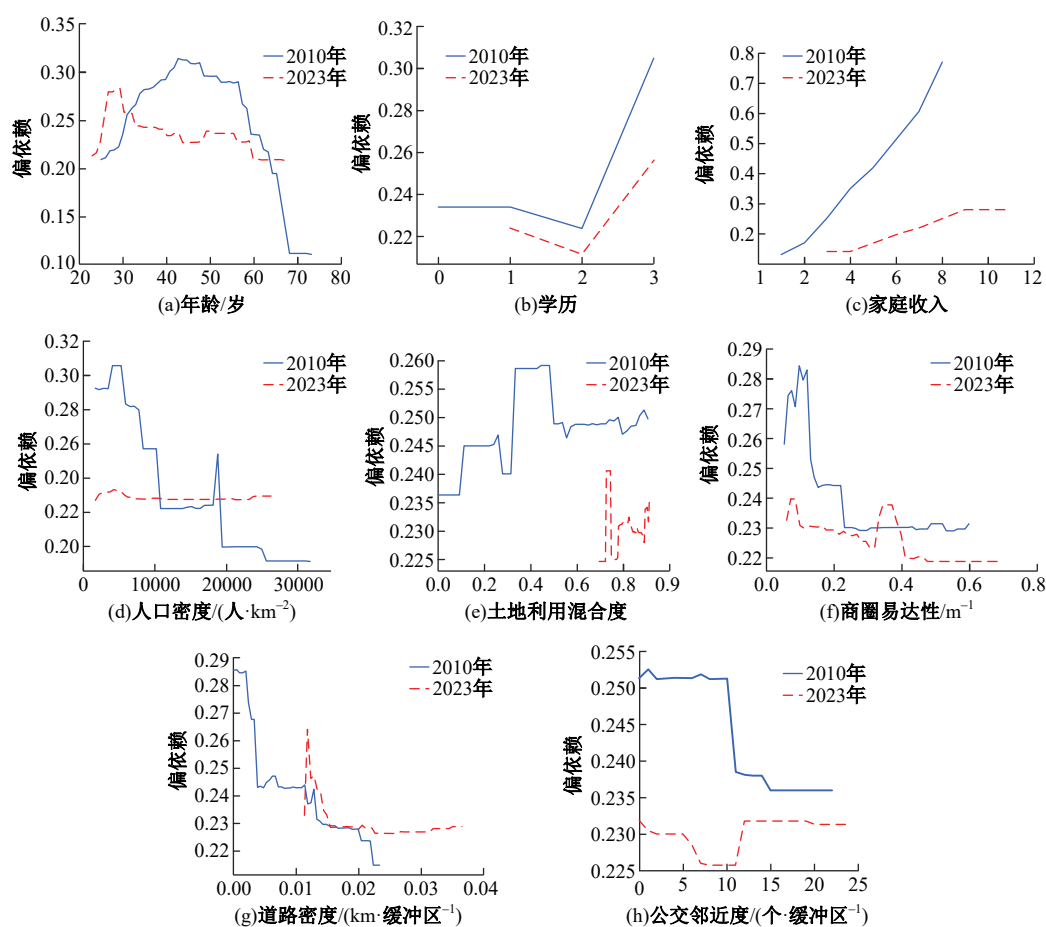


图5 各变量对小汽车保有量的非线性效应

Fig. 5 Nonlinear effects of various variables on car ownership

2023年公交邻近度却有一定升高,这说明公共交通的建设能降低居民小汽车保有量,但当整体公共交通设施建设完善后,继续建设公共交通设施对居民小汽车保有量的降低没有帮助。

在小汽车使用占比分析中,图6(a)~(c)反映了不同时期社会经济因素对居民小汽车出行占比的影响;图6(d)~(h)则反映了不同时期建成环境因素对小汽车出行占比的影响。年龄因素在不同时期的影响差别不大,在2010年,28~45岁的居民小汽车出行占比较高,而在2023年,则为25~50岁,范围略有扩大。不同于2010年,在2023年不同学历居民小汽车出行占比区别不大,而家庭收入因素则与居民小汽车出行占比呈正相关,家庭收入越高,居民小汽车出行占比越高。在图6(d)中,低人口密度区域居民的小汽车出行占比较高,在2010年拐点为10 000人/km²,居住在人口密度高于10 000人/km²的居民的小汽车出行占比显著较低,而在2023年拐点为5 000人/km²,且高于拐点的居民仍有较高的小汽车出

行占比,这说明低人口密度区域居民由于位置偏远更依赖小汽车,而随着经济发展,在2023年高人口密度区域居民的小汽车出行占比也较高。2023年土地利用混合度更高更均衡,对小汽车出行占比有负影响,土地利用混合度越高,居民小汽车出行占比越低,这说明随着城市各功能建设完善,居民出行需求可以更多在家附近实现,小汽车出行依赖会降低。在商圈易达性因素分析中,2010年商圈易达性越高,小汽车出行占比越低,而到2023年,随着商圈分布更多更均衡,对小汽车出行占比影响变小。在图6(g)中,道路密度与小汽车出行占比呈负相关,且随着道路密度进一步完善,该负影响会变得更大,说明更合理、密集的道路建设对小汽车出行减少有帮助。

3.2 双因素交互分析

为了深入探究多个特征属性与居民的小汽车依赖行为的关系,本文基于SHAP方法,引入双因素交互分析,揭示不同特征属性间的交互影响。如图7所示(彩图参见电子版,后文同),依赖图中

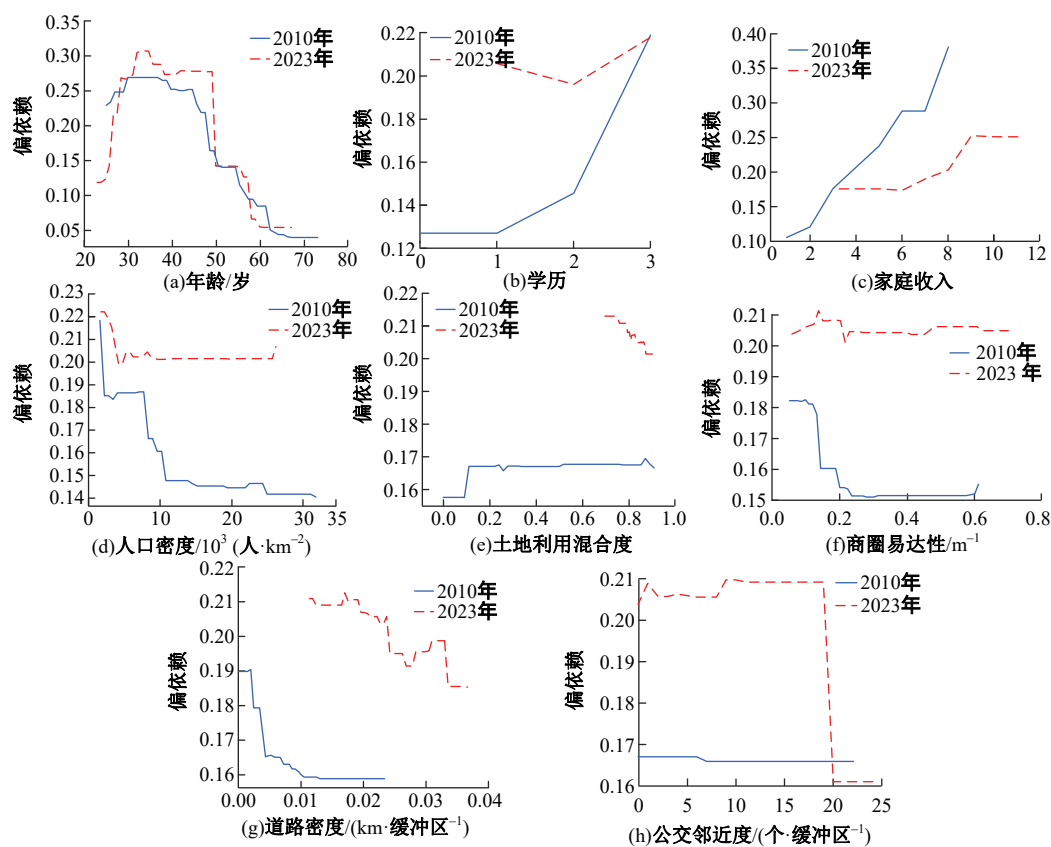


图6 各变量对小汽车出行占比的非线性效应

Fig. 6 Non-linear effects of various variables on car share

横轴表示人口密度因素的取值,纵轴为人口密度因素与家庭收入因素交互作用下对模型预测结果的 SHAP value (SHAP 贡献值)。颜色表示家庭收入水平高低,红色越深值越大,蓝色越深值越小。灰色直方图反映样本量随人口密度变化的分布情况。

上文分析中发现,人口密度因素对小汽车保有量的影响在2023年显著减弱,因此本文结合家庭收入变化进行交互分析。图7表明,2023年家庭收入较2010年显著提升,导致不同人口密度区域居住居民的小汽车保有量差异缩小。当家庭收入普遍达到一定水平时,居住地建成环境变量对小汽车保有量的影响逐渐降低,而其他社会经济因素的作用更突出。

在小汽车出行分析中存在一个有趣的现象,在2010年和2023年中,人口密度和道路密度因素均对小汽车出行存在负向影响,这与 Milakis 和 Ding^[21,22]等的研究结论一致,但在2023年的交互作用分析图中有显著阈值效应,右上角存在明显的反趋势点。因此,本文进一步分析了道路密度、人口密度与社会经济属性对小汽车出行占比的交

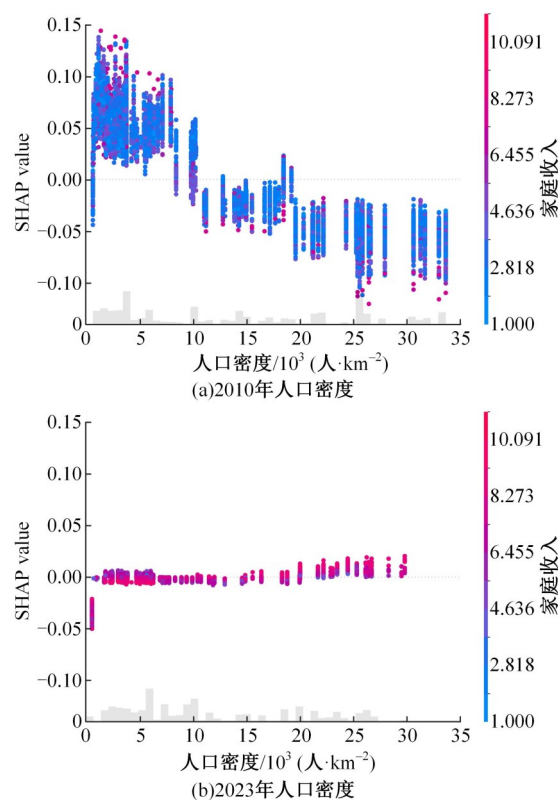
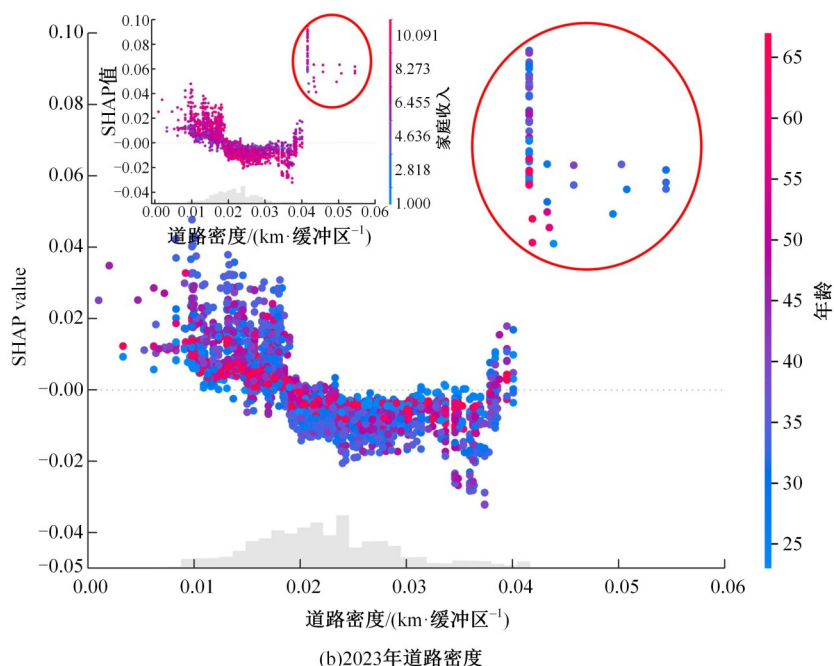
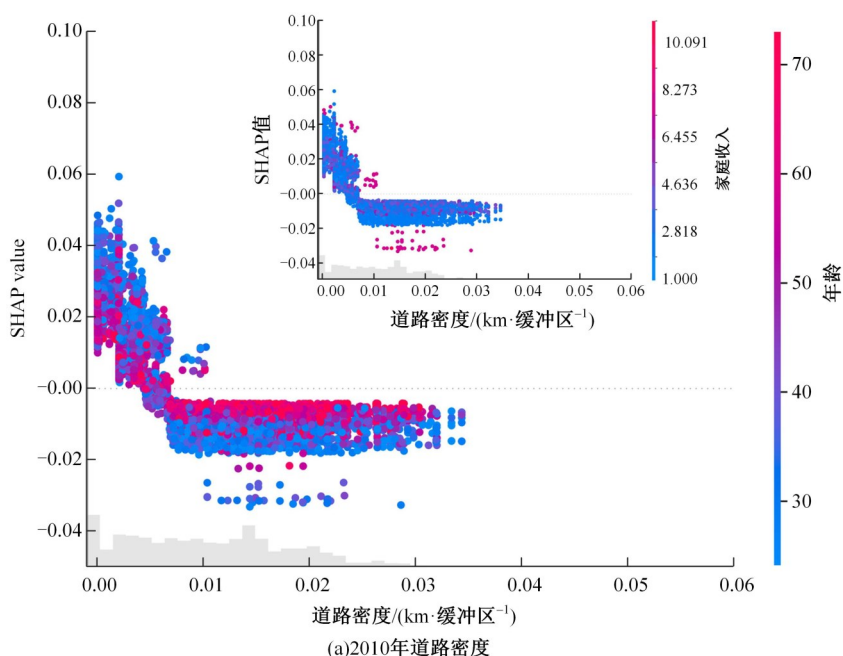


图7 对小汽车保有量的交互作用

Fig. 7 Interaction effects on car ownership

互影响,结果如图8所示。经交互分析可知,居住地人口密度超过 20 000 人/ km^2 或道路密度超过 0.04 km/缓冲区单位的群体中,中老年群体的小汽车出行占比较低,而中高收入青年群体的小汽车出行占比较高。一般而言,青年群体对出行成本的敏感性较高,更高人口密度、道路密度的居住地有着更便利的公共交通条件,青年群体会减少其小汽车出行占比。在徐浩文等^[23]的研究中发现,高收入群体选择小汽车出行概率更高,其出行成本敏感性更低,因此产生本文现象的主要原因是青年群体拥有中高收入(即月收入大于 10 000

元),其出行成本敏感性显著下降且对出行舒适度要求显著上升,因而更多选择小汽车出行。因此,在公共交通建设中应加强公共交通的舒适性、便捷性,以提升其对青年群体的吸引力,降低其小汽车出行占比。此外,这也反映了随着经济的发展,居民小汽车出行使用受社会经济属性影响更大,而受居住地建成环境因素影响显著减弱,说明在 2010 年可以通过改变建成环境因素来调节居民对小汽车的依赖,但随着建成环境的逐步完善,再通过改变建成环境来调节居民对小汽车的依赖效果已不明显。因此,建议相关政策决策注意阈值



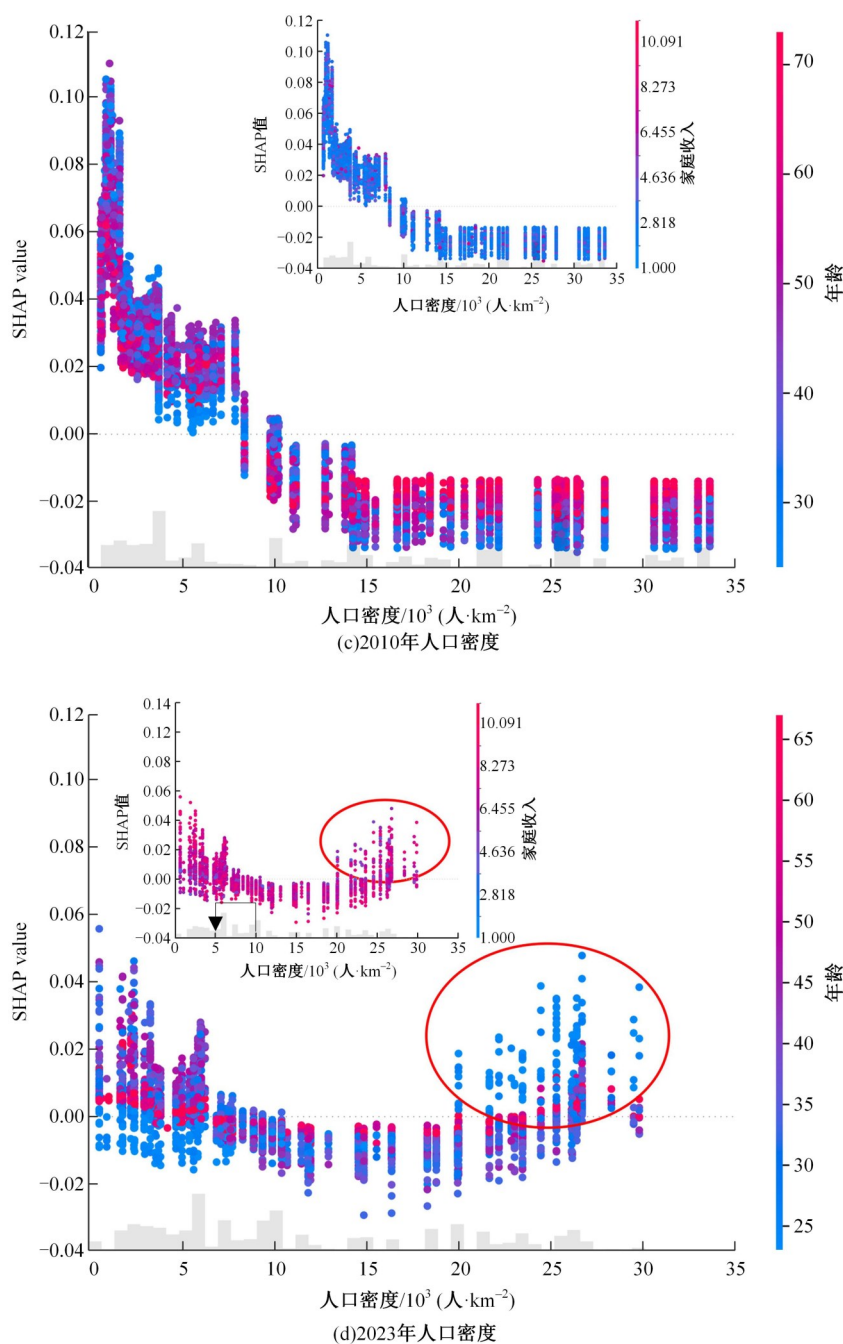


图 8 对小汽车出行占比的交互作用

Fig. 8 Interaction effects on proportion of car trips

效应和群体区分,更合理、均衡地规划建设建成环境,将更多注意力转移到交通需求管理中。

4 结 论

(1) 本文构建的 LightGBM 模型精准捕捉了建成环境属性与居民小汽车依赖之间的非线性关系。不同时期建成环境因素对居民小汽车依赖的影响存在显著差异。

(2) 2010 年,人口密度是影响小汽车保有量

及出行占比的主导因素;而 2023 年,道路密度取代人口密度成为关键影响因素,且人口密度的影响显著降低。在 2010 年,低人口密度区域居民由于位置偏远更依赖小汽车出行,随着经济的发展,在 2023 年,高人口密度区域居民的小汽车出行占比也较高。道路密度与小汽车出行占比呈负相关,合理、密集的道路建设有助于减少小汽车出行。

(3) 与 2010 年相比,2023 年建成环境属性对

居民小汽车依赖的影响程度明显减弱,居民小汽车保有量和出行占比也得到有效控制。当家庭收入普遍达到一定水平时,居住地建成环境变量对小汽车保有量的影响逐渐降低,而其他社会经济因素的作用更突出。随着建成环境的完善,尤其是地铁等公共交通的发展,居民小汽车依赖的增长得到了有效抑制。

(4)有趣的发现是,2010年高人口和道路密度区域居民的小汽车出行占比较低,而在2023年,该区域中高收入青年群体的小汽车出行占比却呈现出明显的阈值效应,即有较高的小汽车出行占比。这表明随着建成环境的逐渐完善,应从建成环境的规划建设逐步转向交通需求管理等,分析不同人群出行需求,准确把握阈值效应的影响,以避免建设资源浪费及过度建设带来的负向效应。

参考文献:

- [1] Shao Q, Zhang W, Cao X J, et al. Nonlinear and interaction effects of land use and motorcycles/E-bikes on car ownership[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 102: No. 103115.
- [2] 袁晓瑞. 多尺度建成环境对小汽车拥有行为的影响研究[D]. 南京: 南京林业大学汽车与交通工程学院, 2023.
Yuan Xiao-rui. Research on the impact of multi-scale built environment on car ownership behavior[D]. Nanjing: College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, 2023.
- [3] Wu L, Yuan X, Yin C, et al. Car ownership behavior model considering nonlinear impacts of multi-scale built environment characteristics[J]. *Sustainability*, 2023, 15(12): No. 9658.
- [4] 尹超英, 邵春福, 黄兆国, 等. 基于梯度提升决策树的多尺度建成环境对小汽车拥有的影响[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2022, 52(3): 572-577.
Yin Chao-ying, Shao Chun-fu, Huang Zhao-guo, et al. Investigating influences of multi-scale built environment on car ownership behavior based on gradient boosting decision trees[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(3): 572-577.
- [5] Cao J, Jin T, Shou T, et al. Investigating the nonlinear relationship between car dependency and the built environment[J]. *Urban Planning*, 2023, 8(3): 41-55.
- [6] 王晓全, 邵春福, 尹超英, 等. 考虑空间不确定效应的建成环境对出行频率的影响[J]. *交通工程*, 2023, 23(6): 21-26.
Wang Xiao-quan, Shao Chun-fu, Yin Chao-ying, et al. Exploring the impacts of built environment on travel frequency considering spatial uncertainty[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2023, 23(6): 21-26.
- [7] 王晓全. 职住地建成环境影响下居民小汽车依赖行为分析与建模[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2022.
Wang Xiao-quan. Analysis and modelling of residents' car dependence under the impacts of residential and workplace built environment[D]. Beijing: School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 2022.
- [8] Wang X, Shao C, Yin C, et al. Exploring the influence of built environment on car ownership and use with a spatial multilevel model: a case study of Changchun, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(9): No. 1868.
- [9] Yin C, Shao C, Wang X. Exploring the impact of built environment on car use: does living near urban rail transit matter?[J]. *Transportation Letters*, 2020, 12(6): 391-398.
- [10] Chowdhury T, Scott D M. An analysis of the built environment and auto travel in Halifax, Canada[J]. *Transport Policy*, 2020, 94: 23-33.
- [11] Wang X, Shao C, Yin C, et al. Exploring the relationships of the residential and workplace built environment with commuting mode choice: a hierarchical cross-classified structural equation model[J]. *Transportation Letters*, 2022, 14(3): 274-281.
- [12] Sun Y, Susilo Y O, Waygood E O D, et al. Detangling the impacts of age, residential locations and household lifecycle in car usage and ownership in the Osaka metropolitan area, Japan[J]. *Journal of Zhejiang University—Science A*, 2014, 15(7): 517-528.
- [13] 江捷, 吴娇蓉, 陈澍. 建成环境对居民小汽车依赖影响研究进展简介[J]. *交通与运输*, 2023, 36(增刊1): 205-208.
Jiang Jie, Wu Jiao-rong, Chen Shu. Overview of association of the built environment with residents' car dependence[J]. *Traffic & Transportation*, 2023, 36(Sup. 1): 205-208.
- [14] 杭州市统计局. 2023年杭州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [15] 王晓全, 邵春福, 管岭, 等. 基于机器学习模型的建成环境对小汽车拥有行为的影响[J]. *交通运输系统*

- 工程与信息, 2020, 20(4): 173-177.
- Wang Xiao-quan, Shao Chun-fu, Guan Ling, et al. Exploring influences of built environment on car ownership based on a machine learning method[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(4): 173-177.
- [16] 尹超英, 陆颖, 邵春福, 等. 考虑空间自相关的建成环境对通勤方式选择的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(7): 1994-2000.
- Yin Chao-ying, Lu Ying, Shao Chun-fu, et al. Impacts of built environment on commuting mode choice considering spatial autocorrelation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(7): 1994-2000.
- [17] 王振科, 白云鹏. 社区建成环境对中等收入群体机动车行驶里程的非线性影响模型[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2023, 37(5): 159-168.
- Wang Zhen-ke, Bai Yun-peng. A nonlinear impact model of community built environment on vehicle miles traveled of middle-income groups[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2023, 37(5): 159-168.
- [18] 吴静娴, 唐桂孔, 李文翔. 建成环境对共享单车分时骑行量的非线性作用研究——以上海市为例[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(1): 290-298, 310.
- Wu Jing-xian, Tang Gui-kong, Li Wen-xiang. Non-linear effect of built environment on bike-sharing ridership at different time periods: a case study from Shanghai[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(1): 290-298, 310.
- [19] Cheng L, de Vos J, Zhao P, et al. Examining non-linear built environment effects on elderly's walking: a random forest approach[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 88: No.102552.
- [20] Ke G, Meng Q, Finley T, et al. Lightgbm: a highly efficient gradient boosting decision tree[C]//Advances in Neural Information Processing Systems, Long Beach, CA, USA, 2017: 3146-3154.
- [21] Milakis D, Cervero R, van Wee B. Stay local or go regional? Urban form effects on vehicle use at different spatial scales: a theoretical concept and its application to the San Francisco Bay Area[J]. Journal of Transport and Land Use, 2015, 8(2): 1-16.
- [22] Ding C, Zhou X, Cao X J, et al. Spatial and mediation analysis of the influences of residential and workplace built environments on commuting by car[J]. Transportation research part A: Policy and Practice, 2023, 171: No.103662.
- [23] 徐浩文, 李志学, 黄中祥. 基于城市空间均衡的居民出行方式选择[J]. 系统工程, 2023, 41(5): 77-83.
- Xu Hao-wen, Li Zhi-xue, Huang Zhong-xiang. Travel mode selection of residents under urban spatial equilibrium[J]. Systems Engineering, 2023, 41(5): 77-83.