

小区内双尺度建成环境对老年人步行行为的非线性影响*

The Nonlinear Impact of Built Environments Within and Beyond Residential Compounds on Walking Behavior of Older Adults

杨皓森 贺斌 陈杰 范强雪 杨林川 YANG Haosen, HE Bin, CHEN Jie, FAN Qiangxue, YANG Linchuan

摘要 在积极应对人口老龄化战略背景下,步行作为一种兼具健康与低碳双重效益的出行方式,其重要性日益凸显。然而,现有研究较少关注老年人高频活动场所——小区内部的建成环境对其步行行为的影响。基于成都市611份老年人步行调查数据及小区内建成环境数据,运用随机森林模型分析多尺度(小区内)建成环境对步行行为的非线性影响。结果表明:(1)小区边长和小区内部的道路密度对老年人步行频率的影响显著,其重要度仅次于小区外部的公交站点密度;(2)公交站点密度和小区边长对老年人步行频率的影响总体上为负向,但当公交站点密度超过76个/km²或小区边长超过260 m时,其影响不再显著。引入机器学习方法,深入揭示建成环境对步行行为的复杂作用机制,以期为老年友好型社区规划与低碳出行政策制定提供科学依据。

Abstract Against the backdrop of implementing the National Strategy for Responding Proactively to Population Aging, walking has gained increasing prominence as a travel mode offering dual benefits for health and low-carbon sustainability. However, existing research has largely overlooked the impact of the built environment within residential compounds, key activity spaces for older adults, on their walking behavior. Based on survey data from 611 older adults in Chengdu and built environment data inside and outside residential compounds, this paper employs a random forest model to explore the nonlinear effects of the built environment on walking behavior. The results indicate that: (1) Block length and road density within residential compounds significantly influence older adults' walking frequency, ranking only behind bus stop density outside the compounds in terms of importance; (2) The effects of bus stop density and block length on older adults' walking frequency are generally negative, but this influence becomes insignificant when bus stop density exceeds 76 stops/km² or block length exceeds 260 m. By integrating machine learning methods, this paper uncovers the complex mechanisms through which the built environment shapes walking behavior. The findings provide a scientific basis for age-friendly community planning and the formulation of low-carbon mobility policies.

关键词 人口老龄化;步行;建成环境;环境感知;机器学习

Key words population aging; walking; built environment; environmental perception; machine learning

文章编号 1673-8985 (2026) 01-0099-07 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20260113

作者简介

杨皓森

西南交通大学建筑学院

科研助理,硕士

贺斌

西南交通大学建筑学院

博士后,博士

陈杰

西南交通大学建筑学院

助理教授,博士

范强雪

成都武天智城规划设计研究有限公司

助理工程师,硕士

杨林川(通信作者)

西南交通大学建筑学院

教授,博士生导师,博士

yanglc0125@swjtu.edu.cn

0 引言

随着人类预期寿命延长和生育率下降,全球正经历显著的人口结构变化,人口老龄化已成为各国普遍面临的现实挑战。联合国《2024世界人口展望》预测,到21世纪70年代末,全球65岁及以上人口数量预计将达到22亿人,规模超过18岁以下人口。中国在这一转型过

*基金项目:国家自然科学基金面上项目“多尺度建成环境与老年人人体力活动动态关联模型构建及适老环境优化研究”(编号52278080);四川省杰出青年科学基金项目“支持绿色出行的城市复杂建成环境优化机制与整合规划研究”(编号2025NSFJQ0016)资助。

程中尤为典型^[1-2]。国家统计局数据显示,截至2024年,中国65岁及以上人口超过2.2亿人,占总人口15.6%。2021年,“实施积极应对人口老龄化国家战略”被写入“十四五”规划和2035年远景目标纲要。积极应对老龄化已上升为国家战略,老年群体的出行等需求逐渐成为公共政策与社会发展的重要议题。

与此同时,交通运输领域的碳排放量约占全球碳排放总量的1/4^[3]。私人汽车保有量的快速增长及人们对其使用依赖程度的持续提升,加剧了交通拥堵、大气污染和碳排放等问题,使城市在可持续交通基础设施和系统的建设上偏离既定目标。随着全球碳中和进程的加快,降低交通运输领域碳排放已成为实现可持续发展目标的战略重点^[4]。我国相继出台《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030年前碳达峰行动方案》等政策文件,推动绿色交通体系建设被明确为实现“双碳”目标的重要举措^[5]。

在此背景下,步行成为促进积极老龄化和实现“双碳”目标的交汇点。步行既是保障老年人健康的重要方式,也是实现绿色出行的关键途径^[6]。从健康角度看,步行是最基本且容易融入日常生活的交通方式和体力活动方式^[7-8]。经常步行可降低老年人患心脏病、糖尿病和骨质疏松症等慢性疾病的风险^[9]。从绿色出行角度看,步行是零排放的出行方式,相较于机动车出行,能显著减少温室气体和污染物的排放^[10]。例如,新西兰的一项实证干预研究表明,通过建设步行和骑行基础设施并鼓励积极出行,在整个干预期间,每辆乘用车的行驶距离及其相关的二氧化碳排放量平均减少约1%^[11]。因此,促进老年人步行既能改善其健康水平,又能有效降低碳排放,可实现健康老龄化与绿色低碳发展的协同促进。

现有研究广泛探讨了建成环境对老年人步行行为的影响。在变量选择上,现有研究多基于3Ds和5Ds框架^[12-13],重点关注空间形态类(如建筑密度、路网密度等)、功能配置类(如土地利用混合度、服务设施可达

性等)以及环境品质类(如绿化率、步行设施完善度等)3类变量^[14-16]。在研究方法上,传统统计模型(回归分析)被广泛用于探究变量之间的线性关系^[17]。近年来,机器学习方法的引入拓展了对复杂非线性关系的探索^[18]。然而,尽管这些研究丰富了对建成环境影响机制的认知,但其多聚焦于单一空间尺度(如城市或街区层面^[19-20]),未能综合分析小区内外部环境的影响机制,且重点仍集中于较大空间尺度,对老年人日常活动频繁发生的小区内部环境关注不足(见图1)。因此,深入探讨小区内部建成环境对老年人步行行为的作用机制,对于理解步行环境优化的关键因素具有重要意义。

本文以成都市为例,基于611份针对老年人步行行为的调查问卷以及小区内外部建成环境的相关数据,系统分析了建成环境对老年人步行行为的影响机制;创新性地整合小区内部与外部的建成环境特征,突破了以往研究在老年人日常活动空间尺度上的局限性。同时,采用随机森林模型揭示了小区内外部建成环境变量与老年人步行频率之间的非线性关联。研究结果为老年友好型社区规划和低碳出行政策制定提供了实证支持,对于促进健康老龄化和推动城市可持续发展具有一定的实践意义。

1 文献综述

老年人出行行为受多尺度因素的共同作用。其中,建成环境作为可通过空间规划与设计进行优化的外部条件,已被广泛证实塑造老年人出行模式方面具有重要影响。近年来,研究逐渐从整体出行扩展到对步行行为的细分考察,并关注建成环境影响的非线性特征及其作用机制,同时引入机器学习等方法揭示更复杂的变量关系。然而,现有研究多集中在街区或社区尺度,对住宅小区内外部建成环境差异的系统比较仍相对不足,这在一定程度上限制了多尺度环境效应的深入探讨。

1.1 老年人出行行为的影响因素

老年人出行行为受到个体与家庭的社会

经济属性(如年龄、性别、机动车拥有情况)、出行偏好(如步行或体育活动倾向)^[21-22]以及周边建成环境条件等多方面的影响。建成环境的密度、多样性和空间设计等特征,在影响老年人出行行为方面发挥着关键作用。大量实证研究已证实,不同建成环境特征可能对老年人出行产生促进或抑制的效应^[23-25]。李康康等^[26]通过调查发现,老年人参与体力活动的积极性与其住区及周边建成环境特征存在显著关联。王莹亮等^[27]在对重庆市江北区的实证研究中也表明,老年人的步行行为受建成环境的显著影响,其中土地利用混合度、绿色开敞空间密度和交叉口密度等是主要作用因素。

1.2 建成环境对步行行为的非线性影响机制

近期研究表明,建成环境对老年人步行行为的影响并非单纯的线性关系,而常表现出“阈值效应”与“饱和效应”等复杂的非线性特征^[28-29]。随着机器学习等非参数模型的引入,研究能够更全面地揭示变量间的非线性关系与交互效应,从而突破传统线性回归模型的局限,为科学识别关键影响因子和优化干预路径提供了新方法。例如,刘吉祥等^[30]基于厦门的老年人出行行为数据发现,起始点与终点的道路交叉口密度对老年人活力出行(主要是步行)的作用在不同密度区间存在显著差异,既可能促进也可能抑制其出行。Yang等^[31]发现绿视率对香港老年人步行倾向有非线性影响。绿视率过高(超过0.24)反而会抑

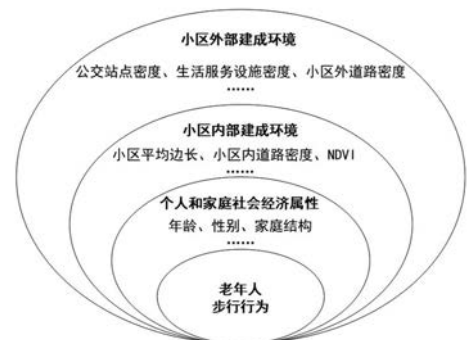


图1 老年人步行行为的社会生态模型
Fig.1 The socio-ecological model of older adults' walking behavior

资料来源:笔者自绘。

制步行出行。Zhan等^[32]以上海市为例,采用XGBoost与SHAP方法表明,建成环境对活力出行的影响存在明显的非线性与阈值特征,适度的道路连通性与设施供给能够提升出行意愿,过高或过低会削弱这一正向作用。

1.3 小区内部建成环境的关注不足

尽管关于建成环境对老年人步行行为的影响已得到较为充分的验证,但现有研究在空间尺度的划分上仍存在不足。多数研究将空间环境视为整体,缺乏对住宅小区“内部”与“外部”建成环境特征及其行为影响差异的系统分析。然而,在现实生活中,老年人日常活动高度依赖住宅小区及其周边空间^[33],其活动范围往往受到小区边界的显著约束。小区内外部建成环境在功能属性和空间层级上差异显著,对老年人出行行为的作用机制也可能存在不同。这种一概而论的处理方式可能掩盖不同空间层级建成环境对老年人步行行为的差异性影响,导致研究结论在解释力和针对性上的不足,从而限制了其在精准改善老年人步行环境方面的应用价值。因此,深入分析小区内外部建成环境对老年人步行行为的异质性影响,对于推动健康城市建设与老龄友好社区规划具有一定的理论与实践价值。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域

本文选择成都市作为案例地。作为西南地区的国家中心城市,成都2024年实现地区生产总值2.35万亿元;其常住人口2 147万人,是全国人口第4大城市,仅次于重庆、上海和北京。在老年人口方面,根据《成都市2022年老年人口信息和老龄事业发展状况报告》,全市户籍人口为1 572万人,其中60岁及以上老年人口达324万人,占户籍总人口的20.6%。在步行环境方面,成都是全国步行体系建设较为完善的城市之一。作为高密度发展的代表城市,其建成区内拥有较完善的步行设施体系,包括过街人行天桥和地下通道等,为居民创造了友好的步行环境。

2.2 老年人步行行为数据

本文通过问卷调查收集了成都市60岁及以上老年人的步行行为数据。为确保数据的准确性与可靠性,调查采用面对面访谈的形式,且要求受访者在当前小区居住满6个月以上,以确保其对小区及周边建成环境具有充分感知。

调查于2023年5月20日至6月6日进行,覆盖成都市绕城高速以内的19个住宅小区。为提高调查效率,研究团队选择老年人活动较为集中的时段(9:00—12:00、15:00—18:00和19:00—21:00)开展调研。每个小区发放问卷约35份,共回收问卷665份。经过严格筛选,剔除信息缺失和逻辑矛盾的无效问卷后,最终获得有效问卷611份,有效回收率达91.9%。问卷内容主要包括两个部分:(1)步行行为特征,重点调查过去7 d内的步行出行频率;(2)社会经济属性,包括年龄、受教育程度、职业、个人月收入等基本信息。通过科学的抽样设计和严格的质量控制,本文获取的数据能够较好地反映成都市主城区老年人的步行行为特征。

2.3 建成环境数据

本文设定老年人步行频率为因变量,用于衡量其步行活动水平。参考相关文献和建成环境测度框架^[34-35],共选取了12个建成环境变量,包括5个小区内部变量和7个小区外部变

量(见表1)。

小区内部建成环境变量包括建筑密度、小区边长、小区出入口数量、道路密度和归一化植被指数(NDVI)。建筑密度定义为建筑基地面积与小区总面积的比值,用于反映小区内部的建筑集聚程度;小区边长用于衡量小区的尺度大小;小区出入口数量通过实地调研获得,反映小区的通达性;道路密度为小区内道路总长度与小区面积的比值;NDVI用于量化小区内部的植被覆盖水平。

小区外部建成环境变量包括土地利用混合度、生活服务设施密度、休闲设施密度、公交站点密度、建筑密度、道路密度和NDVI^[36]。上述变量均以小区中心点为基准,设定800 m半径的缓冲区进行统计分析,以刻画小区周边邻里尺度的建成环境特征。土地利用混合度基于熵值计算,衡量不同类型土地的分布均衡程度;生活服务设施密度指小区周边菜市场、超市等日常服务设施的分布密度;休闲设施密度表示公园、广场等休闲空间的分布情况,与老年人户外步行行为密切相关;公交站点密度衡量小区周边公交及地铁站点的分布情况。

2.4 受访者社会经济特征

表2展示了受访者的社会经济特征。总体而言,样本呈现以下特点:女性比例较高,年龄以中低龄老年人为主,受教育程度偏低,职业

表1 变量描述性统计

Tab.1 Descriptive statistics of variables

分类	变量	变量描述	均值	标准差
步行活动水平(因变量)	步行频率	7 d内步行出行的次数	15.96	7.29
	建筑密度	建筑基地面积/小区面积	0.39	0.10
小区内部建成环境指标(自变量)	小区边长/m	小区平均边长	245.44	97.65
	小区出入口数量/个	实地调研小区的入口和出口总数	3.78	1.06
	道路密度/(km/km ²)	道路长度/小区面积	14.37	3.78
	NDVI	用于量化植被覆盖密度的指标	0.04	0.01
小区外部建成环境指标(自变量)	土地利用混合度	土地利用熵值= $-\sum P_i \ln p_i / \ln N$,其中 P_i 为第 <i>i</i> 种土地所占比例, N 为土地种类	0.46	0.07
	生活服务设施密度/(个/km ²)	兴趣点数量(菜市场、超市等)/缓冲区面积	48.41	33.04
	休闲设施密度/(个/km ²)	兴趣点数量(公园、广场等)/缓冲区面积	3.63	1.31
	公交站点密度/(个/km ²)	兴趣点数量(公交、轨交站点)/缓冲区面积	67.04	29.62
	道路密度/(km/km ²)	道路长度/缓冲区面积	7.55	1.29
	NDVI	用于量化植被覆盖密度的指标	0.05	0.01
	建筑密度	建筑基地面积/缓冲区面积	0.24	0.05

资料来源:笔者自制。

类型较为分散,收入以中等水平居多,且大多数老年人与家人共同居住。

从性别来看,女性343人(占56.1%),男性268人(占43.9%)。女性略多于男性。在年龄分布方面,受访者主要集中在60—79岁,80岁及以上的高龄老年人126人(占20.6%)。高龄老年人的比例相对较低,这可能与其身体机能下降及步行能力受限有关。在教育水平方面,受访者的整体受教育程度较低。小学及以下学历271人(占44.3%),占比最高,研究生及以上学历仅11人(占1.8%)。在收入方面,受访者的收入水平主要集中在2 000—5 000元区间,其中2 000—3 000元收入群体有162人(占26.5%),3 000—5 000元有153人(占25.0%)。在家庭结构方面,大多数受访老年人与家人共同居住。其中,“与配偶及子女居住”的比例最高,为192人(占31.4%),而独居老年人为71人(占11.6%),相对较少。

3 研究方法

本文采用随机森林模型来探索小区内外部建成环境变量对老年人步行行为的非线性影响。随机森林是由Breiman于2001年提出的一种基于决策树的集成学习(ensemble learning)方法。该方法通过集成多棵相对独立的决策树,利用数据自助采样(bootstrap)和特征随机选择策略,以提高模型的预测精度与泛化能力。与传统统计模型相比,随机森林无需预设变量间的函数形式,因而能够更有效地识别高维特征之间的复杂非线性关系。

随机森林的建模过程主要包括以下3个步骤:一是通过自助采样法从原始数据集中随机抽取多个子样本,每个子样本用于训练一棵决策树;二是每棵树的构建过程中,在每个节点划分时并非使用所有特征,而是从全部特征中随机选取一个子集,并在该子集中选择最优特征进行分裂。这一机制不仅削弱了特定变量对模型的主导作用,还增强了模型的多样性。三是所有决策树的预测结果通过平均(回归任务)或多数投票(分类任务)的方式进行集成(见图2)。这种集成学习方法能够有效

减少单棵决策树的过拟合问题,提高模型的稳健性。

与传统回归模型和单一决策树相比,随机森林具有多方面的优势。一方面,它能够有效处理高维数据,适用于探索多种建成环境变量对老年人步行行为的影响。另一方面,基于自助聚合(bagging)方法的集成策略使得随机森林在训练数据上具有较好的泛化能力;随机森林能够提供变量重要性分析,量化各建成环境变量对步行行为的影响程度,为优化步行环境提供数据支持。最后,随机森林对异常值较为稳健,能够在一定程度上降低数据质量问题对研究结果的影响。

4 结果

为提升随机森林模型的性能与泛化能力,本文采用网格搜索方法确定最优超参数(hyperparameter)组合。具体而言,选择了3个关键超参数:决策树数量、树的最大深度和最大特征数,并设定合理的取值范围。其中,决策树数量的搜索范围为100—1 000(步长为100),树的深度范围为1—10(步长为1),最大特征数范围为2—10(步长为1)。随后,基于袋外误差(out-of-bag error, OOB error)评估不同参数组合下模型的预测性能,并选择误差最小的参数组合作为最终模型配置。结果表明,当决策树数量为400、树的最大深度为3、最大特征数为6时,模型性能最佳。因此,本文采用该超参数组合进行最终建模分析,以确保模型在揭示建成环境变量对老年人步行行为影响时的准确性。

4.1 变量重要度

图3展示了小区内外部建成环境变量对老年人步行频率预测的重要度。结果显示,小区外部的公交站点密度(0.310)对老年人步行频率的影响最为显著,其次是小区边长(0.142)和小区内部的道路密度(0.128)。小区外部的生活服务设施密度(0.123)紧随其后,其重要度与前3个变量相近,说明该变量同样具有较强的影响。总体来看,小区外部的交

通与服务设施因素在塑造老年人步行行为方面的作用更大,但小区尺度和内部道路密度也发挥了重要作用。

进一步比较发现,部分同类型变量在小区内外部的重要度存在显著差异。例如,小区内外部NDVI(0.078)的重要度远高于小区外部NDVI(0.018),表明小区内部绿化水平对老年人步行频率的影响更为显著。这可能是由于老年人日常活动更集中于小区范围,对内部环境质量的感知更直接。此外,小区内外部道路密度重

表2 受访者个人及家庭属性基本信息统计
Tab.2 Summary of respondents' personal and household attributes

	社会经济属性	频数	比例/%
性别	女	343	56.1
	男	268	43.9
年龄	60—69岁	228	37.3
	70—79岁	257	42.1
	80岁及以上	126	20.6
受教育程度	小学及以下	271	44.3
	初中	182	29.8
	高中或中专	108	17.7
	大专/本科	39	6.4
	研究生及以上	11	1.8
职业	机关事业单位工作人员	122	20.0
	企业工作人员	164	26.8
	个体经营者	41	6.7
	自由职业	23	3.8
	其他	261	42.7
个人月收入/元	1 200以下	138	22.6
	1 200—2 000	90	14.8
	2 000—3 000	162	26.5
	3 000—5 000	153	25.0
	5 000以上	68	11.1
家庭结构	独居	71	11.6
	与配偶居住	180	29.5
	与子女居住	158	25.9
	与配偶及子女居住	192	31.4
	其他	10	1.6

资料来源:笔者自制。

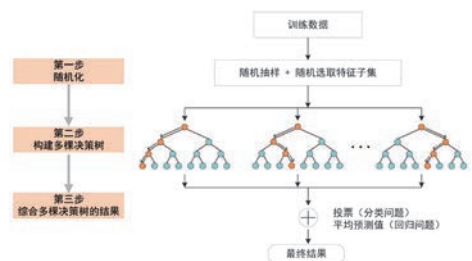


图2 随机森林计算流程
Fig.2 Random forest computation process

资料来源:笔者自绘。

要度 (0.128) 高于小区外部道路密度 (0.061), 表明小区内的道路组织比外部街道网络更直接影响老年人步行行为, 这可能与老年人以小区范围内的短途步行为主密切相关。

综上所述, 老年人步行行为的影响机制并非由单一因素决定, 而是受到空间尺度、出行目的和活动需求等多重因素的共同作用。这一结果不仅深化了对建成环境多尺度作用机制的理解, 也为优化老年人步行环境提供了实证依据。

4.2 非线性效应

随机森林模型通过偏依赖函数生成的偏依赖图 (partial dependence plots, PDPs) 能有效刻画特定自变量与因变量 (步行频率) 之间的关系。该方法通过控制其他变量保持恒定, 直观呈现目标特征对模型预测结果的独立影响, 从而揭示数据中复杂的非线性关系。

图4呈现了两个关键建成环境变量的偏依赖图, 揭示了其对老年人步行频率的显著非线性影响, 且这种作用强度随取值变化呈现多阶段梯度演变特征。图4左图展示了公交站点密度对老年人步行频率的非线性影响。图4中黑色竖线表示样本主要分布区间, 为38—106个/km², 因此, 该区间内的效应解释具有更丰富的样本支撑。当公交站点密度在38—76个/km²时, 其对步行频率有负向影响, 即密度越高, 老年人的步行频率越低。然而, 当公交站点密度超过76个/km²后, 密度继续增加对步行频率的边际效应趋于不显著。该结果表明, 公共交通与

步行之间存在一定的替代关系, 即公交站点的增加提升了出行便利性, 促使老年人倾向于选择公共交通出行, 从而导致其步行频率降低。图4右图展示了小区边长对老年人步行频率的非线性影响。小区边长主要集中在150—318 m之间。在小区边长150—260 m这一范围, 步行频率随小区边长的增加而显著下降。超过260 m后, 小区边长对步行频率的影响不再显著。该结果与预期一致: 更短的小区边长通常对应更高的道路网络连通性, 为老年人创造了更便捷的步行条件, 因此其步行频率更高。

5 优化策略

本文采用机器学习方法 (随机森林模型) 探讨了小区内外建成环境对老年人步行行为的作用机制, 识别出公交站点密度和小区边长为关键影响因素。围绕上述变量, 本文提出相应的优化策略, 以提升环境的适老化水平, 营造更为友好的步行空间, 从而有效促进老年人的步行活动。

研究表明, 在一定范围内, 公交站点密度越高, 老年人的步行频率越低。这可能与过高的公交可及性降低了步行需求有关。因此, 在保证公共交通便捷性的前提下, 应避免因站点过密而削弱老年人步行意愿。具体而言, 可通过合理控制站点间距, 保持适当的步行接驳距离, 既保障公共交通便利性, 又鼓励老年人进行必要的日常步行。同时, 应在主要接驳路径上完善适老化设施, 如遮阳廊道、休

憩座椅等, 以提升步行舒适度和安全性。此外, 可结合步行网络优化, 在公交站点周边建设连续性高、安全性高的步行通道, 引导老年人选择步行接驳的方式, 而非依赖过短距离的公交出行。

研究表明, 小区边长越短, 老年人的步行频率越高。这表明紧凑型街区设计能够有效提高步行可达性, 从而促进老年人步行。因此, 建成环境的优化策略应着重推动“小街区、密路网”的规划理念, 减少超大规模封闭式小区的比例^[37]。对于新建小区, 应鼓励采用“小尺度、短边长”的街区设计, 提升内部道路的连通性和可渗透性^[38-39]。对于存量小区, 可通过街道微更新手段进行优化, 例如打通断头路、增设步行通道、优化小区出入口布局等, 以缩短步行距离, 便利老年人出行。同时, 在保持小街区尺度的前提下, 优化街道界面设计也是提升步行积极性的重要途径。具体措施包括增设沿街绿化、丰富服务设施类型、打造趣味性公共活动空间等, 以有效提升街道活力, 进而提高老年人的步行积极性。

总体而言, 上述优化策略在空间设计与公共交通布局两个方面形成了互补关系: 一方面, 通过合理控制公交站点密度并优化接驳步行环境, 可以兼顾公共交通便利性与老年人日常步行需求; 另一方面, 通过“小街区、密路网”的空间形态塑造和渐进式的街区微更新, 提升存量与新建小区的步行友好度。这些策略对适老建成环境规划具有一定的实践启示意义。

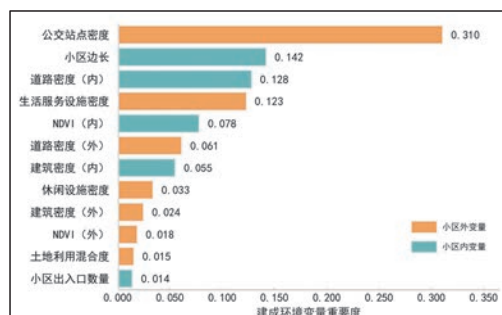


图3 小区内外部建成环境变量重要性排序
Fig.3 Importance ranking of built environment variables inside and outside residential compounds

资料来源: 笔者自绘。

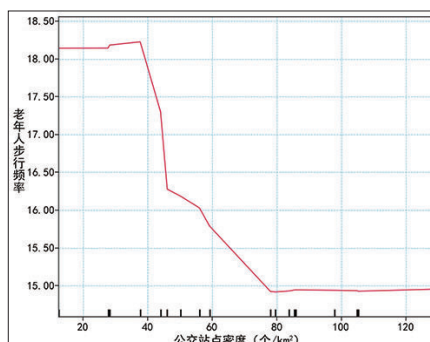
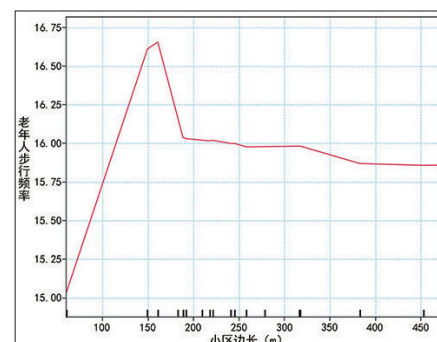


图4 关键建成环境变量的偏依赖图
Fig.4 Partial dependence plots of key built environment variables



资料来源: 笔者自绘。

6 结论

本文以成都市老年人步行调查数据为基础,结合小区内外的建成环境特征,采用随机森林模型探讨其对老年人步行行为的非线性影响。主要发现:(1)在影响老年人步行频率的建成环境因素中,小区外部的公交站点密度作用最为显著,随后是小区内部的道路密度和小区边长;小区外部的生活服务设施密度影响排名第4。(2)公交站点密度和小区边长对老年人步行频率的影响呈现出显著的非线性特征和阈值效应。具体而言,二者对老年人步行频率的影响总体上为负向,但当公交站点密度超过76个/km²或小区边长超过260 m时,其影响不再显著。

本研究的主要贡献体现在以下两方面:一是拓展了研究视角,纳入小区内部建成环境变量,弥补了现有研究对老年人高频活动空间(小区内部)关注不足的局限;二是方法上引入机器学习模型,揭示小区内外部建成环境对老年人步行行为的非线性影响及阈值效应,为精准优化老年友好型步行环境提供了科学依据。尽管如此,本研究仍存在一定局限性。受数据获取限制,未考虑老年人个体健康差异对步行行为的影响;研究结论在中低密度城市的适用性有待进一步验证。未来研究可结合可穿戴设备数据,深入探究个体特征与环境因素的交互作用,并拓展不同城市形态下的比较研究。

参考文献 References

- [1] 张戴洛,马世发,蔡云楠. 应对人口老龄化社会的养老机构空间均衡识别[J]. 城市规划, 2024, 48(6): 72-82.
ZHANG Dailuo, MA Shifa, CAI Yunnan. Identification of spatial equity of elderly care institutions in response to an aging population[J]. City Planning Review, 2024, 48(6): 72-82.
- [2] 霍子文,肖菲,李丹妮,等. 积极应对人口老龄化战略的养老服务设施规划响应[J]. 规划师, 2023, 39(1): 13-19.
HUO Ziwen, XIAO Fei, LI Danni, et al. Proactive response of senior service facilities planning for social aging[J]. Planners, 2023, 39(1): 13-19.
- [3] LINTON C, GRANT-MULLER S, GALE W F. Approaches and techniques for modelling CO₂ emissions from road transport[J]. Transport Reviews, 2015, 35(4): 533-553.
- [4] 王月涛,田昭源,薛滨夏,等. 城市建成环境绿色交通系统优化方法研究综述[J]. 上海城市规划, 2023(6): 11-17.
WANG Yueao, TIAN Zhaoyuan, XUE Binxia, et al. Review on optimization methods of green transportation system in urban built environment[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2023(6): 11-17.
- [5] 王超,武丽敏. 基于“双碳”视角的丝绸之路经济带交通减排驱动因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(2): 9-19.
WANG Chao, WU Limin. Factors driving the carbon emission reduction in transport along the Silk Road Economic Belt: an analysis from the perspective of “double carbon”[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(2): 9-19.
- [6] 李春聚,姜乖妮,刘晓倩. 以低碳出行为导向的住区绿色步行系统构建研究[J]. 现代城市研究, 2017(6): 121-127.
LI Chunju, JIANG Guaini, LIU Xiaoqian. Study on the construction of residential green walking system oriented low-carbon transportation[J]. Modern Urban Research, 2017(6): 121-127.
- [7] 杨林川,唐祥龙,杨皓森,等. 机器学习支持下的老年人步行环境满意度与适老环境改善策略研究[J]. 西部人居环境学刊, 2024, 39(2): 35-40.
YANG Linchuan, TANG Xianglong, YANG Haosen, et al. Machine learning analysis of seniors' satisfaction and improvement strategy of the walking environment[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2024, 39(2): 35-40.
- [8] 张超. 城市街道步行环境中老年人意外伤害的环境因素[J]. 城市发展研究, 2023, 30(10): 29-33.
ZHANG Chao. Environmental factors of accidental injuries of the elderly in urban street walking environment[J]. Urban Development Studies, 2023, 30(10): 29-33.
- [9] 刘思敏,赵航,黄勇,等. 山地城市建成环境对老年人步行次数的影响研究——以贵阳市中心城区为例[J]. 西部人居环境学刊, 2023, 38(2): 60-67.
LIU Simin, ZHAO Hang, HUANG Yong, et al. Study on the influence of built environment in mountain cities on the walking times of the elderly: a case study of the central urban area of Guiyang[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(2): 60-67.
- [10] NEVES A, BRAND C. Assessing the potential for carbon emissions savings from replacing short car trips with walking and cycling using a mixed GPS-travel diary approach[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 123: 130-146.
- [11] KEALL M D, SHAW C, CHAPMAN R, et al. Reductions in carbon dioxide emissions from an intervention to promote cycling and walking: a case study from New Zealand[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 65: 687-696.
- [12] EWING R, PENDALL R, CHEN D J. Measuring sprawl and its transportation impacts[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1831(1): 175-183.
- [13] CERVERO R, KOCKELMAN K. Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 1997, 2(3): 199-219.
- [14] XIONG R, ZHAO H, HUANG Y. Spatial heterogeneity in the effects of built environments on walking distance for the elderly living in a mountainous city[J]. Travel Behaviour and Society, 2024, 34: 100693.
- [15] 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: 102552.
- [16] KIM Y, YEO H, LIM L. Sustainable, walkable cities for the elderly: identification of the built environment for walkability by activity purpose[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 100: 105004.
- [17] 姜玉培,甄峰,孙鸿鹄,等. 健康视角下城市建成环境对老年人日常步行活动的影响研究[J]. 地理研究, 2020, 39(3): 570-584.
JIANG Yupei, ZHEN Feng, SUN Honghu, et al. Research on the influence of urban built environment on daily walking of older adults from a perspective of health[J]. Geographical Research, 2020, 39(3): 570-584.
- [18] 魏东,杨林川. 建成环境与成都老年人步行频次的非线性关系和协同效应:可解释机器学习分析[J]. 西部人居环境学刊, 2024, 39(6): 75-82.
WEI Dong, YANG Linchuan. Non-linear and synergistic effects of built environment factors on older people's walking frequency in Chengdu: a Shapley additive explanations analysis[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2024, 39(6): 75-82.
- [19] 韩瑞娜,杨东峰,魏越. 街道空间对老年人日常活动的影响初探[J]. 西部人居环境学刊, 2023, 38(1): 37-44.
HAN Ruina, YANG Dongfeng, WEI Yue. The influence of street space on the daily activities of the elderly[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(1): 37-44.

- [20] 杨林川,唐祥龙,刘吉祥.积极应对人口老龄化战略下适老化出行的建成环境研究[J].上海城市规划,2022(1):156-162.
YANG Linchuan, TANG Xianglong, LIU Jixiang. Examining the built environment suitable for the elderly's travel under the background of the national strategy actively addressing population aging[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2022(1): 156-162.
- [21] 黄建中,胡刚钰,李敏.城市建成环境与老年人移动性衰退相互关系研究回顾与展望[J].华中建筑,2017,35(6):102-107.
HUANG Jianzhong, HU Gangyu, LI Min. Research review and prospect on the relationship between urban built environment and mobility decline in the elderly[J]. Huazhong Architecture, 2017, 35(6): 102-107.
- [22] ALSNIH R, HENSHER D A. The mobility and accessibility expectations of seniors in an aging population[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37(10): 903-916.
- [23] 李康康,杨东峰.城市建成环境如何影响老年人人体力活动——模型构建与大连实证[J].人文地理,2021,36(5):111-120.
LI Kangkang, YANG Dongfeng. How does the urban built environment affect the physical activities of the elderly: model construction and Dalian demonstration[J]. Human Geography, 2021, 36(5): 111-120.
- [24] 徐怡珊,周典,刘柯璐.老年人时空行为可视化与社区健康宜居环境研究[J].建筑学报,2019(S1):90-95.
XU Yishan, ZHOU Dian, LIU Keju. Research on the elderly space-time behavior visualization and community healthy livable environment[J]. Architectural Journal, 2019(S1): 90-95.
- [25] YANG Y, HE D, GOU Z, et al. Association between street greenery and walking behavior in older adults in Hong Kong[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101747.
- [26] 李康康,杨东峰,姜莉.老年人人体力活动意愿的建成环境影响——基于感知与中介视角[J].西部人居环境学刊,2025,40(1):73-80.
LI Kangkang, YANG Dongfeng, JIANG Li. Analysis of the relationship between built environment and physical activity willingness of the elderly: from the perspective of perception and mediation effect[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2025, 40(1): 73-80.
- [27] 王莹亮,肖健,李琪,等.城市建成环境对老年人步行出行的影响分析——基于重庆市江北区12个住区的实证[J].上海城市规划,2022(3):122-128.
WANG Yingliang, XIAO Jian, LI Qi, et al. Analysis of urban built environment influence on walking in the elderly: an empirical research based on 12 residential areas in Jiangbei District, Chongqing[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2022(3): 122-128.
- [28] 何莎,赵航,黄勇,等.山地城市建成环境对老年人步行距离的非线性影响研究——以贵阳市为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2026,44(1):98-107.
HE Sha, ZHAO Hang, HUANG Yong, et al. A study on the nonlinear influence of built environment on walking distance of elderly people in mountainous cities: a case study of Guiyang City[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2026, 44(1): 98-107.
- [29] 魏东,杨林川.老年人活力出行行为与建成环境的非线性关系[J].科技导报,2025,43(6):74-83.
WEI Dong, YANG Linchuan. Non-linear relationship between older adults' active travel behavior and the built environment[J]. Science & Technology Review, 2025, 43(6): 74-83.
- [30] 刘吉祥,肖龙珠,王波.建成环境对老年人活力出行的影响——基于极端梯度提升决策树的研究[J].科技导报,2021,39(8):102-111.
LIU Jixiang, XIAO Longzhu, WANG Bo. Non-linear effects of the built environment on elderly's active travel: an extreme gradient boosting approach[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(8): 102-111.
- [31] YANG L, AO Y, KE J, et al. To walk or not to walk? Examining non-linear effects of streetscape greenery on walking propensity of older adults[J]. Journal of Transport Geography, 2021, 94: 103099.
- [32] ZHAN D, WANG Y, WANG D, et al. The nonlinear effects of the subjective and objective built environment on active travel behavior: a case study of Shanghai, China[J]. Health & Place, 2025, 95: 103528.
- [33] 岳文秀.基于EAPRS法的老年人康体行为与场地特征的耦合关系研究——以北京市海淀区6个住宅小区为例[J].现代城市研究,2022(5):90-97.
YUE Wenxiu. Study on the coupling relationship between the elderly's physical activity and site characteristics based on EAPRS method: a case study of six residential communities in Haidian District, Beijing[J]. Modern Urban Research, 2022(5): 90-97.
- [34] 朱震军,韩吉,唐超,等.考虑出行目的差异的建成环境对老年人步行时间非线性影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(2):91-98.
ZHU Zhenjun, HAN Ji, TANG Chao, et al. Non-linear effect of built environment on elderly's walking time considering the heterogeneity of travel purposes[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2025, 44(2): 91-98.
- [35] ZHU D, SONG D, ZHU B, et al. Understanding complex interactions between neighborhood environment and personal perception in affecting walking behavior of older adults: a random forest approach combined with human-machine adversarial framework[J]. Cities, 2024, 146: 104737.
- [36] 张伊博,卓晴,王璨.高密度城市步行适宜性研究——以香港岛地铁站沿线区域为例[J].规划师,2024,40(S1):109-116.
ZHANG Yibo, ZHUO Qing, WANG Can. Research on walkability in high-density cities: a case study of areas along the MTR stations of Hong Kong Island[J]. Planners, 2024, 40(S1): 109-116.
- [37] 李如如,袁奇峰,韩高峰,等.“小街区”还是“大街区”:珠江新城居住街坊城市支路私密化之困[J].规划师,2021,37(13):87-94.
LI Ruru, YUAN Qifeng, HAN Gaofeng, et al. Small block or main street district: the planning conflict of urban branch road of residential blocks in Zhujiang New Town[J]. Planners, 2021, 37(13): 87-94.
- [38] 王明颖.从零星微更新到街区一体化更新的上海实践探索[J].上海城市规划,2024(5):42-48.
WANG Mingying. From sporadic micro regeneration to block-integrated regeneration: exploration and practical experience in Shanghai[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2024(5): 42-48.
- [39] 杨元传,张玉坤,郑婕,等.中国街区改革的关键——空间尺度和层次体系[J].城市规划,2021,45(6):9-18.
YANG Yuanchuan, ZHANG Yukun, ZHENG Jie, et al. The key to block reform in China: spatial scale and hierarchical system[J]. City Planning Review, 2021, 45(6): 9-18.