

DOI: 10.20103/j.stxb.202410012404

张高峰, 孔繁花, 胡宏. 不同类型社区居民低碳更新支付意愿及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(10): 4667-4680.

Zhang G F, Kong F H, Hu H. Research on residents' willingness to pay for low-carbon neighborhood renewal and its influencing factors in different types of neighborhoods. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4667-4680.

不同类型社区居民低碳更新支付意愿及其影响因素

张高峰¹, 孔繁花², 胡 宏^{1,3,4,*}

¹ 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

² 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

³ 南京大学城市 AI 与绿色人居环境营造省高校重点实验室, 南京 210093

⁴ 江苏省智慧城市研究基地, 南京 210093

摘要:既有低碳社区建设的研究成果丰富,但多关注新建社区的低碳技术应用,鲜有分析不同类型社区居民对低碳更新的支付意愿差异及驱动机制。从社区类型差异切入,基于南京市中心城区 35 个社区 765 份有效问卷,采用离散选择模型和 XGboost 算法解析不同类型社区居民的低碳更新支付意愿及主要影响因素。结果表明,社区分异对居民的低碳更新支付意愿存在显著影响,传统社区和城中村的居民整体支付意愿较低,更注重更新建筑维护结构;普通商品房小区居民具有较高支付意愿,对门窗改造和空调系统更为关注;绿色商品房小区居民对于墙体外保温、清洁能源设施和社区更新的支付意愿最高;除社区类型外,家庭年收入、居住环境满意度、社会责任感、低碳知识水平等是影响居民低碳更新支付意愿的主要因素。研究可为社区低碳更新提供适应性和精细化策略参考,完善低碳社区自下而上的建设路径。

关键词:居住分异;社区低碳更新;支付意愿;离散选择模型;XGBoost 算法

Research on residents' willingness to pay for low-carbon neighborhood renewal and its influencing factors in different types of neighborhoods

ZHANG Gaofeng¹, KONG Fanhua², HU Hong^{1,3,4,*}

¹ School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

² School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

³ Key Laboratory of Urban AI and Green Built Environment of Provincial Higher Education Institutes, Nanjing University, Nanjing 210093, China

⁴ Jiangsu Smart City Research Base, Nanjing 210093, China

Abstract: Extensive research has been conducted on low-carbon neighborhood construction; however, most studies primarily focus on the application of low-carbon technologies in newly built neighborhoods. Relatively few studies have examined variations in residents' willingness to pay for low-carbon renewal in existing neighborhoods or the underlying driving mechanisms across different neighborhood types. This study addresses this gap by investigating the willingness to pay for low-carbon renewal and identifying key factors influencing residents' preferences across different neighborhood types. The analysis is based on 765 valid questionnaires collected from 35 neighborhoods in the central area of Nanjing, China, utilizing a discrete choice model in combination with the XGBoost algorithm. The findings indicate that neighborhood type plays a significant role in shaping residents' willingness to pay for low-carbon renewal. Specifically, residents of traditional neighborhoods and urban villages exhibit a lower willingness to pay, primarily focusing on upgrading building maintenance structures. In contrast, residents of conventional commodity housing demonstrate a higher willingness to pay, prioritizing

基金项目:国家自然科学基金项目(42271202);科技部国家重点研发计划(2022YFF1303102)

收稿日期:2024-10-01; **采用日期:**2025-03-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: h.hu@nju.edu.cn

improvements to windows and doors, as well as air conditioning systems. Notably, residents of green commodity neighborhoods display the highest willingness to pay, emphasizing investments in wall insulation, clean energy facilities, and neighborhood-level renewals. Socio-economic characteristics play a crucial role in influencing residents' willingness to pay for low-carbon renewal. Family annual income is positively correlated with willingness to pay, exhibiting a significant increase when income surpasses 300,000 yuan. Satisfaction with the living environment demonstrates a polarization effect, residents who express either high or low levels of satisfaction tend to exhibit stronger willingness to pay. Sufficient social environmental responsibility and knowledge of carbon metabolism and knowledge of low-carbon technologies consistently enhances the willingness to pay. In terms of rental status, owner-occupiers display significantly higher willingness to pay compared to renters. Additionally, an increasing number of family members and elevated energy consumption further contribute positively to willingness to pay. Residents who have resided in their neighborhood for less than 20 years or more than 40 years show markedly higher willingness to pay. Furthermore, there exists a positive correlation between age and willingness to pay. Education level also reveals a nonlinear relationship with willingness to pay, individuals possessing a college degree demonstrate substantially greater willingness to pay compared to those holding only a senior high school diploma or lower educational qualifications. This study offers valuable insights for developing adaptive and refined strategies for neighborhood low-carbon renewal, ultimately contributing to a more effective, bottom-up approach for low-carbon neighborhood construction.

Key Words: residential segregation; neighborhood low-carbon renewal; willingness to pay; discrete choice model; XGBoost algorithm

社区碳排放是城市碳排放的重要来源构成^[1]。随着城市社会经济水平提升和居民消费需求升级,社区碳排放呈现逐年增长趋势,社区低碳更新日益成为城市实现“双碳”目标的重要抓手^[2]。国内外对于社区低碳更新的研究多关注降低碳排放量的低碳技术应用,包括绿色建筑、能源系统、水资源利用、固体废弃物处理、环境美化以及居民生活减碳等研究内容^[3],在计算社区碳排放量的基础上使用投入产出模型^[4]、机器学习算法^[5]、能值分析^[6]等方法识别社区碳排放特征与减碳潜力,进而在建筑、能源、环境等方面提出针对性的低碳更新策略。近年来,居民在社区低碳更新中的行为意愿日益受到重视,研究表明低碳社区建设推广不仅需要政府自上而下的建成环境改造,也需要社区居民自下而上的主动参与^[7]。社区居民是社区精细化治理的重要主体,其更新意愿直接影响社区低碳更新的实施与管理^[8]。现有关于社区低碳更新意愿的研究主要集中在识别和分析影响居民参与低碳更新的因素^[8-11]。这些因素可归纳为外部因素与内部因素两大类。外部因素主要包括社会影响、政策引导等外生性因素。研究表明,低碳更新相关的政策支持、宣传教育及低碳技术市场信息对居民的低碳更新意愿具有显著的正向影响。而内部因素则主要涵盖居民的社会经济特征,已有研究表明家庭收入水平^[12]、住房租住情况^[13]等显著影响居民的低碳更新意愿。居民会基于其个体情况对低碳更新带来的价值进行权衡,即对低碳更新的性价比进行判断。例如,租户通常因产权问题而表现出较低的低碳更新意愿^[13]。此外,居民的社会责任感^[8]、低碳认知^[14]等个体特征也对低碳更新意愿产生重要影响。尽管当前研究针对居民低碳更新意愿已有一定探索,但主要是通过问卷调查结合李克特量表等方法对低碳更新意愿进行评估,难以全面反映居民的低碳更新支付能力与支付意愿,且鲜有研究对社区居民低碳更新支付意愿的影响机制进行深入分析,这在一定程度上限制了社区低碳更新实践推广。

居民的社区低碳更新支付意愿是居民愿意且能够为社区实施低碳改造而付出的成本。基于居民支付意愿而开展的社区低碳更新可以体现居民自下而上参与社区低碳更新的需求,对于低碳社区建设具有重要意义。居民对于社区低碳更新的支付意愿受到社区类型分异的影响。伴随社会经济体制变革和城市空间快速扩张,我国的城市社区呈现居住分异现象^[15]。居住分异是指由于居民在个人收入、家庭结构、居住偏好等社会经济因素上的差异,导致其在居住区位和居住条件上的不同,表现出空间与社会的双重分异^[16]。其中,空

间分异主要体现为社区在土地产权、住宅特征和社会环境等方面的显著区别;而社会分异则体现在社区居民的经济收入、年龄等社会经济属性的差异。在空间与社会双重分异作用下,城市社区可划分为多种类型,包括传统社区、单位小区、保障房小区、城中村和商品房社区等。传统社区以历史街巷和传统建筑为主要特征,其社区环境较为陈旧,主要位于老城区;单位小区通常由企事业单位在工作地点附近自主建设;保障房小区主要由政府为低收入群体提供,房价较低,且多位于城市外围或郊区,其社区品质和公共服务设施的质量相对较低;城中村作为城市化进程中的特殊社区,土地归集体所有,建设过程具有较强的自发性,住宅建筑、社会环境及公共服务设施普遍缺乏统一规划,功能呈现混杂状态;商品房社区则为房地产市场的主体,由开发商针对不同收入群体提供不同档次的商品住宅,通常具备较高的整体社区品质。不同类型社区居民的低碳更新意愿与更新路径选择具有异质性^[17]。在发生土地利用功能转变的社区更新中,居民多愿意采用拆除重建方式更新,碳减排效果显著^[18];在历史文化街区和城中村等建筑结构老化、环境质量较差的老旧住区,居民多愿意采用维护修缮的更新方式,包括增加墙体保温层、更换中空玻璃等建筑维护结构改造以及生态环境修复等方面^[19];在建成年代较新、建筑与环境品质较好的商品房小区,居民较为接纳渐进式微更新理念,根据社区现状逐步进行建筑、环境、能源等方面的差异化改造^[20]。

已有研究和实践表明不同类型社区存在差异化的居民更新改造需求,然而鲜有研究基于不同类型社区视角和供需匹配目标探索居民低碳更新支付意愿及其影响因素^[21]。本研究从不同类型社区视角切入,构建低碳更新措施库,运用离散选择模型比较分析传统社区、单位小区、保障房小区、城中村、普通商品房小区以及绿色商品房小区共 6 类 35 个社区的居民在社区低碳更新中的支付意愿,进而运用 XGBoost 模型识别居民支付意愿的主要社会-经济-环境影响因素。研究成果可为适应性低碳更新的政策制定以及精细化社区治理提供借鉴。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区为南京市中心城区。南京市是国家历史文化名城和南京都市圈核心城市,2017 年被认定为国家低碳试点城市,2021 年被认定为国家首批城市更新试点城市。南京在社区分类和低碳更新方面都具有较好的代表性。结合已有研究^[22],本文按照传统社区、单位小区、保障房小区、城中村、普通商品房小区以及绿色商品房小区的分类方法选择了 35 个居住小区作为研究单元,具体包括 4 个传统社区,6 个单位小区,6 个保障房小区,3 个城中村,11 个普通商品房小区,5 个绿色商品房小区(图 1)。

1.2 技术路线

如图 2 所示,本研究首先根据已经在市场运行的低碳改造技术进行低碳改造措施库构建,包括住宅尺度低碳改造措施库和社区尺度低碳改造措施库。住宅低碳改造措施库具体涵盖门窗改造、墙体保温改造、清洁能源设施改造、空调系统改造、用水器具改造以及照明设施改造的不同水平。社区低碳改造措施库涵盖废弃物资源化利用、公共设施改造以及环境生态修复的不同水平。其次,研究运用 SPSS 软件的正交设计模块对低碳改造措施库进行正交设计,生成 64 套有代表性的低碳改造技术组合集供居民选择,简称选择集。本研究选取的低碳技术以及改造价格设定如表 1 所示,低碳更新选择集示例如图 3 所示。然后通过问卷调查收集居民的支付意愿信息,并基于 Stata 软件的 clogit 模型(离散选择模型)对居民支付意愿进行分析。最后,引入 XGBoost 算法识别居民低碳更新支付意愿的影响因素,并根据此提出推动南京市社区低碳更新的策略建议。

1.3 数据来源

本研究于 2023 年 4 月至 6 月在样本小区进行问卷调查。受访对象为居住在样本社区随机抽样的 18 岁以上居民。在正式调查之前,共对 30 名受访者进行了两轮预调查以提高问卷设计可行性。正式调查共收集 785 份有效问卷。调查内容包括受访者的社会经济特征(性别、年龄、家庭年收入收入、学历)、能源消费情况、

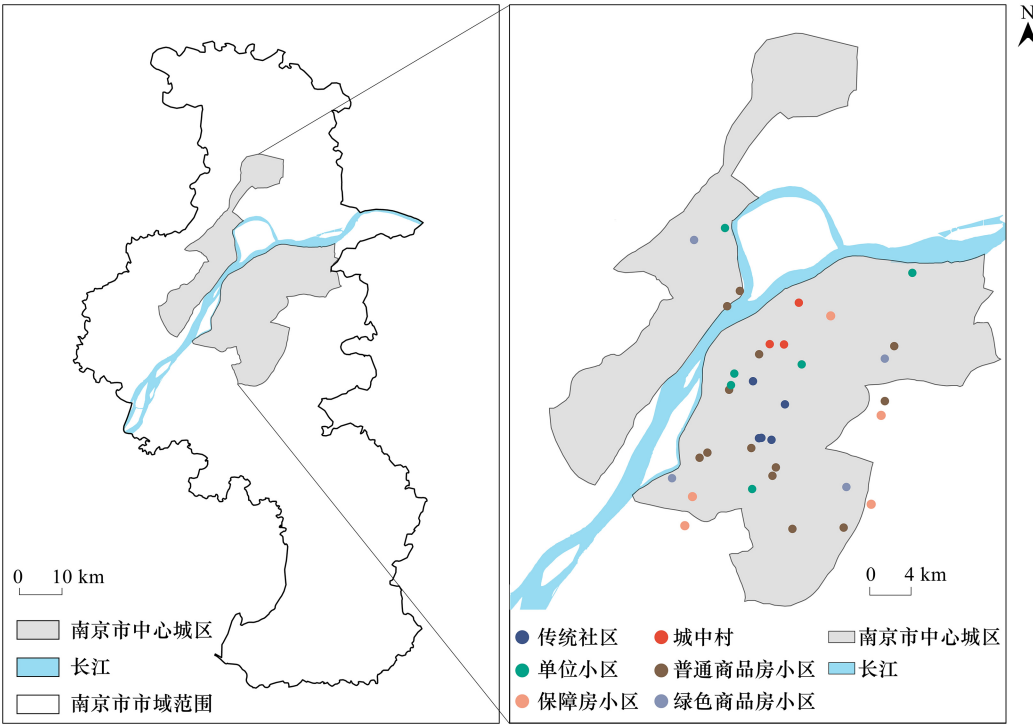


图 1 研究社区空间分布图
Fig.1 Spatial distribution of the study neighborhoods

居住环境满意度、本小区居住时长、租住情况、社会环境责任感、碳代谢知识了解程度、低碳技术了解程度以及低碳更新选择集的选择结果等信息(表 2)。为了避免受访者疲劳和确保回答的可信度,调研阶段将 64 套选择集分为 8 组,每组包含 8 套选择集,受访者随机分配到一组选择集。为方便受访者准确理解低碳技术及其改造成本,实地调研时向受访者展示说明低碳技术信息卡(图 4)。

表 1 离散选择模型的低碳更新技术设置与变量取值

Table 1 The variable settings and values in the experimental card of the Discrete Choice Model		
低碳更新技术 Low-carbon renewal techniques		变量取值 Attribute levels
建筑改造 Buildings level renewal	门窗改造	1.无改造;2.中空玻璃;3.窗户外遮阳;4.中空玻璃与窗户外遮阳;
	墙体外保温改造	1.无改造;2.隔热性能强材料;3.绿色环保材料;
	清洁能源设施改造	1.无改造;2.太阳能热水器;3.光伏发电板;4.太阳能热水器与光伏发电板;
	空调系统改造	1.无改造;2.节能空调;3.新风系统;
	用水器具改造	1.无改造;2.节水水龙头;3.节水水龙头与节水马桶;
社区更新 Neighborhood level renewal	照明设施改造	1.无改造;2.节能 LED 灯;
	废弃物资源化利用	1.无改造;2.垃圾分类;3.垃圾分类与雨污分流;
	公共设施改造	1.无改造;2.照明等公共设施清洁能源驱动;
改造价格 Cost	环境生态修复	1.无改造;2.闲置空间绿化;3.闲置空间与建筑屋顶绿化;
		1.200 元/m ² ;2.300 元/m ² ;3.400 元/m ² ;4.500 元/m ²

2 研究方法

2.1 离散选择模型

离散选择模型(Discrete Choice Model)是描述个体行为选择的模型,其基于效用最大化理论,通过分析受

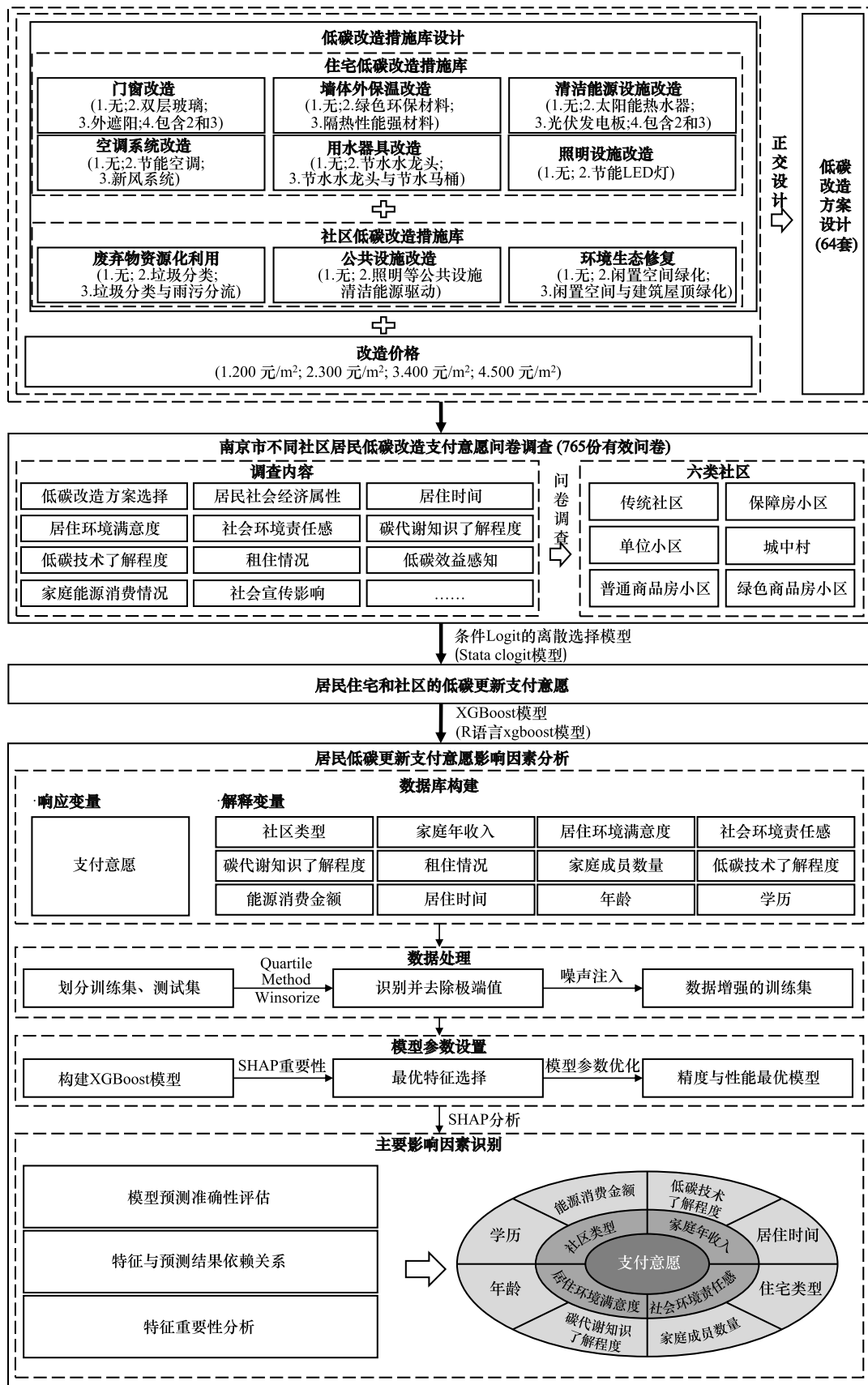


图2 技术路线

Fig.2 Technology roadmap

第1组			A □	B □	C □
改造价格			300 元/m ²	400 元/m ²	500 元/m ²
建筑改造	室外构造改造	门窗改造	中空玻璃与窗户外遮阳	无改造	中空玻璃
		墙体外保温改造	无改造	绿色环保材料	隔热性能强材料
		清洁能源设施改造	光伏发电板	太阳能热水器与光伏发电板	无改造
	室内设备更新	空调系统改造	新风系统	无改造	节能空调
		用水器具改造	节水水龙头	节水水龙头与节水马桶	无改造
		照明设施改造	无改造	节能LED灯	无改造
社区更新	能源回收利用	废物资源化利用	垃圾分类与雨污分流	无改造	垃圾分类
		公共设施改造	无改造	路灯等设施清洁能源驱动	无改造
	绿色空间改造	环境生态修复	无改造	闲置空间绿化	闲置空间与建筑屋顶绿化

图3 低碳更新选择集示例

Fig.3 Example of low-carbon renewal option sets

表2 六类社区居民社会经济特征

Table 2 Socio-economic characteristics of the respondents in six types of neighborhoods

居民特征 Socio-economic characteristics	传统社区 Traditional neighborhoods (N=84)	单位小区 Work units (N=141)	保障房小区 Affordable housing neighborhoods (N=147)	城中村 Urban villages (N=67)	商品房小区 Conventional commodity neighborhoods (N=229)	绿色住宅小区 Green commodity neighborhoods (N=97)
性别 Gender						
女性	50%	47%	50%	37%	48%	59%
男性	50%	53%	50%	63%	52%	41%
平均年龄 Average age	54	50	47	50	44	41
学历 Education level						
初中及以下	38%	31%	37%	51%	7%	8%
高中(含中专)	38%	19%	22%	33%	19%	16%
大学(含大专)及以上	24%	50%	41%	16%	74%	76%
家庭年收入 Family annual income						
<6 万元	22%	13%	18%	37%	2%	—
6—15 万元	52%	31%	38%	48%	17%	15%
15—30 万元	22%	33%	41%	15%	28%	26%
>30 万元	4%	23%	3%	—	53%	59%
平均居住时长 Average length of residence	41	19	5	20	8	6
平均居住环境满意度 Average living environment satisfaction	2.97	3.65	3.66	3.09	3.87	4.21
平均社会环境责任感 Average social environmental responsibility	3.91	4.13	3.93	3.90	4.25	4.52
平均碳代谢知识了解程度 Average knowledge of carbon metabolism	2.57	3.25	2.88	2.91	3.39	3.62
平均低碳技术了解程度 Average knowledge of low-carbon technologies	2.68	3.37	2.96	3.05	3.70	3.79

平均居住时长的单位为年,平均居住环境满意度、平均社会环境责任感、平均碳代谢知识了解程度、平均低碳技术了解程度均为 5 分制



图4 低碳技术信息卡的介绍说明图示

Fig.4 Low-carbon technology illustrated diagram

访者对不同商品或服务及其属性的偏好,进而揭示受访者内在的行为规律、估计支付意愿以及开展相关模型分析^[23]。本研究选择离散选择模型类别中的多项式 Logit 模型来评估不同低碳技术对受访者的效用价值。效用函数量化了每个低碳技术对每套低碳更新方案整体效用的增加程度,其函数表达式如下:

$$T_{ij} = r'_i \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, T_{ij} 是个体 i 选择更新方案 j 的效用; r_i 是方案属性的集合, 在本研究中为更新价格、门窗改造技术、墙体保温改造技术等; β_j 是更新方案 j 中各低碳更新技术的待估参数向量; ε_{ij} 为误差项。当 $T_{ij} > T_{im}$ ($m \neq j$) 时, 则个体选择方案 j 。因此, 个体 i 选择方案 j 的概率为:

$$P_i(j) = P(T_{ij} > T_{im}), m \neq j \quad (2)$$

将公式(1)代入至公式(2)中, 并假设 ε_{ij} 服从广义极值分布, 则多项式 Logit 模型可以计算出个体 i 选择更新方案 j 的概率为:

$$P_i(j) = \frac{\exp(r'_i \beta_j)}{\sum_{m=1}^J \exp(r'_i \beta_m)} \quad (3)$$

式中, J 为一套选择集, 多项式 Logit 模型可用最大似然法进行参数估计^[24], 通过量化一套选择集中选择某个选项的概率, 并评估该选项提供的价值或利益, 可以确定受访者对各种低碳更新方案进行权衡决策后的选择结果。

在估算出模型参数结果后, 就可以确定不同属性之间的边际替代率。如果一个属性与价格相关联, 则所得结果可解释为不同属性的边际支付意愿。支付意愿 (Willingness to pay, WTP) 的函数表达式如下:

$$\text{WTP} = \frac{\beta_{rl}}{\beta_{\text{price}}} \quad (4)$$

式中, β_{rl} 代表属性 r 的第 l 个水平的值, 本研究中则为更新内容 r 中低碳技术 l 的效用值; β_{price} 则是更新价格的效用值。如果某低碳技术的系数为正, 则表明与参考低碳技术相比, 受访者更愿意为具有该低碳技术的低碳更新方案支付更多的金钱。相反, 如果系数为负, 则表明如果具有该低碳技术的更新方案比参考水平便宜, 则受访者愿意购买。

2.2 XGBoost 算法

本研究使用极限梯度提升 (XGBoost) 算法对居民低碳更新支付意愿的影响因素进行识别。XGBoost 算法由 Chen 和 Guestrin 提出的一种监督式机器学习技术^[25], 其实质是一种新型的梯度提升决策树 (GBDT) 算法, 可用于观察响应变量和观察变量之间的非线性关系^[26], 适用于分类和回归任务^[27-28]。其具有运算效率高^[25, 27]、预测能力优越^[28]、数据类型限制少^[28]等优点。此外, XGBoost 算法可以添加 Lasso 正则化项 ($L1$) 和 Ridge 正则化项 ($L2$) 来在损失函数中添加惩罚项来控制模型复杂度, 以减少模型的过拟合来提高模型的泛化能力^[29]。XGBoost 由多个决策树组成, 其计算公式如下:

$$\hat{y} = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), \quad f_k \in F \quad (6)$$

式中, $\hat{y}$ 为预测值; K 表示决策树的数量; f_k 是样本 i 对应第 k 个模型的预测值; x_i 是样本 i 对应的特征向量; F 为所有树的集合。目标函数则有损失函数和正则化项组成, 其公式如下:

$$I(\phi) = \sum_{i=1}^m l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k) \quad (6)$$

$$\Omega(f_k) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|\omega\|^2 \quad (7)$$

式中, i 表示样本数; $I(\phi)$ 为目标函数; T 是决策树中叶节点数; ω 为训练样本中子节点的目标变量的平均值; γ 是 T 的惩罚系数; λ 是正则化项的惩罚系数。损失函数 $l(y_i, \hat{y}_i)$ 表示预测目标值与真实目标值之间的差距; 正则化项 $\Omega(f_k)$ 则用来控制模型的复杂度。

2.3 SHAP 解释方法

XGBoost 模型作为一种黑盒模型, 其准确性与泛化性较高, 但其输入特征变量如何影响预测结果却不得而知, 模型的可解释性较低^[30]。因此本研究引入 SHAP 分析方法以对 XGBoost 模型进行解释, 并可视化居民社会经济属性等特征变量与居民低碳更新支付意愿间的非线性关系。SHAP 是一种解释模型输出的方法, 其可以输出每个特征对机器学习模型预测的贡献, 常用于 XGBoost 等黑盒模型的解释^[31]。SHAP 模型会对每个样本计算出 Shapley 值, Shapley 值源于合作博弈论, 该值代表分配给每个特征的值的总和, 其计算公式如下:

$$\varphi_i = \sum_{S \subseteq \{c_1, \dots, c_p\} \setminus \{c_i\}} \frac{|S|! (p - |S| - 1)!}{p!} [f_c(S \cup \{c_i\}) - f_c(S)] \quad (8)$$

式中, φ_i 表示特征 i 的贡献; S 是模型的特征子集; c_p 是模型中的特征集; p 是特征数量; $f_c(S)$ 是特征子集中模型的预测值。如果 φ_i 大于 0, 则该特征被视为正向因子, 即对响应变量具有正向影响, 反之亦然。使用加性特征归因法计算 SHAP 值:

$$g(z') = \varphi_0 + \sum_{i=1}^M \varphi_i z'_i \quad (9)$$

式中, g 是解释模型; $z' \in \{0, 1\}^M$ 是联盟向量; M 是最大联盟大小; φ_i 则是特征 i 的 Shapley 值^[32]。

3 结果与分析

3.1 不同类型社区的居民低碳更新支付意愿分析结果

如表 3 所示, 总体样本的支付意愿结果表明中空玻璃与窗户外遮阳的组合技术以及新风系统是最受居民

表 3 六类社区受访者低碳更新支付意愿
Table 3 Respondents' willingness to pay for low-carbon renewal in the six types of neighborhoods

低碳更新技术 Low-carbon renewal techniques		全体样本 All sample (N=765)	传统社区 Traditional neighborhood (N=84)	单位小区 Work units (N=141)	保障性住房 Affordable housing neighborhood (N=147)	城中村 Urban village (N=67)	商品房小区 Conventional commodity neighborhoods (N=229)	绿色住宅 Green commodity neighborhoods (N=97)
建筑改造 Neighborhood level renewal	门窗改造	22824 ***	7857 ***	20952 ***	16638 ***	5559 ***	33311 ***	28160 **
	中空玻璃							
	窗户外遮阳	11059 ***	4518 ***	9464 ***	7283 ***	2659 *	18826 ***	16283
	中空玻璃与窗户外遮阳	26280 ***	7383 ***	23816 ***	19504 ***	5305 ***	41536 ***	39101 ***
	墙体外保温改造	17222 ***	4195 ***	13428 ***	11073 ***	3413 **	26742 ***	51578 ***
	绿色环保材料							
	隔热性能强材料	17286 ***	5905 ***	12279 ***	10937 ***	4356 ***	26522 ***	41262 ***
	清洁能源设施改造							
	太阳能热水器	10836 ***	2724 *	6216 *	4664 *	4518 **	17564 ***	34837 ***
	光伏发电板	14863 ***	4042 ***	12325 ***	10566 ***	4603 ***	22697 ***	32375 **
社区更新 Neighborhood level renewal	太阳能热水器与光伏发电板	17580 ***	4230 **	13200 ***	9470 ***	7571 ***	23498 ***	51625 ***
	空调系统改造	15088 ***	5021 ***	10465 ***	8621 ***	2763 **	35883 ***	18023 *
	节能空调							
	新风系统	22842 ***	5457 ***	21235 ***	14457 ***	4241 ***	46819 ***	28515 ***
	节水水龙头	9607 ***	1682	10983 ***	4469 **	2408 *	16253 ***	31067 ***
	节水水龙头与马桶	14013 ***	4529 ***	13074 ***	5698 ***	2207 *	28259 ***	39249 ***
	照明设施改造							
	节能 LED 灯	3444 ***	1448	1664	517	1442	8476 **	13447 *
	废弃物资源化利用	4865 ***	696	2387	5587 ***	2200 *	4052	16950 *
	垃圾分类							
公共设施改造 环境生态修复	垃圾分类与雨污分流	8443 ***	397	5038 **	7678 ***	3208 **	10782 **	24738 **
	路灯等设施清洁能源驱动	4628 ***	-115	2199	1487	2641 **	5088	25395 ***
	闲置空间绿化	6428 ***	-66	5365 **	5299 ***	2310 *	13984 ***	10196
	闲置空间与建筑屋顶绿化	5837 ***	-138	4452 *	3595 *	1564	14682 ***	20262 **

(1) * 表示在 $P<0.05$ 的水平上显著; ** 表示在 $P<0.01$ 的水平上显著; *** 表示在 $P<0.001$ 的水平上显著; (2) 各低碳更新技术支付意愿的值均是与不更新进行对比, 支付意愿的单位为元; (3) LED, 发光二极管 Light emitting diode

偏好的低碳技术,其支付意愿分别为 26280 元和 22842 元。墙体保温改造部分,居民对于绿色环保材料和隔热性能强材料的偏好相近,其支付意愿均为 17000 元左右。清洁能源设施改造部分居民最偏好太阳能热水器与光伏发电板的组合技术,支付意愿为 17580 元。用水器具的改造中,节水水龙头和节水马桶的组合技术的支付意愿最高,为 14103 元。照明设施和社区更新部分支付意愿相对较低,均位于 8500 元以下。

将居民按照社区类型进行划分,根据门窗改造结果显示,六类居住区居民大多愿意进行中空玻璃或双层玻璃与门窗外遮阳的组合改造,仅有传统社区和城中村居民更偏好中空玻璃技术,且支付意愿相对较低。对于墙体保温改造,传统社区与城中村居民更偏好于隔热性能强的材料,其他四类住区居民则更倾向于绿色环保的外保温材料。清洁能源设施改造选择中,多数社区的居民更偏好太阳能热水器与光伏发电板组合的技术,其中绿色商品房小区居民的支付意愿最高,保障房小区和普通商品房小区的居民更偏好光伏发电板技术。空调系统改造偏好统一,新风系统最受六类社区居民欢迎,其中城中村居民的支付意愿最小,商品房小区居民的支付意愿最大。用水器具改造选择中,除城中村居民更偏好节水水龙头技术外,其余住区更为偏好节水水龙头与马桶组合技术。在社区尺度更新方面,除传统社区对于废弃物资源化利用支付意愿不显著外,其余社区的结果表明垃圾分类与雨污分流组合技术更受社区居民喜欢。在社区公共设施改造方面,仅有城中村与绿色住宅居住区的支付意愿显著。对于环境生态修复,除传统社区支付意愿不显著外,单位小区、保障性住房、城中村居民更偏好于闲置空间绿化技术,而商品房与绿色住宅居民倾向于选择闲置空间改造与绿色屋顶组合技术。

3.2 居民低碳更新支付意愿的影响因素分析

3.2.1 模型评价

本研究采取了以下方法和步骤以提高模型的准确性和减少过拟合。第一,为减少极端值的干扰,本文采用四分位法对响应变量进行极端值处理,共剔除了 6 个样本,并对连续变量按照 1% 和 99% 分位数进行了缩尾 (Winsorize) 处理。第二,随机选取研究样本的 75% 作为训练集,剩下的 25% 样本作为验证集以验证模型。第三,本文在训练集的连续变量中注入了随机噪声为提高模型对噪声和数据不确定性的鲁棒性。第四,选取居民低碳更新支付意愿为响应变量,社区类型和居民社会经济属性等为观察变量构建 XGBoost 模型并计算特征的 SHAP 重要性,剔除贡献较小的特征。第五,采用 5 折交叉验证法和网格搜索法进行参数调节。最终,本文构建的 XGBoost 模型的 R^2 为 0.84, RMSE 为 6936, 表现较为优秀 (图 5)。

3.2.2 影响因素重要性评估

本研究在初步构建 XGBoost 模型时选取了 18 个特征变量输入模型,分别为社区类型、性别、年龄、居住时间、学历、工作就业情况、家庭年收入、租住情况、家庭成员数量、家中是否有小孩、家中是否有老人、能源消费金额、居住环境满意度、社会环境责任感、碳代谢知识了解程度、低碳技术了解程度、低碳技术使用情况以及社会影响程度。并运用 SHAP 模型计算各特征变量的重要性,根据重要性大小逐次删去重要性最低的特征并再次建模,在多个模型中选择 R^2 最大的模型作为最终模型 (图 6)。特征重要性越高,说明此特征变量对居民低碳更新支付意愿的贡献越大。结果显示,对居民低碳更新支付意愿贡献最大的特征变量是社区类型,其次重要的特征变量为家庭年收入水平,然后为居住环境满意度、社会环境责任感、碳代谢知识了解程度、租住情况、家庭成员数量以及低碳技术了解程度等因素。能源消费金额、居住时间、年龄以及学历的重要性值较低,对居民低碳更新支付意愿影响较弱。

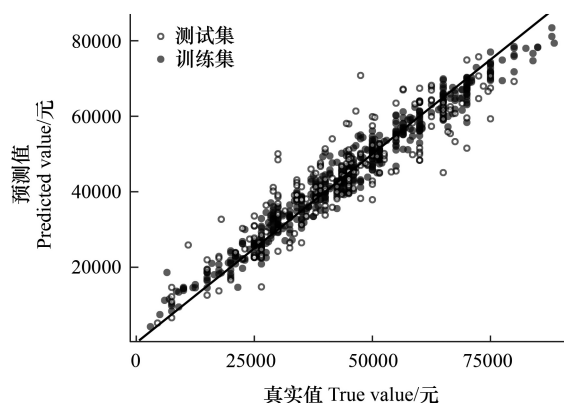


图 5 支付意愿预测值与真实值关系图

Fig.5 The relationship between predicted values and actual values of willingness to pay

3.2.3 影响因素的非线性关系分析

图 7 展示了特征变量对居民低碳更新支付意愿的部分依赖关系,即控制其他特征变量,居民更新意愿随某项特征变量的非线性变化曲线。结果表明,社区类型对居民低碳更新支付意愿的影响存在显著的异质性。普通商品房小区和绿色商品房小区的居民具有最大的支付意愿,其次是单位小区和保障房小区的居民,传统社区以及城中村居民的支付意愿最低。居民家庭年收入与居民支付意愿偏依赖图呈现非线性正相关关系,且当居民家庭年收入超过 30 万元后,居民的支付意愿显著提高。

其他特征变量与支付意愿的偏依赖图表明:相比居住环境满意度一般的居民,较不满意和非常满意的居民具有更高的支付意愿;当社会环境责任感较高时,居民的支付意愿显著提高并整体呈现正相关关系;对碳代谢知识比较了解的居民具有较高的支付意愿,且当居民对于碳代谢知识非常了解时,支付意愿进一步提高;住宅租赁和住宅自购的居民支付意愿存在显著差异,自购的居民更愿意支付更多的钱以开展更新改造;家庭成员越多、越了解低碳技术的居民具有更高的支付意愿;居住时间在 20 年以内的居民具有较高的支付意愿,20 年至 40 年的居民支付意愿呈现下降,超过 40 年后再次上升并趋于平稳;支付意愿随年龄增长表现出逐渐上升的趋势;学历与支付意愿的偏依赖图呈现非线性的正相关关系,且高中及以下学历的居民与大学及以上学历的居民的支付意愿相差较大。

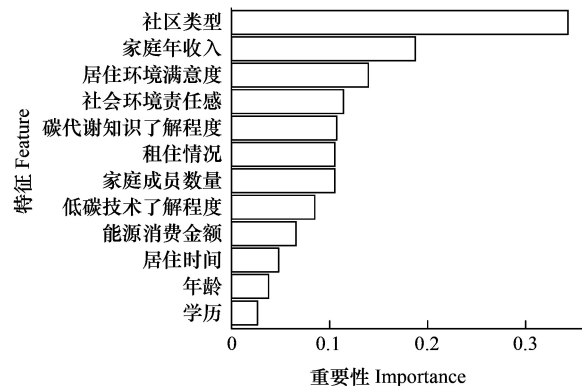


图 6 特征变量 SHAP 重要性图

Fig.6 SHAP importance of feature variables

SHAP, 沙普利加和解释 Shaply additive explanations

4 结论与讨论

本研究通过南京市六类典型社区的 35 个社区问卷调查,采用离散选择模型量化居民低碳更新支付意愿,并使用 XGBoost 模型识别其主要影响因素。结果表明,不同类型社区的居民在支付意愿和技术偏好上存在显著差异,主要影响因素依次为社区类型、家庭年收入、居住环境满意度、社会环境责任感、碳代谢知识了解程度、租住情况、家庭成员数量、低碳技术认知程度等。家庭年收入及低碳意识等因素对支付意愿有正向影响,建议政府通过补贴和宣传提升居民意愿,制定针对性的低碳更新方案,推动精细化实施。

4.1 居民低碳更新支付意愿的影响机制

居住分异是城市社区建设与发展差异化的具体体现,涵盖社区类型、租住情况、低碳意识、居住环境满意度及社会经济属性等多维特征(图 8)。研究结果表明,居民的低碳更新支付意愿受多重因素影响,其中居住分异特征尤为关键。家庭年收入、租住情况及居住时长均反映了居民对低碳更新性价比的考量。高收入家庭由于支付能力较强,对成本敏感度相对较低,因此更倾向于投资低碳更新以提升居住品质^[33]。相比之下,租户因无法长期享受低碳更新的收益,且缺乏产权归属,对低碳更新的性价比认知较低,支付意愿明显弱于房屋自住居民。此外,居住年限在 20 至 40 年的居民处于房屋老化的过渡期,此阶段房屋虽存在一定的更新需求,但尚未达到迫切程度。同时,子女教育及家庭日常开支的优先级可能进一步降低其低碳更新支付意愿。另一方面,居住环境较差的居民支付意愿相对较高,希望通过社区更新改善居住条件^[34]。而低碳意识较强的群体,尤其是受教育水平较高的居民,更关注环保效益及长期经济回报,因此更愿意为低碳更新付费^[35-36]。

社区居民的支付意愿在推动社区低碳更新的过程中扮演着至关重要的角色,尤其是在自下而上的低碳更新策略中,这一意愿能够直观反映出居民对更新的实际需求和期望^[37]。低碳更新不仅仅是技术和政策层面的顶层设计,更需要通过居民的参与和支付意愿,体现出社区内不同群体对于低碳技术的接受度以及优先考虑的改造方向。一方面,居住在不同社区的居民受居住分异影响,形成了不同的支付能力和技术偏好。这种

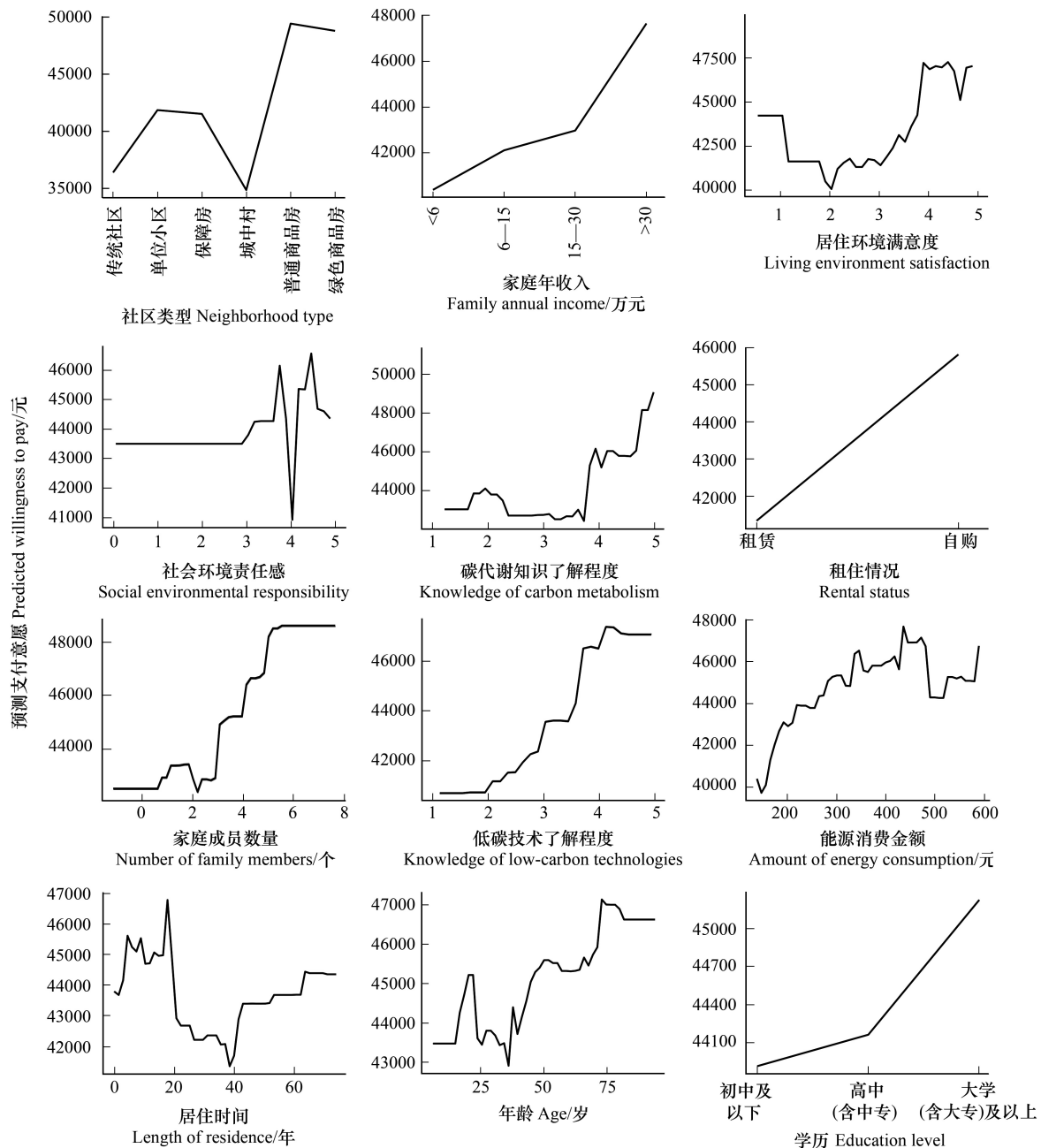


图7 各特征变量对居民低碳更新支付意愿的非线性关系

Fig.7 The non-linear relationships between various feature variables and residents' willingness to pay

差异并不仅仅反映了经济能力的差异,更深层地揭示了居民对于特定低碳技术的认知和需求。例如,传统社区和城中村的居民由于建筑老化和环境质量较差^[38-39],支付意愿主要集中在改善建筑维护结构、提升节能环保性能等方面,而这些需求反映了他们的实际居住困境和改善生活质量的迫切性。相比之下,商品房小区的居民更倾向于支持如新风系统、绿色环保材料等与生活舒适性相关的低碳技术^[40]。另一方面,支付意愿还能够反映居民对社区整体低碳更新的态度。不同于传统的自上而下的政策推动模式,自下而上的低碳更新方式更能得到居民的认可^[41]。通过对支付意愿的分析,政府和开发商可以准确了解居民在社区更新中的关注点,确保所推广的低碳技术与居民的需求相匹,进而提高更新项目的效果和持续性。以绿色商品房小区为例,其居民具有较高的低碳意识,相较于其他类型的社区,更关注于社区整体层面的低碳更新,他们愿意投资于能

够提升整个社区环境质量的低碳技术^[42]。这种支付意愿直接影响到低碳技术的选择和实施,促使社区更新从个体居住空间扩展到社区公共空间,进而推动整体环境的优化。

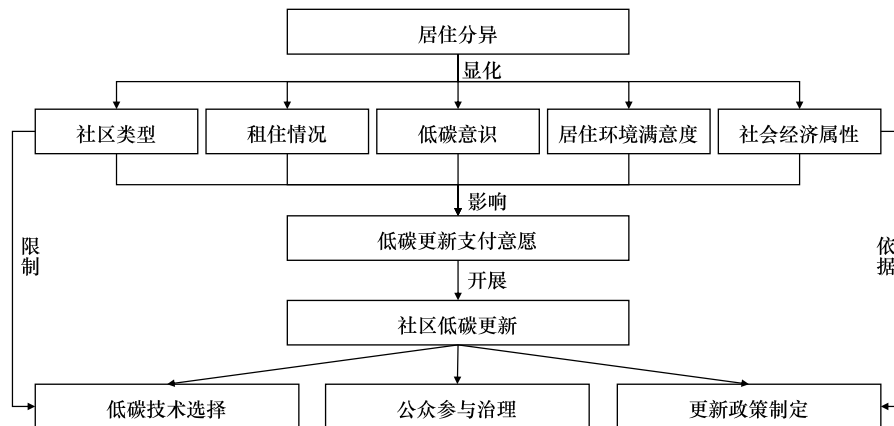


图8 低碳更新支付意愿作用机制示意图

Fig.8 Schematic diagram of the mechanism of action of low-carbon willingness to pay

4.2 基于居民支付意愿的社区低碳更新路径

居民支付意愿在社区低碳更新过程中发挥着重要作用,主要体现在更新技术选择、社区参促进与和补贴政策制定等方面。支付意愿反映了居民的实际需求与支付能力,在社区低碳更新的实施过程中,需要根据支付意愿差异制定各社区个性化的更新方案。支付意愿较高的社区通常能够选择新兴技术和高成本的更新方案,例如绿色屋顶或更全面的节能系统^[43]。而支付意愿较低的社区则更加注重性价比,通常侧重于基础性更新^[12],如节能保温等成本较低、易于推广的技术。此外,低碳意识对居民的支付意愿具有关键影响,故而对于支付意愿较低的社区,可以通过更多的教育引导和低碳宣传鼓励居民参与社区低碳更新的实施与治理。依据支付意愿分析结果,有助于从经济可行性的角度更好地制定补贴机制和更新政策,从而吸引居民开展低碳更新^[14]。

综上所述,在以居民为主体的自下而上的社区低碳更新实践中,支付意愿成为了连接居民需求与政策供给的重要纽带。通过深入分析居民的支付意愿,政府和市场主体能够更精准地识别出低碳技术的需求点,并据此合理引导居民支付意愿,结合不同社区的特征制定灵活适应的低碳更新方案,确保低碳更新项目的持续推进和推广。这种基于居民实际需求的更新模式,不仅提升了居民的参与感和获得感,也为实现长期的低碳社区建设奠定了坚实基础。

参考文献 (References):

- [1] Zhang X L, Luo L Z, Skitmore M. Household carbon emission research: an analytical review of measurement, influencing factors and mitigation prospects. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 873-883.
- [2] 李静, 刘丽雯. 中国家庭消费的能源环境代价. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(12): 31-39.
- [3] Atutxa E, Zubero I, Calvo-Sotomayor I. Scalability of low carbon energy communities in Spain: an empiric approach from the renewed commons paradigm. *Energies*, 2020, 13(19): 5045.
- [4] Cheng J B, Mao C, Huang Z, Hong J K, Liu G W. Implementation strategies for sustainable renewal at the neighborhood level with the goal of reducing carbon emission. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 85: 104047.
- [5] 陈美伊, 胡宏. 城市街区碳代谢模式识别及适应性更新策略——以福建省长汀县历史文化街区为例. *城市规划*, 2025, 49(02): 94-109.
- [6] 赵凯茜, 李翊. 能值分析方法在社区环境可持续发展评估中的应用. *国际城市规划*, 2023, 38(5): 74-82.
- [7] 赵楠楠. “冲突—共识”: 城市更新规划的公众利益实现路径——基于恩宁路二期和碧江社区实证. *城市规划*, 2024, 48(4): 51-58.
- [8] 杨建平, 樊仙仙, 宋金昭, 胡振. 住户既有住宅绿色改造意愿影响因素研究——以西安市为例. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(5): 71-77.
- [9] Lu X, Lu Z Q, Mao J Y, Sun Z H, Cui Z H, Huang Y T, Cao K Z. Place attachment as an indicator of public participation in low-carbon community development: a case study of Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110658.
- [10] 徐水太, 袁北飞, 陈美玲. 感知价值对居民参与老旧小区改造意愿的影响——基于广州市老旧小区居民的调查数据. *地域研究与开发*,

- 2023, 42(2): 80-85, 92.
- [11] 张晓星. 业主参与既有住区海绵化改造内源动力研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- [12] Santos C N, Cetin K S, Salehi H. Energy-efficient technology retrofit investment behaviors of Midwest households in lower and higher income regions. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 86: 104141.
- [13] 罗福周, 李静, 张诺楠. 基于产权差异的住宅绿色宜居改造居民支付意愿研究. *建筑经济*, 2020, 41(9): 131-136.
- [14] Han Q, Nieuwenhijzen I, de Vries B, Blokhuis E, Schaefer W. Intervention strategy to stimulate energy-saving behavior of local residents. *Energy Policy*, 2013, 52: 706-715.
- [15] Hu H, Geertman S, Hooimeijer P. The willingness to pay for green apartments: The case of Nanjing, China. *Urban Studies*, 2014, 51(16): 3459-3478.
- [16] 员鑫森, 王利洒, 徐姗. 北京居住功能空间演替模式的时空分异及影响因素研究. *城市发展研究*, 2022, 29(8): 31-36.
- [17] 王悦, 李锋, 陈新闯, 胡印红, 胡盼盼, 杨建新. 典型社区家庭消费碳排放特征与影响因素——以北京市为例. *生态学报*, 2019, 39(21): 7840-7853.
- [18] Iveroth S P, Johansson S, Brandt N. The potential of the infrastructural system of hammarby sjöstad in Stockholm, Sweden. *Energy Policy*, 2013, 59: 716-726.
- [19] 缪春胜, 覃文超, 水浩然. 从大拆大建走向有机更新, 引导城中村发展模式转型——以《深圳市城中村(旧村)综合整治总体规划(2019—2025)》编制为例. *规划师*, 2021, 37(11): 55-62.
- [20] Downey G, Mumford L. The city in history: its origins, its transformations, and its prospects. *The Classical World*, 1961, 55(1): 12.
- [21] 张晓东, 吴明庆, 杨青, 严莹. "以人为本"视域下城市老旧小区更新需求分析及对策. *城市问题*, 2023, (9): 95-103.
- [22] 程嘉琦, 胡宏, 束天媛. 基于活动空间的城市不同类型社区居民蓝绿空间品质差异研究. *人文地理*, 2023, 38(1): 44-55.
- [23] Zwerina K. *Discrete Choice Experiments in Marketing*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 1997.
- [24] 卢明强, 陈丽军. 基于 MNL 离散选择模型的社区居民对湿地保护的贡献意愿——以大庆湿地为例. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 449-458.
- [25] Chen T Q, Guestrin C, Chen T Q, Guestrin C. XGBoost. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. August 13-17, 2016, San Francisco, California, USA. ACM, 2016: 785-794.
- [26] Bushenkova A, Soares P M M, Johannsen F, Lima D C A. Towards an improved representation of the urban heat island effect: a multi-scale application of XGBoost for Madrid. *Urban Climate*, 2024, 55: 101982.
- [27] 谭雨欣, 田义超, 黄卓梅, 张强, 陶进, 刘虹秀, 杨永伟, 张亚丽, 林俊良, 邓静雯. 北部湾茅尾海无瓣海桑红树林地上生物量反演——基于 XGBoost 机器学习算法. *生态学报*, 2023, 43(11): 4674-4688.
- [28] 刘吉祥, 肖龙珠, 周江评, 郭源园, 杨林川. 建成环境与青少年步行通学的非线性关系——基于极限梯度提升模型的研究. *地理科学进展*, 2022, 41(2): 251-263.
- [29] Wu C J, Pan H Z, Luo Z H, Liu C, Huang H. Multi-objective optimization of residential building energy consumption, daylighting, and thermal comfort based on BO-XGBoost-NSGA-II. *Building and Environment*, 2024, 254: 111386.
- [30] 张延吉, 朱春武. 环境因素与暴力犯罪的非线性和空间异质性关系分析. *地理学报*, 2024, 79(8): 2141-2156.
- [31] Zhang J Y, Ma X L, Zhang J L, Sun D L, Zhou X Z, Mi C L, Wen H J. Insights into geospatial heterogeneity of landslide susceptibility based on the SHAP-XGBoost model. *Journal of Environmental Management*, 2023, 332: 117357.
- [32] Liu Z H, Fu L Z, Wu C F, Zhang Z Z, Zhang Z Y, Lin X W, Li X, Hu Y H, Ge H X. Spatialized importance of key factors affecting park cooling intensity based on the park scale. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104952.
- [33] Soon J J, Ahmad S A. Willingly or grudgingly? A meta-analysis on the willingness-to-pay for renewable energy use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 877-887.
- [34] 王卓然. 既有低碳城市社区更新改造目标人群分类研究. *城市发展研究*, 2017, 24(4): 138-143.
- [35] 李德智, 谷甜甜, 朱诗尧. 老旧小区改造中居民参与治理的意愿及其影响因素研究——以南京市为例. *现代城市研究*, 2020, 35(2): 19-25, 41.
- [36] Dean A J, Lindsay J, Fielding K S, Smith L D G. Fostering water sensitive citizenship-Community profiles of engagement in water-related issues. *Environmental Science & Policy*, 2016, 55: 238-247.
- [37] 武照亮, 阮芳芳. 中心城市社区公共绿地支付意愿及影响因素研究——基于居民不确定性视角的分析. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(5): 20-29.
- [38] 王睿坤. 柞水凤凰古镇核心区居住空间低碳化更新设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [39] 谭文杰, 李吉埔, 麦泳贤, 马琪茹. 基于人居环境视角下城中村微更新改造研究——以珠海为例. *城市发展研究*, 2023, 30(12): 25-28, 34.
- [40] He Y, Chu Y N, Zang H Y, Zhao J Y, Song Y H. Experimental and CFD study of ventilation performance enhanced by roof window and mechanical ventilation system with different design strategies. *Building and Environment*, 2022, 224: 109566.
- [41] Woo J H, Menassa C. Virtual Retrofit Model for aging commercial buildings in a smart grid environment. *Energy and Buildings*, 2014, 80: 424-435.
- [42] 刘云霞. 基于居民异质性的绿色住宅建筑接受度及支付意愿研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- [43] Jim C Y, Hui L C. Offering green roofs in a compact city: Benefits and landscape preferences of socio-demographic cohorts. *Applied Geography*, 2022, 145: 102733.