

基于视频深度学习的街道行人疗愈效应机制研究

徐丹宁 张霞* 冯恒健 韩李涛 唐炉亮

摘 要: 存量更新时代, 城市街道具备满足公众日常疗愈需求的可观潜力, 是健康城市中微观层面的高效资源。虽然已有研究将行人作为街道疗愈要素, 但缺乏定量表征, 对环境和行人如何共同影响街道疗愈性的机制不明。基于疗愈环境理论, 将行人要素纳入核心变量, 结合视频语义分割和行人检测技术, 对实验图像中的环境和行人要素进行识别与分析, 为探究街道行人数量和活动对疗愈效应的影响提供技术支撑。结果表明, 街道人流量对疗愈感知存在影响阈值, 小群体行为和自发性活动与疗愈效应呈显著正相关性, 且在街道环境的基础影响效应之上, 行人要素因对疗愈感受解释度较高而不容忽视, 可为健康疗愈导向的街道设计和更新提供依据。

关 键 词: 风景园林; 街道疗愈效应; 视频深度学习; 行人检测; 感知密度; 疗愈环境

文章编号: 1000-6664(2025)04-0087-08

DOI: 10.19775/j.cla.2025.04.0087

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-08-03

修回日期: 2024-09-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42271436)

根据《健康中国行动(2019—2030年)》(2019年), 健康城市建设是推进健康中国建设的重要抓手, 打造健康环境是构筑健康城市的重大行动之一。人居环境与公共健康密切相关, 而城市化降低了人们体验自然的可能性^[1]。在都市疗愈背景下, 城市空间更新亟须以高效的健康环境资源作为突破口。城市街道作为细粒度的健康城市空间类型, 渗透性强, 可通过低成本的调控方式来高效提升公众的健康水平^[2]。国内外学者将疗愈环境理论引入城市街道以探究其对居民的身心复愈作用, 但多关注街道物理环境, 对行人要素缺乏探讨, 而行人及其活动是街道环境必不可少的组成部分, 其对街道疗愈感知的影响急需得到探究。基于此, 本研究以武汉市最有代表性的黎黄陂路为例, 采用人和环境的双视角, 根据疗愈环境理论与街道空间需求理论, 提炼出2类街道要素, 并以视频实验结合深度学习技术, 厘清行人要素的疗愈效应与机制, 提出精细化的街道疗愈品质优化策略, 为打造行人友好型步行环境提供新的解决思路。

1 相关研究进展

1.1 街道行人要素对疗愈效应的影响

疗愈环境研究始于20世纪60年代, 提出了

“恢复性环境”概念, 指能帮助人们从精神疲劳和消极情绪中恢复的环境^[3], 恢复是重新获得适应外界需求的能力的过程^[4]。卡普兰(Kaplan)夫妇的注意力恢复理论(attention restoration theory, ART)和乌尔里希(Ulrich)的减压理论(stress reduction theory, SRT)是经典疗愈环境理论, 前者关注定向注意力的恢复^[5], 后者关注压力的减少^[6]。早期研究集中于自然环境和医疗建筑, 2003年后, 建成环境中自然要素的疗愈性受到关注^[7]。近10年来, 疗愈环境的概念得到普及, 研究显示, 积极的城市环境如商业街等可能带来情感益处^[8-10]。然而, 建成环境的疗愈性研究仍较少, 其潜力有待深度挖掘。

街道兼具生态廊道与公共空间功能, 其使用频率高, 社交属性强, 能满足居民多样化的活动需求^[11]。在高密度城市中, 街道尺度较小、类型多样, 对其进行疗愈导向更新具有可操作性, 是探究建成环境疗愈性的代表空间。研究显示, 绿植、建筑、界面和人等要素都与街道疗愈性显著相关, 疗愈性因街道类型不同而异^[12-15]。徐磊青等提出由活动性、宜人性、生态性、稳静性构成的疗愈街道模型^[11]。然而, 多数研究使用无人或少人街道场景, 少数识别行人要素的研究表明人对疗愈性的影响不明或为负向^[11, 13]。拉普卜

特(Rapoport)提出人是建成环境中的非固定特征因素^[16], 街道行人是他人眼中的环境客体^[17], 人和活动是建成环境区别于自然环境的重要特征。有学者关注到人在营造氛围、提供社会支持方面的疗愈作用^[18-20], 如巴罗斯(Barros)指出适宜数量的行人强化了街道的疗愈性^[18]; 哈蒂格(Hartig)指出, 人际互动会减弱或放大疗愈体验^[1]。现有研究多集中于街道的物质环境, 忽视了人与活动对疗愈性的影响^[1, 8], 少数对行人要素的探讨以定性访谈为主, 缺乏对行人内涵的深度剖析、精准测度及其疗愈效应机制的挖掘。

在现有街道疗愈性指标的基础上, 本研究对行人指标进行细化和增加, 将其分为行人数量和行人活动2个维度^[17]。1)行人数量: 人数反映街道空间的复杂性和受欢迎程度^[17], 但过高或过低的人群密度都可能引起消极感知^[21]。旅游学研究表明游客的积极情绪与最佳拥挤程度呈倒“U”型曲线关系^[21-22]。拉普卜特指出主观场所密度是感知密度, 适度的感知密度可能使人增强对环境的偏好^[23-24]。感知密度受个体差异、物质环境和人际交往影响, 如接触到的他人规模、行为等^[21, 25]。因此, 行人数量对疗愈感受的影响可能呈非线性关系, 并因情境不同而异。2)行人活动: 分为活动类型和活动聚集程度两方面。活动

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: xiazhang@whu.edu.cn

类型包括购物、休闲、穿行等^[26-27]，其中自发性与社会性活动能提升街道品质^[17]。研究显示，主观活动具有疗愈性^[10]，如卡普兰将园艺活动视为恢复性活动^[28]。根据情绪感染理论，他人的客观活动可能也具有疗愈性，因为观察者会受到他人情绪和行为的影 响，产生相似的反应^[29]。活动聚集程度指街道上人群因不同目的而集中的程度，由个体行为、小群体行为和多人群体行为的构成来表征。群体行为是内部成员社会互动的结果^[30]，其中小群体指规模较小、成员具有亲密人际关系的群体^[31]，多人群体则具有成员角色多样、社会互动复杂的特征。不同规模的群体行为带给人的感受有异，例如，小规模的朋友聚会能带来温馨感，而大规模的庆典则可能带来震撼感或紧张感^[32]。在探究街道疗愈性时，对行人数量的量化及其可能的非线性影响研究较少，尚无研究将他人活动类型及聚集程度作为观测客体元素。

1.2 街道行人要素测度方法

针对行人数量，多数研究采用栅格法或语义分割统计行人像素点占比，个别研究通过现场计数统计人数^[11]，难以实现大规模准确测度。李韵琴等在活力研究中建立了基于街道人数的多目标跟踪模型，为探究行人疗愈性提供了新思路^[33]。行人活动方面，除传统实地观察法外，有研究使用深度学习方法识别行为，但只能区分步行、坐下、站立等5类活动^[33]。为精确探究群体行为构成、多分类活动的疗愈效应，仍需基于经典街道理论进行人工判别。因此，本研究引入目标检测任务，采用YOLO(you only look once)系列算法精确计数行人；根据街道活动相关研究，人工识别个体与群体行为，以及必要性和自发性活动^[26, 34]。

综上，以往研究主要关注街道物质环境要素，对行人要素研究不足。本研究在传统物质要素基础上，细化行人数量要素，新增活动聚集程度、活动类型2个行人活动要素，并运用视频语义分割和行人检测技术，精准识别物质环境和人数要素，探究环境与人对街道疗愈性的共同影响。

2 研究方法

2.1 研究范围

黎黄陂路位于武汉市江岸区，是湖北省5个国家级旅游休闲街区之一，以慢生活为特色，

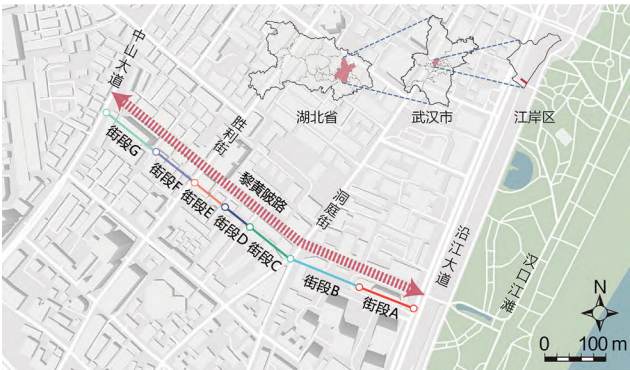


图1 黎黄陂路区位分布

长604 m，步行约6 min(图1)。其始建于1900年，是汉口租界区保存最完好的街区之一，包含行政、住宅、商业、医院、学校，以及众多历史建筑。2016年修复后，成为武汉首条历史风貌步行街，同时吸引众多网红店铺与年轻消费者，汇聚文创非遗、咖啡餐饮等产业。黎黄陂路尺度宜人，集红色历史、传统文化和现代商业于一体，综合居住、休闲、文旅、商业等多种功能，街道空间数据多样，是承载城市公共生活的理想场所。

2023年3月，在鲍鼎杯调研竞赛中，笔者以黎黄陂路为研究对象，通过不同年龄段人群的街道漫步疗愈效应评价，发现此路段疗愈评分较高，是进行人群疗愈效应研究的典型样本。

2.2 研究变量

通过回顾疗愈环境理论、街道空间品质相关研究提出的测度指标^[11, 17, 26, 35]，依据感官感知维度和疗愈建筑环境分类维度^[20, 36]，将自变量分为街道环境、街道行人2类要素。对视频深度学习技术进行分析，筛选算法支持测度的关键特征，最终得到16个分项指标(表1)。

1)街道环境：包括自然生态、街道空间、街道交通、社交支持、历史文化5个一级要素，分设13个二级指标。社交支持要素指支持社交活动的公共设施和第三场所^[20]，包括公共座椅和底层临街区。其中，底层临街区按通透性分为实墙、格栅、玻璃和灰空间界面^[14, 19]，灰空间指室外座椅与遮阳伞共同出现的临街区域。历史文化要素指文化历史物件^[20]，包括街道家具和历史建筑2个指标。

2)街道行人：包括行人数量和行人活动2个一级要素。行人数量采用人群流量表征，对每段视频帧画面人数取均值获得。行人活动要素包括活动聚集程度和活动类型2个指标。研究显示，

公共空间的个体活动和群体活动约各占30%，2~3人的活动约占40%^[37]，故将本研究中的街道活动分为个体活动、2~3人的小群体活动和大于4人的多人群体活动。计算公式如下：

活动聚集程度=a×个体活动+b×小群体活动+c×多人群体活动

将活动类型按个体与群体、必要性与自发性活动分为4类，其中必要性活动包括通勤、购物等，自发性活动包括休憩、游览等^[17, 34]。计算公式如下：

活动类型=d×个体必要性活动+e×群体必要性活动+f×个体自发性活动+g×群体自发性活动

对二级指标做归一化处理，得出行人活动要素计算公式如下：

行人活动=α×活动聚集程度+β×活动类型

式中：a~g、α和β均由相关系数计算得出。

因变量方面，疗愈效应多采用问卷量表或可穿戴设备测量。相较于生理检测技术，疗愈性量表应用更广泛，且与生理测量结果重叠度

表1 街道疗愈效应自变量测度指标

视角	一级指标	二级指标
街道环境	自然生态要素	绿视率
	街道空间要素	普通建筑出现率
		步行界面
		天空率
	街道交通要素	非机动车出现率
		机动车出现率
	社交支持要素	公共座椅
		实墙
		格栅
		玻璃
		灰空间
	历史文化要素	街道家具
街道行人	行人数量要素	历史建筑出现率
		人群流量
	行人活动要素	活动聚集程度
		活动类型

较高^[38]。在基于ART或SRT开发的多种环境疗愈性评价量表中, RS(the restoration scale)量表综合2个理论, 包含情绪、生理、认知、行为4个维度^[38]。故本研究采用RS恢复性量表作为效应评价工具。

2.3 实验设计

在实验范式中, 刺激材料包括照片、视频、虚拟场景等。视频可以提供沉浸式体验, 展现人的活动, 故研究选取包含环境和行人的漫步视频作为被试材料。

实验设计包括视频采集、“压力-疗愈”实验、视频自变量数据处理3步(图2)。

在视频采集阶段, 实验人员使用同一手机结合稳定器, 以30fps、4K分辨率进行拍摄。拍摄始于沿江大道, 沿道路中央以固定视点(1.6 m)和步速(1.1 m/s)行进。拍摄于2023年5月13—19日, 天气适宜, 覆盖工作日和休息日, 每日从8:00—21:00准点拍摄。拍摄结束后, 采用premiere pro剪辑视频, 将黎黄陂路按街道物质环境差异、功能属性变化、岔路口不同细分为7段, 编号为A~G(图1)。每个路段初选出工作日和休息日视频各1组, 共计196段视频。依据人流密度梯度将视频分为I、II、III组, 共选出21段视频, 单段1~2 min(图3)。

实验在数字实验室进行, 共招募32名高校学生, 其中男女生、有无建筑学相关背景比例均约为1:1, 年龄在18~30岁。将被试者分为7组, 确保性别和专业背景均衡。被试者需对同组内的7个视频、编号相同组别不同的3个视频进行9次疗愈性评价。为减轻精神疲劳, 实验分2 d开展, 时段为6月19和20日的8:00—21:00。首日随机观看编号为I、II或III组的7个视频, 次日观看同编号的3个视频。实验分为实验前准备、测试数据采集2个阶段。在准备阶段, 实验人员向被试者介绍实验流程。测试数据采集分为T1基线测量、恐怖视频施压、T2压力测量、观看漫步视频、填写RS量表5步。采用视觉模拟量表测量T1和T3状态的焦虑与紧张程度, 评分范围为0~10分。观看顺序随机, 观看每段视频后均需填写RS量表, 疗愈阶段共重复9次(图2)。

自变量数据处理过程如图2所示, 使用python脚本将视频按1帧/4 s截取关键帧, 共截取500帧, 通过数据增强生成5 000张图片作为训练集。将视频逐帧提取, 得到2 000张图片作

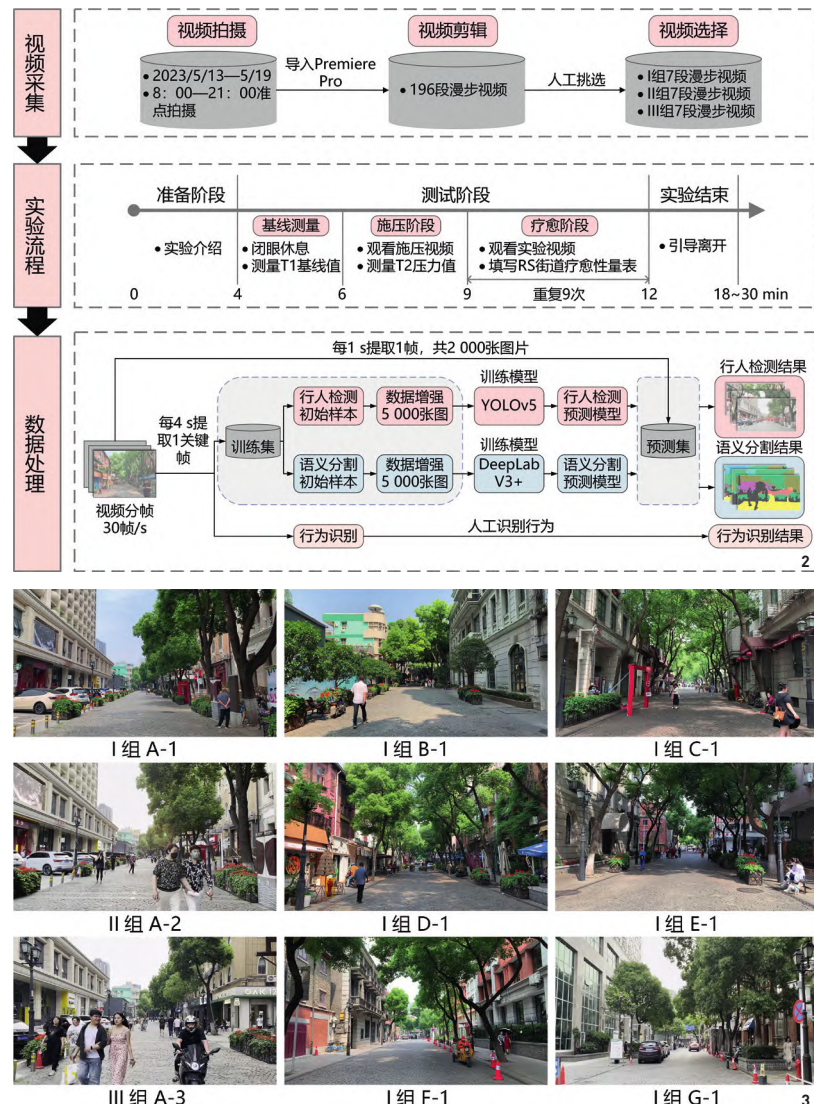


图2 实验设计流程

图3 各街段视频示意(徐丹宁、黄钰钰、李明欣、刘晟劫摄)

为预测集。由于DeepLab V3+模型具有强大的多尺度特征提取和上下文理解能力, 在建成环境特征分析中被广泛使用^[39], 故被确定为本研究语义分割的模型。共设置22类语义标签, 训练后在Pascal VOC数据集上达到了81.24%的mIoU。针对行人数量, 建立YOLOv5模型, 训练后经测试得到的AP值为89.77%。分别用训练好的DeepLab V3+和YOLOv5模型对预测集图片进行语义分割和行人检测。针对行人活动, 以500张图片为样本, 进行人工识别。由于样本路段整体环境相似, 人的视觉感知存在一定视野和视距, 单帧画面各环境要素指标的标准差相差较小, 故对单帧图像的各类客观要素进行统计, 以每组图像均值作为自变量取值。

2.4 数据分析

对受试者观看恐怖视频前后的心理状态进

行统计, 单人压力平均增大3个等级, 证明压力被有效诱发。实验保留有效问卷30份, 分析如下: 1)对不同人数分组进行单因素方差分析, 验证分组合理性, 对RS量表数据进行信效度检验, α 系数为0.956, KMO值为0.946, 证明数据信效度均较好, 并进行描述性统计分析; 2)采用皮尔逊相关性分析得出行人要素与疗愈效应各维度的相关性; 3)对街道环境要素、行人要素进行分层线性回归分析, 探究行人要素对街道疗愈效应的解释度; 4)对自变量指标进行因子分析, KMO值为0.735, 且通过Bartlett检验, 表明因子分析适用。抽取3个特征因子, 结合疗愈效应进行多重线性回归分析, 确定环境和对街道疗愈效应的共同影响程度。

统计分析在IBM SPSS Statistics 26中完成。

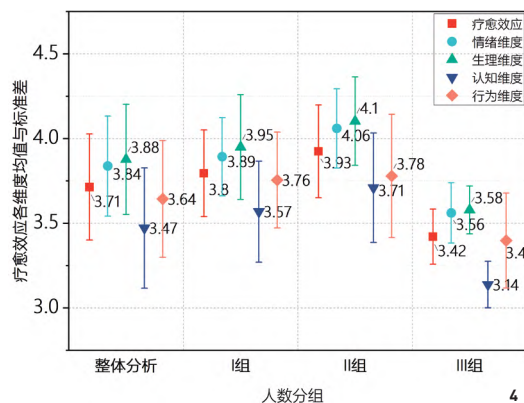


图4 各人数分组疗愈效应均值与标准差分析

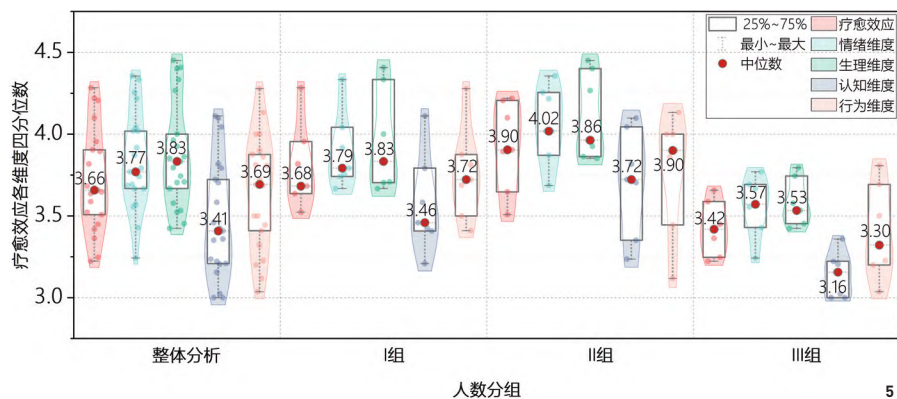


图5 各人数分组疗愈效应数据分布

3 结果与分析

根据表2, I组(0~15人)、II组(15~30人)、III组(30~50人)的分类显著($p < 0.01$), 表明各组的疗愈性评价差异明显。

3.1 街道疗愈效应评价结果

受访者对疗愈效应、情绪和生理维度的感知均值接近4分, 数据分布集中且稳定。然而, 认知和行为维度的感知均值较低, 数据分散且波动较大(图4、5), 表明受访者对不同街段的疗愈效应、情绪和生理维度的感知具有一致性, 情绪和生理方面的疗愈感受最易被触发; 对行为和认知维度的评价差异较大, 说明在情感归属、行为意愿方面, 人们对街道情境有一定偏好。

不同人数分组的均值都超过了量表最高分的一半, 表明街道在不同人流量时均具有正向疗愈效果。疗愈效应值排序为: II组 > I组 > III组, 说明人数中等的场景疗愈性最高, 人少时次之, 人多时最低(图4)。图5显示, I组各街段的生理维度评分差距较大, III组场景差异主要影响行为维度, II组各维度评分均波动较大, 表明人数中等时, 人们对场景存在个体偏好。

3.2 行人要素与街道疗愈效应的相关性分析

表3呈现了各组自变量与疗愈效应的相关性分析结果。针对行人数量要素, 整体来看, 人数增加与受试者精神紧张相关, 但人流量在I、II、III组的疗愈效应呈显著差异, 故本研究推测行人数量可能具有阈值效应。采用多种曲线进行拟合(图6-1), 其中三次多项式结果最优($R^2=0.6$)。进一步得出曲线拐点分别是12.94和43.70, 证明行人数量对疗愈效应的影响存在阈值(图6-2)。当视野中行人 < 13人时, 疗愈效应呈增大趋势; 当13人 < 行人 < 44人时, 疗愈效应随人数的增

加而降低; 而当44人 < 行人 < 50人时, 疗愈效应再次呈上升趋势。人群流量曲线反映了黎黄陂路不同街段的整体情况, 表明在整条街道上行走时, 不同街段的人数变化会带给人不同的疗愈感受。例如, E街段在人流量极大时, 其疗愈效应强于C、G等街段流量中等时的场景。

为解释人群流量对疗愈效应的影响, 进一步对I、II、III组与疗愈相关的场景要素进行分析。表3显示, 交通和实墙要素在3组场景中均与疗愈效应负相关。在I组场景中, 街道环境是主要的正相关要素; II组中, 群体自发性活动和街道家具与疗愈效应显著正相关; III组中, 人群流量和社交支持要素呈显著正相关性。这表明在人数不同时, 街道空间起疗愈作用的要素存在差异, 街道环境与人际交往的双重影响会改变感知密度, 进而诱发积极或消极的感受。

如表4所示, 活动聚集程度方面, 小群体行为与疗愈效应显著正相关, 表明其有助于人们增强街道体验意愿。根据相关系数, 将a、b、c分别赋值为1、3和2, 则活动聚集程度=个体行为+3×小群体行为+2×多人群体行为。活动聚集程度与疗愈效应正相关, 即在人数相同的场景中, 小群体和多人群体越多, 带给人的疗愈感受越强。

活动类型方面, 自发性活动与疗愈效应显著正相关, 特别是群体自发性活动, 而自发性活动多发生在有吸引力的外部环境中, 说明积极环境和群体互动可以增强旁观者的参与感, 观察他人活动也是行人获得疗愈感的重要途径。计算得出, 活动类型=-0.01×个体必要性活动-0.46×群体必要性活动+0.60×个体自发性活动+0.87×群体自发性活动。具体分析, 群体亲子行为(0.53)和群体休憩行为(0.52)与疗愈效应的

正相关性最高, 表明观察亲子互动和休憩活动能带给旁观者放松感。群体摆摊、个体逗宠、室外餐饮、拍照行为则分别与单项疗愈维度正相关(表4)。

经归一化处理, 得出行人活动要素=0.47×活动聚集程度+0.53×活动类型, 且活动类型与疗愈效应的相关性更高。

3.3 行人要素对街道疗愈效应的解释度

为探究行人要素对街道疗愈性的增量贡献, 研究建立了分层线性回归模型(表5)。采用逐步回归筛选核心环境要素, 使用疗愈效应值参与回归, 建立基于街道环境的模型1, 在其上加入行人数量和活动变量构建模型2。所有自变量均通过共线性检验($VIF < 5$)。结果表明, 模型1显著($p < 0.05$), 环境要素对疗愈效应的解释度是62.5%($R^2=0.625$); 模型2通过F检验, 且模型拟合度明显提升($p < 0.01$), 提示纳入行人要素显著增强了街道疗愈性解释准确性。从模型1到模型2, R^2 值由0.625升至0.836, 说明行人要素解释了21.1%的疗愈效应, 证实其也是核心影响变量。

3.4 环境与行人对街道疗愈效应的共同影响

街道自变量因子分析共抽取自然与社交特征、街道行人特征、街道交通特征3个因子。自然与社交特征包括绿视率、街道家具、公共座椅、灰空间等, 街道行人特征包括行人数量和活动要素, 街道交通特征包括机动车和非机动车出现率、实墙。每个特征因子内部的要素均有共变性。

线性回归结果显示, 模型拟合 R^2 为0.504, 具有中等解释力(表6)。p值在0.01水平上显著, 说明自变量整体上对因变量有明显影响。各特征要素p值 < 0.05, 其对疗愈效应的影响程度依

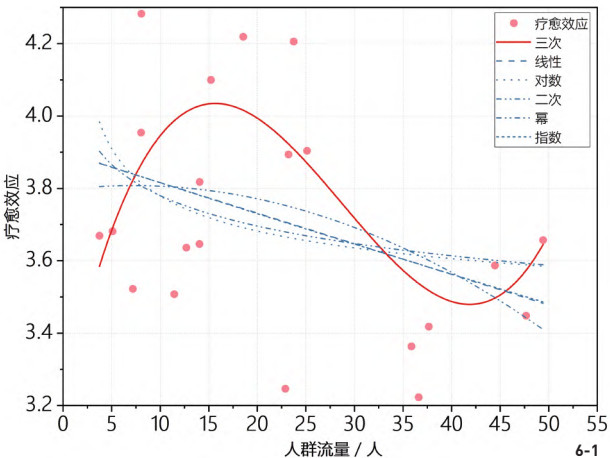


图6-1 人群流量与疗愈效应不同类型曲线拟合图

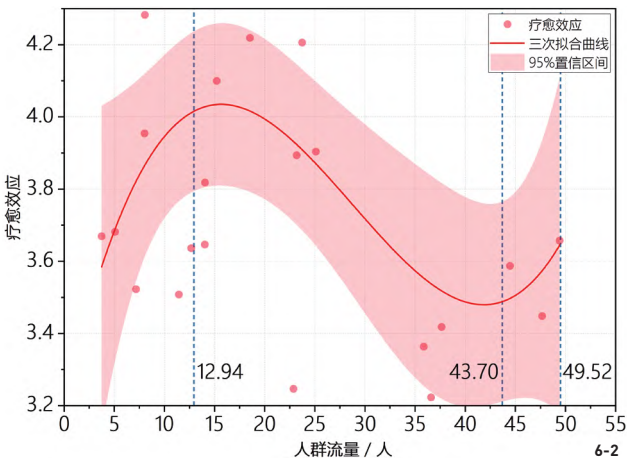


图6-2 人群流量与疗愈效应三次曲线拟合图

次是：自然与社交特征(0.568)>街道交通特征(0.561)>街道行人特征(0.475)。其中，自然生态和社交支持要素是疗愈作用相似的同类变量，二者的正向疗愈影响最大，表明其可以提升街道舒适性并促进社会交往；街道行人要素作用次之，表明行人活动有助于活跃街头氛围，增强受试者的身心疗愈感受；街道交通特征具有负向影响，说明较高的交通流量和实墙会增加行人压力。

4 结论与讨论

本研究从人与环境的双视角探讨影响街道疗愈效应的要素，增加和细化行人测度指标，结合视频深度学习技术量化行人要素，分析人流量及其活动与疗愈效应的相关性，阐明了街道行人和环境对疗愈感受的共同影响机制。结论如下。

1)行人要素与疗愈效应显著相关，应结合街道空间打造感知密度适宜的环境。以往研究提出街道人群可以增加街道魅力^[18]。本研究定量证实了行人数量和活动对街道疗愈性的积极影响。人流量对疗愈性具有先促进、后抑制、再促进的非线性影响。当人数较少时，静谧的环境可能诱发孤立感，人数增加提升了街道安全感，带来积极感受；人数中等时，密度感知来源于人际交往方面，人数和活动的增多使社会刺激超载，受试者的感知密度超出预期，产生拥挤感；人数较多时，疗愈性由社交支持环境和行人要素的整体氛围决定，随人数增多，场景多样性提高，但信息负载并不高，表现为感知密度适宜，疗愈效应提升。感知密度与环境、人际交往相关，人流量和场景保持协调时，人们更易拥有正向体验，反之则会因信息超载而诱发负面情绪。

活动方面，自发性活动和小群体行为与疗愈效应显著正相关，其中亲子、休憩、拍照、摆摊、逗宠等行为具有明显疗愈性。活动的疗愈效应来源于两方面：一是个体与群体情绪感染机制，即当他人进行疗愈性活动时，受试者会捕捉到相似的非语言线索并感到疗愈；二是活动本身满足了行人的亲生物性倾向，如逗宠活动可通过多感官体验使人降低压力。在未来的街道疗愈性提升改造中，应设置分流空间以减弱行为限制、

增设街道设施以满足活动需求、提升环境线索有序性以避免信息过载，缓和拥挤压力，同时引入适当的社交活动。

2)行人是疗愈效应的核心影响要素之一，街道建设应注重行人特征和环境协调。以往研究集中于建立街道环境要素的疗愈影响模型^[11]，避免行人的不确定性。然而，本研究发现行人变量为街道疗愈效应贡献了21.1%的解释度，不可忽视。因此，在优化建成环境疗愈品质时，应充分

表2 行人数量分组方差分析结果

分组变量(平均值 ± 标准差)	I组	II组	III组	F	p
疗愈效应	3.80 ± 0.26	3.93 ± 0.27	3.42 ± 0.16	8.666	0.002**

注：**p<0.01。

表3 各自变量要素与疗愈效应相关性分析结果

	整体分析	I组	II组	III组
行人数量要素	-0.458*(生理)	—	0.808*(行为)	0.806*
行人活动要素	0.508*	—	—	—
个体室外餐饮	0.381*(行为)	—	—	—
个体休闲逗宠	0.442*(认知)	—	—	—
群体休憩行为	0.519*	—	0.762*	—
群体散步游览	—	-0.824*	—	-0.885*
群体拍照行为	0.376*(行为)	—	—	—
群体亲子行为	0.533*	—	—	0.783*(认知)
群体摆摊集市	0.461*(生理)	—	0.901*	—
街道环境	0.469*	0.757*	—	—
自然生态要素	0.508*	0.827*	—	—
街道空间要素	—	-0.670*(行为)	—	-0.737*(行为)
街道交通要素	-0.445*	-0.805*(行为)	-0.820*	-0.776*
社交支持要素	0.600***(行为)	0.863*(行为)	—	0.702*
公共座椅	0.460*(生理)	—	—	0.701*(行为)
格栅和灰空间	0.560***(行为)	0.808*	—	—
实墙	-0.638***(行为)	-0.727*(认知)	-0.837*(行为)	-0.841**
街道家具	0.433*	—	0.736*	—

注：1)*p<0.05, **p<0.01; 2)除标注具体维度外，其余数值均代表要素与疗愈效应的相关性。

考虑人流量及活动特征。

3)自然与社交特征和街道行人特征是提升街道疗愈效应的主要变量，应对自然和社交支持设施进行重点设计，同时改善区域的交通规划。与以往研究相符，绿视率是疗愈效应最高的要素^[13]，表明自然生态环境具有极大的减轻精神疲劳的作用。街道家具正相关性次之，具有类似自然要素的积极情绪调动作用，其中的红色电话亭、邮筒等能唤起受试者的归属感与场所记忆。社交支持要素主要通过影响受试者的认知和行为方面提升其疗愈感受，如半开敞界面在满足私密性和安全感的同时，提高了视线可达性，可以促进行人驻留和探索^[14, 19]。座椅已被定性研究证实可在建成环境中提供疗愈体验^[18]，本研究采用定量方式证实了公共座椅的社交支持属性及疗愈效果。人们在公共座椅上可以进行休闲、思考等活动，多位受试者提到“座椅上晒太阳的人”使自己感到很治愈。交通要素的消极影响同前人研究结果一致^[13]，黎黄陂路FG路段由于存在医院、学校等多类型场所，人车混行情况严重，使行人安全感降低。未来进行街道设计时，应保障绿化、座椅、街道家具等要素的充足，对交通流量大的特色街道实行“分时步行”或“人流步行、车辆绕行”等管控策略。

研究拓展了建成环境疗愈性的理论，证明疗愈效应不仅来自传统的街道环境，更受到动态行人的影响，这种基于人和环境互动产生疗愈效应的认识，突破了以往单一街道环境下所做的假设，更符合实际情况，可以为合理配置街道设施、提升居民健康水平及推动健康城市发展提供新的设计方向。在未来研究中，应进一步对不同类型的多条街道进行实验，以验证结论的普适性。

注：文中图片除注明外，均由徐丹宁绘制。

参考文献：

[1] HARTIG T. Restoration in nature: beyond the conventional narrative[M]//SCHUTTE A R, TORQUATI J C, STEVENS J R. Nature and Psychology: Biological, Cognitive, Developmental, and Social Pathways to Well-Being. Cham: Springer International Publishing, 2021: 89–151.

[2] 王金岩, 孙世德, 许美洁, 等.健康经济学视角下健康城市空间组织框架及推进策略[J].区域经济评论, 2023(5): 79–86.

表4 行人活动要素与疗愈效应相关性分析

皮尔逊相关性系数		疗愈效应	情绪维度	生理维度	认知维度	行为维度
行人活动要素	—	0.508*	0.451*	0.444*	0.587*	0.424
活动聚集程度	活动聚集程度	0.489*	0.437*	0.418	0.568**	0.409
	个体行为	0.177	0.210	0.137	0.211	0.094
	小群体行为	0.470*	0.380	0.413	0.544*	0.435*
	多人群体行为	0.164	0.180	0.152	0.157	0.132
活动类型	活动类型	0.551**	0.477*	0.505*	0.627**	0.455*
	必要性活动	−0.015	0.062	−0.069	0.004	−0.063
	个体必要性活动	−0.007	0.070	−0.062	0.013	−0.054
	群体必要性活动	−0.254	−0.239	−0.201	−0.274	−0.253
	自发性活动	0.521*	0.456*	0.475*	0.594**	0.427
	个体自发性活动	0.329	0.303	0.291	0.376	0.259
	群体自发性活动	0.484*	0.402	0.453*	0.549**	0.410

注：* $p<0.05$ ；** $p<0.01$ 。

表5 分层线性回归模型结果

研究变量	模型1：街道环境要素				模型2：街道环境与街道行人要素			
	<i>B</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	VIF	<i>B</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	VIF
常数	3.714**	74.311	0.000	—	3.714**	103.989	0.000	—
绿视率	0.202	2.084	0.056	3.587	0.131	1.816	0.094	3.897
街道家具	0.244**	3.153	0.007	2.281	0.215**	3.616	0.004	2.650
机动车出现率	0.021	0.298	0.770	1.894	−0.046	−0.856	0.409	2.109
公共座椅	−0.030	−0.417	0.683	1.984	−0.133*	−2.286	0.041	2.545
格栅	0.083	0.966	0.351	2.792	0.034	0.494	0.630	3.619
实墙	0.032	0.413	0.686	2.271	−0.157	−2.134	0.054	4.050
行人数量	—	—	—	—	−0.287**	−3.762	0.003	4.357
行人活动	—	—	—	—	−0.099	−1.503	0.159	3.224
R^2	0.625				0.836			
调整 R^2	0.465				0.727			
<i>F</i> 值	$F(6, 14)=3.892, p=0.017^*$				$F(8, 12)=7.643, p=0.001^{**}$			
ΔR^2	—				0.211			

注：1)因变量：疗愈效应；2)* $p<0.05$ ，** $p<0.01$ ；3)*B*为非标准化回归系数，*t*值=*B*/标准误，VIF为方差膨胀因子，若VIF值<5，则无共线性问题。

表6 疗愈效应与街道自变量线性回归结果

	Beta	<i>t</i>	<i>p</i>	VIF	容忍度
常数	—	71.177	0.000**	—	—
自然与社交特征	0.568	2.670	0.016*	1.549	0.646
街道交通特征	−0.561	−2.631	0.018*	1.560	0.641
街道行人特征	0.475	2.765	0.013*	1.011	0.989
R^2	0.504				
调整 R^2	0.416				
<i>F</i>	$F(3, 17)=5.756, p=0.007^{**}$				
<i>D</i> − <i>W</i> 值	2.258				

注：1)因变量：疗愈效应；2)* $p<0.05$ ，** $p<0.01$ ；3)*Beta*为标准化回归系数。

- Psychology, 1991, 11(3): 201-230.
- [7] 孟丹诚, 徐磊青. 疗愈建筑与疗愈环境的回顾及展望: 基于文献计量分析方法[J]. 建筑学报, 2022(S1): 170-178.
- MENG D C, XU L Q. Retrospect and Prospect of Frontier Research on Healing Architecture and Healing Environment Based on Bibliometrics Method[J]. Architectural Journal, 2022(S1): 170-178.
- [8] BORNOLI A, SUBIZA-PÉREZ M. Restorative urban environments for healthy cities: a theoretical model for the study of restorative experiences in urban built settings[J]. Landscape Research, 2023, 48(1): 152-163.
- [9] WEBER A M, TROJAN J. The restorative value of the urban environment: a systematic review of the existing literature[J]. Environmental Health Insights, 2018, 12: 1-13.
- [10] STAATS H, JAHNCKE H, HERZOG T R, et al. Urban options for psychological restoration: common strategies in everyday situations[J]. Plos One, 2016, 11(1): 1-24.
- [11] 徐磊青, 胡滢. 疗愈街道一种健康街道的新模型[J]. 时代建筑, 2020(5): 33-41.
- XU L Q, HU Y Z. Healing Street A New Model of Healthy Street[J]. Time + Architecture, 2020(5): 33-41.
- [12] HAN X, WANG L, HE J, et al. Restorative perception of urban streets: interpretation using deep learning and mgwr models[J]. Frontiers in Public Health, 2023, 11: 1-13.
- [13] 殷雨婷, 凯文·思韦茨, 邵珏涵, 等. 街道环境疗愈效能及功能价值的平衡研究: 以上海市杨浦区大学路与国康路为例[J]. 新建筑, 2021(4): 55-60.
- YIN Y T, THWAITES K, SHAO Y H, et al. The Balance of the Restorativeness and Functional Value of Street Environment: Case Studies of Daxue Road and Guokang Road, Yangpu District, Shanghai[J]. New Architecture, 2021(4): 55-60.
- [14] 徐磊青, 孟希若, 黄舒晴, 等. 疗愈导向的街道设计: 基于VR实验的探索[J]. 国际城市规划, 2019, 34(1): 38-45.
- XU L Q, MENG R X, HUANG S Q, et al. Healing Oriented Street Design: Experimental Explorations via Virtual Reality[J]. Urban Planning International, 2019, 34(1): 38-45.
- [15] LINDAL P J, HARTIG T. Architectural variation, building height, and the restorative quality of urban residential streetscapes[J]. Journal of Environmental Psychology, 2013, 33: 26-36.
- [16] 阿莫斯·拉普卜特. 建成环境的意义[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 74-78.
- RAPOPORT A. The Meaning of the Built Environment: A Nonverbal Communication Approach[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 74-78.
- [17] 李昆澄, 程世丹, 李欣. 城市街道品质指标及测度方法[J]. 统计与决策, 2019, 35(11): 56-59.
- LI K C, CHENG S D, LI X. Urban Street Quality Indicators and Measurement Methods[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(11): 56-59.
- [18] BARROS P, MEHTA V, BRINDLEY P, et al. The restorative potential of commercial streets[J]. Landscape Research, 2021, 46(7): 1017-1037.
- [19] 刘昆, 匡晓明, 奚婷霞, 等. 健康睦邻社区的街道边界探索眼动和行为学证据[J]. 时代建筑, 2022(5): 28-37.
- LIU K, KUANG X M, XI T X, et al. Exploring Street Edges in a Healthy Livable Neighborhood Evidence from Eye-Tracking and Behavioral Data[J]. Time + Architecture, 2022(5): 28-37.
- [20] 徐磊青, 何南, 孟丹诚. 疗愈建筑学都市疗愈中的建筑环境及其指标[J]. 时代建筑, 2022(5): 6-14.
- XU L Q, HE N, MENG D C. Healing Architecture The Index and Factors of Built Environment in Urban Healing[J]. Time + Architecture, 2022(5): 6-14.
- [21] 程云, 殷杰. 游客拥挤的生成、差异与影响: 综述与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(2): 121-127.
- CHENG Y, YIN J. An Overview and Future Prospect on Generation, Difference and Effect of Tourist Crowding[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(2): 121-127.
- [22] STOKOLS D. On the distinction between density and crowding: some implications for future research[J]. Psychological Review, 1972, 79(3): 275-277.
- [23] 徐磊青, 杨公侠. 环境心理学: 环境、知觉和行为[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002: 67-70.
- XU L Q, YANG G X. Environmental Psychology: Environment, Perception, and Behavior[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 67-70.
- [24] 李道增. 环境行为学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 113.
- LI D Z. Introduction to Environmental Behavior[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 113.
- [25] RAPOPORT A. Toward a redefinition of density[J]. Environment and Behavior, 1975, 7(2): 133-158.
- [26] 徐磊青, 施婧. 步行活动品质与建成环境: 以上海三条商业街为例[J]. 上海城市规划, 2017(1): 17-24.
- XU L Q, SHI J. Walking Activity Quality and Built Environment: Take Three Commercial Streets in Shanghai as Examples[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2017(1): 17-24.
- [27] 郭茹, 王洪成. 生活服务街道景观特征对步行活动影响及优化: 以天津市中心城区街道为例[J]. 风景园林, 2020, 27(10): 99-105.
- GUO R, WANG H C. Influence of Landscape Composition Characteristics on Walking Activities in Life Service Streets and Its Optimization: A Case Study of Streets in Downtown Tianjin[J]. Landscape Architecture, 2020, 27(10): 99-105.
- [28] KAPLAN S. The restorative benefits of nature: toward an integrative framework[J]. Journal of Environmental Psychology, 1995, 15(3): 169-182.
- [29] 王潇, 李文忠, 杜建刚. 情绪感染理论综述述评[J]. 心理科学进展, 2010, 18(8): 1236-1245.
- WANG X, LI W Z, DU J G. The Advance Research of Emotional Contagion Theory[J]. Advances in Psychological Science, 2010, 18(8): 1236-1245.
- [30] 张静, 孙慧轩. 群体行为的研究现状与展望[J]. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2016, 18(3): 91-98.
- ZHANG J, SUN H X. Research Status and Prospect of Collective Behavior[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications (Social Sciences Edition), 2016, 18(3): 91-98.
- [31] 刘蒙之. 美国小群体传播研究的范式与理论评述[J]. 昆明理工大学学报(社会科学版), 2012, 12(4): 88-95.
- LIU M Z. An Overview on Paradigms and Theories of Small Group Communication Research in the USA[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Social Sciences), 2012, 12(4): 88-95.
- [32] ZEITZ K M, TAN H M, GRIEF M, et al. Crowd behavior at mass gatherings: a literature review[J]. Prehospital and Disaster Medicine, 2009, 24(1): 32-38.
- [33] LI Y, YABUKI N, FUKUDA T. Exploring the association between street built environment and street vitality using deep learning methods[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 79: 103656.
- [34] GEHL J. Life Between Buildings: Using Public Space[M]. Washington, D.C.: Island Press, 2011: 9-14.
- [35] 聂焯城, 陈奕言, 陈箐. 建成环境可步行性研究及测度发展综述[J]. 南方建筑, 2022(4): 88-98.
- NIE X C, CHEN Y Y, CHEN Z. Research Review of the Walkability and Measurement Development of Built Environment[J]. South Architecture, 2022(4): 88-98.
- [36] GRAHN P, STIGSDOTTER U K. The relation between perceived sensory dimensions of urban green space and stress restoration[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3): 264-275.
- [37] 陈义勇, 刘卫斌. 使用者行为视角的城市大型公共空间设计研究: 以深圳北中轴广场为例[J]. 中国园林, 2015, 31(7): 108-112.
- CHEN Y Y, LIU W B. Research on Large-scale Urban Public Space Design: A Perspective from User Behavior and the Case Study of North Central Axis Square, Shenzhen[J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(7): 108-112.
- [38] HAN K T. A reliable and valid self-rating measure of the restorative quality of natural environments[J]. Landscape and Urban Planning, 2003, 64(4): 209-232.
- [39] 武钰林, 董卫华, 张文佳. 街区建成环境感知影响因素研究: 基于行为实验的证据[J]. 城市规划, 2022, 46(12): 99-109.
- WU Y L, DONG W H, ZHANG W J. Research on Influencing Factors of Built Environment Perception in Neighborhoods: Evidence from Behavioral Experiment[J]. City Planning Review, 2022, 46(12): 99-109.

(编辑/马琳)

作者简介:

徐丹宁

1997年生/女/河南济源人/武汉大学城市设计学院在读博士研究生/研究方向为环境行为与城市更新设计(武汉 430072)

张霞

1975年生/女/山东聊城人/博士/武汉大学城市设计学院教授, 博士生导师/研究方向为环境心理学、城市设计与更新、时空行为分析(武汉 430072)

冯恒健

1998年生/男/河北邯郸人/山东科技大学测绘与空间信息学院硕士/研究方向为行人检测与视频处理(青岛 266590)

韩李涛

1978年生/男/山东菏泽人/博士/山东科技大学测绘与空间信息学院副教授, 硕士生导师/研究方向为三维GIS、室内定位与导航、室内应急疏散(青岛 266590)

唐炉亮

1973年生/男/湖南湘潭人/博士/武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室二级教授, 博士生导师/研究方向为测绘遥感与大数据分析(武汉 430072)

Research on the Mechanism of Pedestrian Healing Effects on Streets Based on Video Deep Learning

XU Danning, ZHANG Xia*, FENG Hengjian, HAN Litao, TANG Luliang

Abstract: In the context of modern high-density urban spaces, healing environments have garnered widespread attention due to their positive effects on the mental and physical well-being of urban dwellers. During the era of existing building stock renovation, urban streets, characterized by high openness, strong accessibility, and dense distribution, serve as efficient resources and practical carriers for promoting public health at the micro level within a healthy city. These spaces possess considerable potential to meet the public's restorative needs in daily life. Although previous qualitative studies have already identified pedestrians as elements contributing to the healing quality of streets, they often lack a quantitative representation, and the mechanisms through which the environment and pedestrians collectively interact to influence the healing effects of streets remain unclear. Hence, the main objective of this study is to explore the factors influencing street healing effects from both human and environmental perspectives. It seeks to improve and refine pedestrian measurement indicators, incorporating video deep learning technology to quantify pedestrian elements and analyze the correlation between pedestrian flow, activities, and healing effects. The study aims to clarify the joint influence mechanism of street pedestrians and the environment on healing experiences. Building upon the theory of healing environments, this study introduces pedestrian factors as core variables, alongside environmental factors of the street. Using real-life walking videos for experimentation, combined with semantic segmentation and pedestrian detection technologies, this study identifies and analyzes both environmental and pedestrian factors in experimental images. The research provides technological support for investigating the impact of pedestrian quantity and activity on healing effects. The results show that: 1) Pedestrian elements are significantly correlated with street healing effects. Pedestrian flow on streets has a nonlinear impact on healing perception, with an observable threshold effect. As pedestrian flow increases,

healing effects show a curve pattern of initially increasing, then decreasing, and later increasing again. In particular, scenarios with moderate pedestrian flow exhibit the highest healing effects, followed by those with low pedestrian flow, while scenarios with high pedestrian flow show the lowest healing effects. Both the degree of activity clustering and the type of activity can influence healing perception. Small group behaviors and spontaneous activities show a significant positive correlation with healing effects, while activities such as parent-child interactions, resting, photography, and dog walking demonstrate notable healing properties. When pedestrian elements are coordinated with street environmental elements, individuals are more likely to experience a positive healing sensation due to the perceived density being appropriate. 2) on top of the foundational influence of the street environment, pedestrian elements contribute an incremental 21.1% to the healing effect, which should not be overlooked. 3) Factors related to natural and social characteristics, as well as street pedestrian variables, are the primary contributors to enhancing street healing effects, while street traffic characteristics have a significant negative impact. This research expands the theoretical understanding of the healing potential of built environments, demonstrating that healing effects are not solely derived from the street environment, but are also influenced by dynamic pedestrians. This recognition of healing effects arising from the interaction between people and the environment breaks away from previous assumptions that only considered a single street environment, providing a more accurate reflection of real-world conditions. These findings may serve as a valuable reference for decision-making in the design and renewal of health-oriented healing streets, offer new directions for designing street facilities, improving residents' health levels, and promoting the development of healthy cities.

Keywords: landscape architecture; street healing effects; video deep learning; pedestrian detection; perceived density; healing environment

Biography

XU Danning, female, born in 1997 in Jiyuan, Henan Province, Doctoral student of School of Urban Design, Wuhan University, research area: environmental behavior and urban renewal design (Wuhan 430072)

ZHANG Xia, female, born in 1975 in Liaocheng, Shandong Province, Ph.D., Professor, and Doctoral supervisor at School of Urban Design in Wuhan University, research area: environmental psychology, urban design and renewal, and spatiotemporal behavior analysis (Wuhan 430072)

FENG Hengjian, male, born in 1998 in Handan, Hebei Province, Master student at College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, research area: pedestrian detection and video processing (Qingdao 266590)

HAN Litao, male, born in 1978 in Heze, Shandong Province, Ph.D., Associate Professor and Master student supervisor at College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, research area: 3D GIS, indoor positioning and navigation, and indoor emergency evacuation (Qingdao 266590)

TANG Luliang, male, born in 1973 in Xiangtan, Hunan Province, Ph.D., Second-level Professor and Doctoral supervisor at the State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, research area: surveying and mapping remote sensing, big data analysis (Wuhan 430072)