

街道空间对轮椅群体的包容性能与设计支持——基于通行障碍实验

Inclusive Street Space for Wheelchair Users: Design Strategies Informed by Mobility Barrier Experiments

董贺轩¹ 朱怡梦¹ 逯 婷¹ 严汝林^{2*}
DONG Hexuan¹ ZHU Yimeng¹ LU Ting¹ YAN Rulin^{2*}

(1.华中科技大学建筑与城市规划学院, 武汉 430074; 2.比亚迪汽车工业有限公司, 深圳 518118)
(1. School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, China, 430074;
2. BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen, Guangdong, China, 518118)

文章编号: 1000-0283(2025)12-0056-10
DOI: 10.12193/j.laing.2025.12.0056.007
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-07-26
修回日期: 2025-10-09

摘 要

城市街道空间是居民出行、休闲与社会交往的重要载体,其包容性能直接关系到城市公共健康水平和社会公平性。轮椅使用群体作为全民健康体系的重要组成部分,对街道的安全、舒适和便捷性有更高需求。以武汉市典型交通型、生活型及商业型街道为样本,采用模拟实验法,分析街道空间特征与轮椅群体通行障碍之间的关联机制,探讨街道环境对其身心健康及出行体验的影响。结果表明,三维界面密度、缘石坡道密度和通行路径转折度是影响轮椅使用者通行健康性和心理安全感的核心因素,高密度的街道界面与复杂路径设计不仅增加身体负担,还显著削弱出行舒适性,阻碍其社会参与与健康水平提升。为此,提出街道健康包容性设计策略,改善空间连续性与安全性,提升全民友好水平。研究成果为中国“健康城市”中全民健康导向的街道环境优化提供了理论支持和实践参考,助力实现城市空间公平、健康与社会可持续发展。

关键词

街道空间; 包容性能; 通行障碍; 轮椅使用群体; 健康城市; 优化设计

Abstract

Urban street spaces serve as important carriers for residents' travel, leisure, and social interaction, and their inclusiveness directly relates to public health levels and social equity in cities. As a key group within the public health system, wheelchair users have higher demands for street safety, comfort, and accessibility. This study selects typical traffic, residential, and commercial streets in Wuhan. It uses simulation experiments to analyze the relationship between street spatial characteristics and mobility barriers for wheelchair users, exploring how street environments affect their physical and mental health and travel experience. The results show that three-dimensional interface density, curb ramp density, and path turning degree are core factors that affect the health and psychological safety of wheelchair users during travel. High interface density and complex path design not only increase the physical burden but also significantly reduce travel comfort, hinder social participation, and lower overall health. Accordingly, this study proposes health-oriented, inclusive street design strategies to improve spatial continuity and safety and enhance universal accessibility. The findings provide theoretical support and practical guidance for optimizing health-oriented street environments in China's "Healthy Cities", helping achieve spatial equity, promote public health, and support sustainable urban development.

Keywords

street space; inclusiveness; mobility barrier; wheelchair user; Healthy City; design optimization

董贺轩

1972年生/男/河南濮阳人/博士/教授、博士生导师/研究方向为城市设计

朱怡梦

2001年生/女/湖北荆州人/在读硕士研究生/研究方向为城市设计

严汝林

2000年生/男/江西上饶人/工程师/研究方向为城市设计

健康城市理念自1986年提出并在全球推广以来,已成为应对城市化带来的环境污染、空间拥挤与健康不平等挑战的重要路径^[1-2]。然而在中国,健康城市建设仍处于探索阶段,街道空间环境作为其中最直接、最日常的公共场所,却长期受“车本位”导向

基金项目:

国家自然科学基金面上项目“地铁站域空间系统的包容性能与优化体系——基于接驳通行链”(编号:52478055);华中科技大学文科重大及交叉项目“社区公共空间对退休群体社会健康调适的作用机制研究”(编号:2024WKZDJC008)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 1227191249@qq.com

影响, 行人尤其是轮椅群体的通行与交往需求未得到有效保障。截至 2024 年底, 全国轮椅使用者已超过 500 万人, 且随着人口老龄化趋势持续上升, 这一群体的出行困境将进一步加剧。尽管已有无障碍建设规范出台, 但街道空间环境与实际需求之间的差距依然明显, 不仅削弱了全民健康城市的建设目标, 也直接制约了轮椅群体的公平出行与社会参与。因此, 如何优化街道空间环境以回应健康城市理念并满足轮椅群体的迫切需求, 已成为当前研究的关键问题。

国内外已有与城市街道包容性设计相关的研究成果, 集中于无障碍规划设计研究、包容性视角研究以及适老性研究等方面。国外相关研究多从残疾人使用者的角度出发, 偏重于借用新兴技术及设备改进残疾人出行问题^[3-6]。中国自 2000 年颁布《城市道路和建筑物无障碍设计规范》以来, 对街道的无障碍设计研究逐渐兴起。起初多聚焦于设施层面, 朱海鹏^[7]对城市道路中的坡道和盲道两类设施以图示语言的方式表达了设计要求; 李真和谢宏宽^[8]从人行道、公交站和地铁站等方面介绍了城市道路环境中无障碍设计的主要内容和技术指标。随着城市发展, 不同城市环境的无障碍设施建设方式也有所区别, 由此衍生出针对山地、寒地、立体城市等不同背景街道无障碍规划设计^[9-11]。近年来, 中国街道无障碍建设逐渐演化为以包容性理念为核心, 打造适宜所有人出行的街道环境, 其中韩菁菁和王艳婷^[12]以包容性视角为观点, 探讨了街道从单一导向往包容性城市街道空间转换的具体策略和设计方法; 胡嫒木子^[13]以老年人为视角, 运用空间句法分析街道物理环境要素, 从社会政策、文化包容性等方面提出相应策略。

现有国内外研究虽从不同视角提升了出行安全性, 但缺乏针对街道整体空间形态、界面密度及连续性的系统性研究, 未能全面揭示街道环境对轮椅群体身心健康的影响机制。基于此, 本研究以武汉市典型街道为空间载体, 采用模拟实验方法, 系统分析轮椅使用者在不同街道类型中的通行障碍, 揭示街道空间对其健康、舒适与心理感知的影响, 并提出基于健康导向的包容性设计策略, 为“健康城市”建设中实现全民友好与空间公平提供科学依据与设计参考。

1 研究对象与方法

中国的街道在等级上依据规模大小和承载的交通类别分为主干路、次干路、快速路和支路; 而在类型上则在不同城市呈现了一定

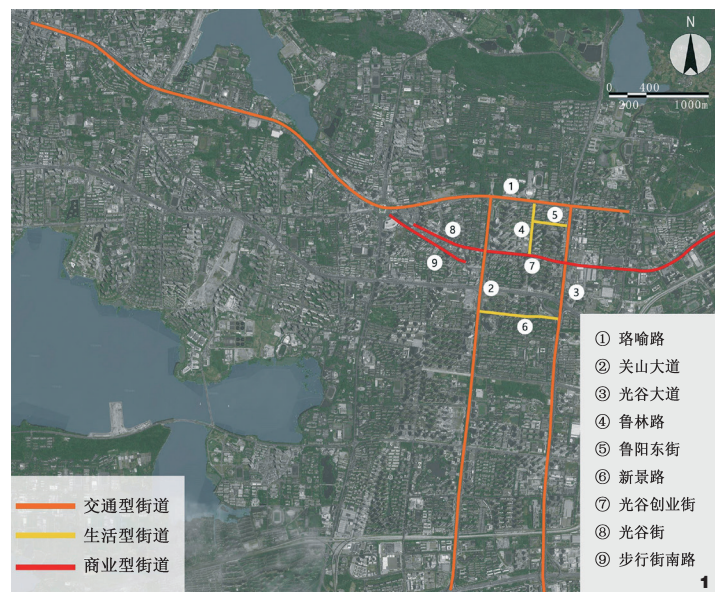


图1 样本街道总体区位图

Fig. 1 Overall location map of sample streets

的差异性, 但基本上都是按照街道的属性、功能和特色等性质分类, 本研究参考《武汉市街道全要素规划设计导则》, 根据街道功能的差异进行下列分类: 交通型街道、生活型街道、商业型街道、景观型街道和历史风貌型街道。其中, 交通型、生活型和商业型街道是最常见和通用的分类方式, 几乎在每个城市都有所体现。

研究地点选择在湖北省武汉市, 选取交通型、生活型和商业型 3 种类型的 9 条典型街道作为研究样本, 包括交通型街道的珞喻路、关山大道和光谷大道; 生活型街道的鲁林路、鲁阳东街和新景路; 商业型街道的光谷创业街、光谷街和步行街南路 (图 1)。既有研究表明, 轮椅使用者在日常休闲活动时, 500 m 左右的范围是其出行最适宜的距离^[14], 最终对街道路段筛选后的样本概况如表 1 所示。

城市街道空间兼具人文、景观、功能等多重要素。本研究对街道空间的分析从城市形态学视角出发, 并引入人因工程学概念, 将人的生理、心理需求与工程设计相融合分析^[15]。通过人的主观定性确定影响街道障碍的因子, 建立街道空间无障碍环境品质评价体系, 确保了评价体系的科学性及合理性。研究方法如下, 首先基于已有成果和前期研究, 构建街道空间环境特征^①及其无障碍品质^②评价指标体系

① 根据城市形态学, 街道空间可解构为由底界面、侧界面、顶界面围合并布设设施的立体空间。底界面体现街道基本属性; 侧界面分为建筑与环境界面, 影响空间品质; 顶界面反映天空视野与通透性。设施是服务行人活动的直接媒介, 影响通行品质。以此构建街道空间环境评价体系。

② 针对轮椅使用群体, 其需求可分为生理、心理与行为三个层面, 并据此构建无障碍环境品质评价体系。评价以使用者主观感受为准则, 涵盖安全性、便捷性、通畅性、舒适性与识别性 5 个方面, 采用 7 分制 (-3~3)。采用德尔菲法确定指标权重依次为: 安全性 > 便捷性 > 通畅性 > 舒适性 > 识别性, 加权得出最终无障碍环境品质评分。

表1 样本街道概况
Tab. 1 Profiles of sample streets

类型 Type	序号 No.	样本名称 Sample name	样本概况 Sample overview
交通型 街道	1	珞喻路	主干路, 长约 550 m, 东西走向; 北侧为教育科研用地和体育用地, 南侧主要为居住用地、商业服务业设施用地和行政办公用地; 交通类型丰富, 为双向六车道
	2	关山大道	主干路, 长约 440 m, 南北走向; 西侧主要为商业服务业设施用地、居住用地和医疗卫生用地, 东侧主要为居住用地; 交通类型丰富, 为双向八车道
	3	光谷大道	快速路, 长约 390 m, 南北走向; 西侧主要为居住用地和商业服务业设施用地, 东侧主要为文化设施用地; 车行道设置有高架桥, 为双向六车道
生活型 街道	4	鲁林路	支路, 长约 350 m, 南北走向; 西侧主要为居住用地、教育科研用地, 东侧主要为居住用地; 车行道为双向两车道
	5	鲁阳东街	支路, 长约 420 m, 东西走向; 街道两侧用地以居住用地为主; 车行道为双向两车道
	6	新景路	支路, 长约 550 m, 东西走向; 街道两侧用地以商业服务业设施用地和居住用地为主; 车行道为双向两车道
商业型 街道	7	光谷创业街	次干路, 长约 520 m, 东西走向; 街道北侧功能类型较丰富, 有居住用地、商业服务业设施用地和教育科研用地, 南侧主要为商业服务业设施用地; 车行道为双向四车道
	8	光谷街	支路, 长约 340 m, 呈西北、东南走向; 街道两侧用地以商业服务业设施用地和居住用地为主; 车行道为双向两车道
	9	步行街南路	支路, 长约 440 m, 呈西北、东南走向; 街道两侧用地以商业服务业设施用地和居住用地为主; 车行道为双向两车道

(表2、表3), 然后通过实地调查法与实验法等对街道空间环境品质及其障碍性进行研究, 进而运用定量与定性分析, 探索街道空间环境与出行空间使用及障碍之间的关联性, 最后根据影响街道无障碍品质的因素, 归纳推理并构建城市街道空间包容性设计策略。

2 城市街道空间包容性能相关环境特征

2.1 形态环境特征

空间界面是场所品质的关键因素, 特别是对于轮椅群体来讲, 经过视觉、动觉及听觉的协同作用, 街道空间的底界面、侧界面以及顶

部的环境界面, 直接影响了通行过程中对街道场所舒适度、便捷度及安全度的动态感知与综合评价。

(1) 街道底界面, 研究主要从长度、平均宽度、平均坡度等方面进行数据测量及特征分析(图2)。在所选样本中, 街道长度范围在340 ~ 550 m, 平均长度为450 m。其中, 样本8光谷街是样本中最短的街道; 而样本1珞喻路与样本6新景路均是样本中最长的街道; 街道宽度在20 ~ 110 m, 平均宽度为49 m, 其中样本2的宽度最大(108 m); 通过谷歌影像的高程点剖面分析后, 得出样本街道的整体坡度在1.60% ~ 4.60%, 其中样本1和样本7的部分路段坡度变化较大。

(2) 街道侧界面, 主要由以建筑为主体要素构成, 研究用三维界面及其密度^①来表征(图3)。经计算后得到各样本街道的三维界面密度: 交通型街道中样本2的三维界面平均密度最高, 生活型街道中样

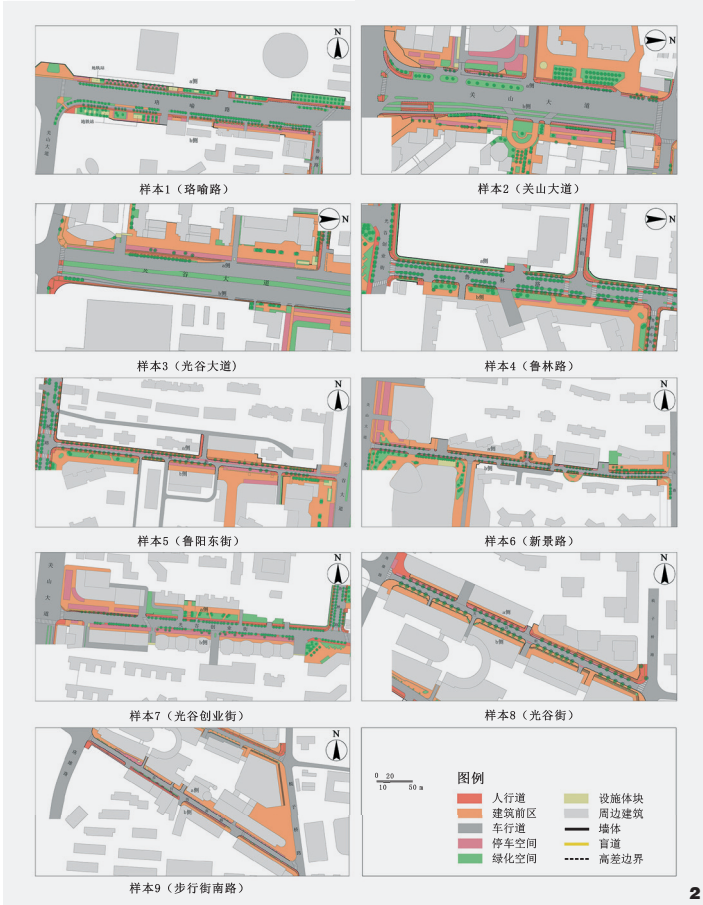


图2 样本街道底界面形态图
Fig. 2 Sample street spatial layout plan

① 三维界面密度的计算方式为轮椅使用者面向街道界面时视野范围内建筑投影面积与视野总面积之比。

表2 街道空间环境特征评价指标体系
Tab. 2 Evaluation indicator system for street spatial environment characteristics

指标类型 Indicator type	一级指标 Tier-1 indicator	二级指标 Tier-2 indicator
底界面 形态特征	街道尺度	街道宽度
		街道坡度
	街道肌理	平整度
		铺装材质
侧(顶)界面 形态特征	建筑界面	宽高比
		三维界面密度
	环境界面	绿视率
		天空开敞度
设施环境特征	无障碍设施	盲道密度
		缘石坡道密度
		隔离设施类型数量
		隔离设施密度
		标识设施类型数量
		标识设施密度
	绿化设施	市政设施类型数量
		市政设施密度
		绿化设施类型
		绿化覆盖率

表3 轮椅使用者视角下的街道无障碍环境品质的指标体系
Tab. 3 Evaluation index system for street accessibility quality from wheelchair users' perspective

评价指标 Evaluation indicator	权重 Weight
安全性	0.280
舒适性	0.169
便捷性	0.228
通畅性	0.209
识别性	0.114

本6的三维界面平均密度最高，商业型街道中样本8的三维界面平均密度最高。

(3) 街道顶界面，包括绿视率和天空开敞度两个方面(图4)，本研究采用图像语义分割，采用基于PyTorch框架构建的SegNet网络

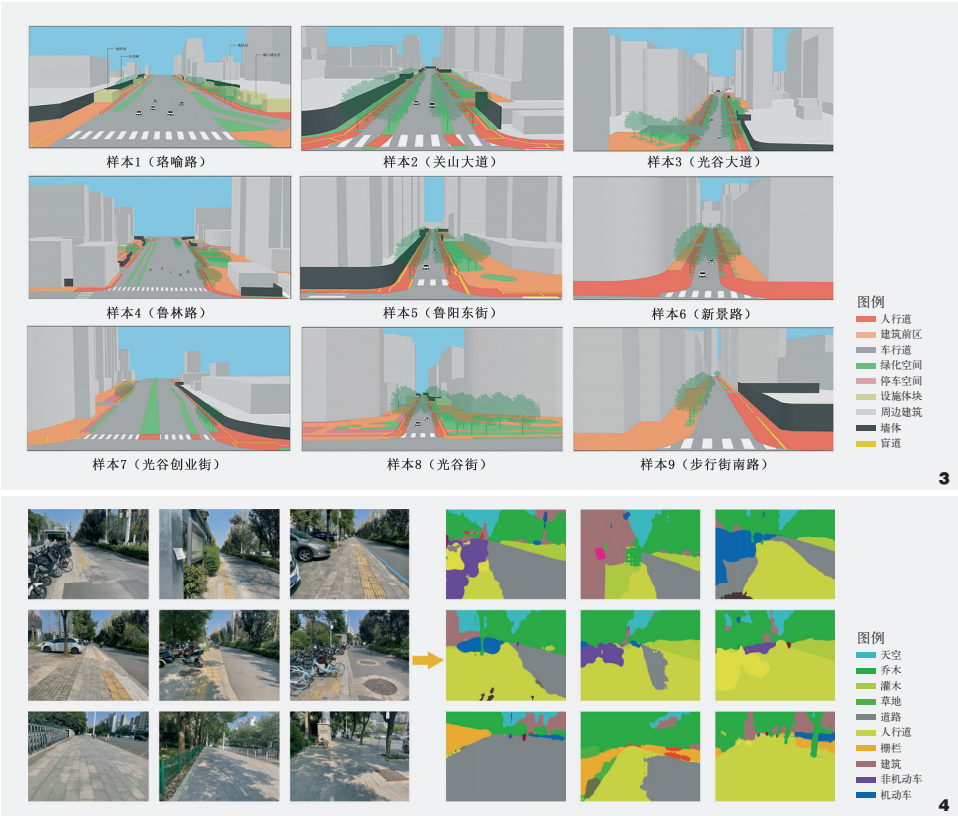


图3 样本街道侧界面空间形态图
Fig. 3 Spatial morphology of street side interfaces

图4 样本街道顶界面形态图
Fig. 4 Example of street view image after semantic segmentation

(版本1.0)，运行环境为Python 3.8，图像输入前使用OpenCV进行裁剪与光照归一化处理。模型训练结合自建街景样本与Cityscapes数据集，最终用于街道绿视率与天空开敞度的自动提取。根据指标发现，样本街道的绿视率的值在2% ~ 35%，天空开敞度在10%之内。

2.2 设施环境特征

街道设施是街道空间环境及功能的重要载体，与街道空间底界面、侧界面和顶界面的形态共同影响着轮行者的场所品质感知，其配置与布设特征直接影响街道包容性品质。经过前期调查，研究将对轮行者具有潜在影响的主要街道设施，分为无障碍设施、

隔离设施、标识设施、市政设施、绿化设施与商业设施。各类样本街道的设施分布特征如下图所示(图5)。

(1) 无障碍设施分为盲道和缘石坡道，在所有样本街道中，人行道基本上都设置有盲道，并且盲道的密度较大，缘石坡道则分布在人行道两端或道路中部，在样本2、8、9中，缘石坡道的覆盖率不足，部分设置也较为不规范，对轮椅甚至非机动车的通行造成较大的阻碍。

(2) 隔离设施包括点状隔离设施和线状隔离设施，点状隔离设施为石柱车挡、石球车挡、半圆形车挡和不锈钢车挡，线状隔离设施为护栏和施工用的临时围挡，样本2、3、



图5 样本街道设施分布图
Fig. 5 Distribution of street facilities

5、8、9的隔离设施覆盖率都超过了一半以上，虽然有效地隔绝了车辆与行人，但也在一定程度上阻碍了行人在空间转换时的便利程度。

(3) 标识设施分为指示类标识和警示类标识，在所有样本中，标识设施主要服务于机动车，面向残疾人的标识牌基本上没有设置。

(4) 市政设施主要为井盖和变机箱等，

井盖的存在极大地影响了路面的平整度。

(5) 绿化设施包括行道树、隔离人行空间与车行空间的灌木绿化带，以及位于建筑前区的花坛等点缀的设施，在样本8与样本9中，绿化设施覆盖率较低，基本在5%以内，样本4的绿化覆盖率达到40%，绿化设施种类较为丰富，其他样本则在10% ~ 30%。

(6) 商业设施主要指在街道人行空间的商贩等，尤其是客流量较大时，对行人的通行造成了一定的阻碍。

3 轮椅使用者的行为活动及其障碍特征

3.1 行为活动特征

根据已有研究与实地调研，轮椅使用者在街道空间中的典型行为主要包括推行、停留休憩及社交交流。然而，其活动范围和自由度普遍受限，通行条件、视野范围、行动速度及设施适应性均显著不同于一般人群。特别是在自主推行条件下，速度受体力限制，难以独立使用常规设施，并易产生自卑感、挫败感与孤独感，表现出较强的社会支持需求和心理脆弱性。

本研究采用模拟实验法，对轮椅使用者的路径形态与通行体验进行分析。实验招募30名具备风景园林相关及无相关专业背景的在校大学生，所有参与者具备良好的沟通与认知能力，能够准确反馈空间体验。要求实验者对9条样本街道的a、b两侧空间分别进行评价，共收集有效问卷540份。

虽然实验对象为健全人群，但在实验过程中统一使用手动轮椅，并经过基本操作培训与预实验，以确保具备基本操控能力。同时，为降低环境变量干扰，实验安排在天气良好(20 ~ 28℃)的工作日13:00-16:00进行，避开通勤高峰期，以保持人流与车流的相对稳定。街道样本则依据“尺度相似、功能典型、可达性高”原则选取，并排除施工等临时干扰因素。

需要指出的是，健全人群模拟虽能在物理层面还原轮椅使用的部分体验，但其长期使用的适应性、心理负担与社会感受仍难以完全反映真实情况。为此，本研究在前期已通过文献归纳与武汉市残疾人联合会的访

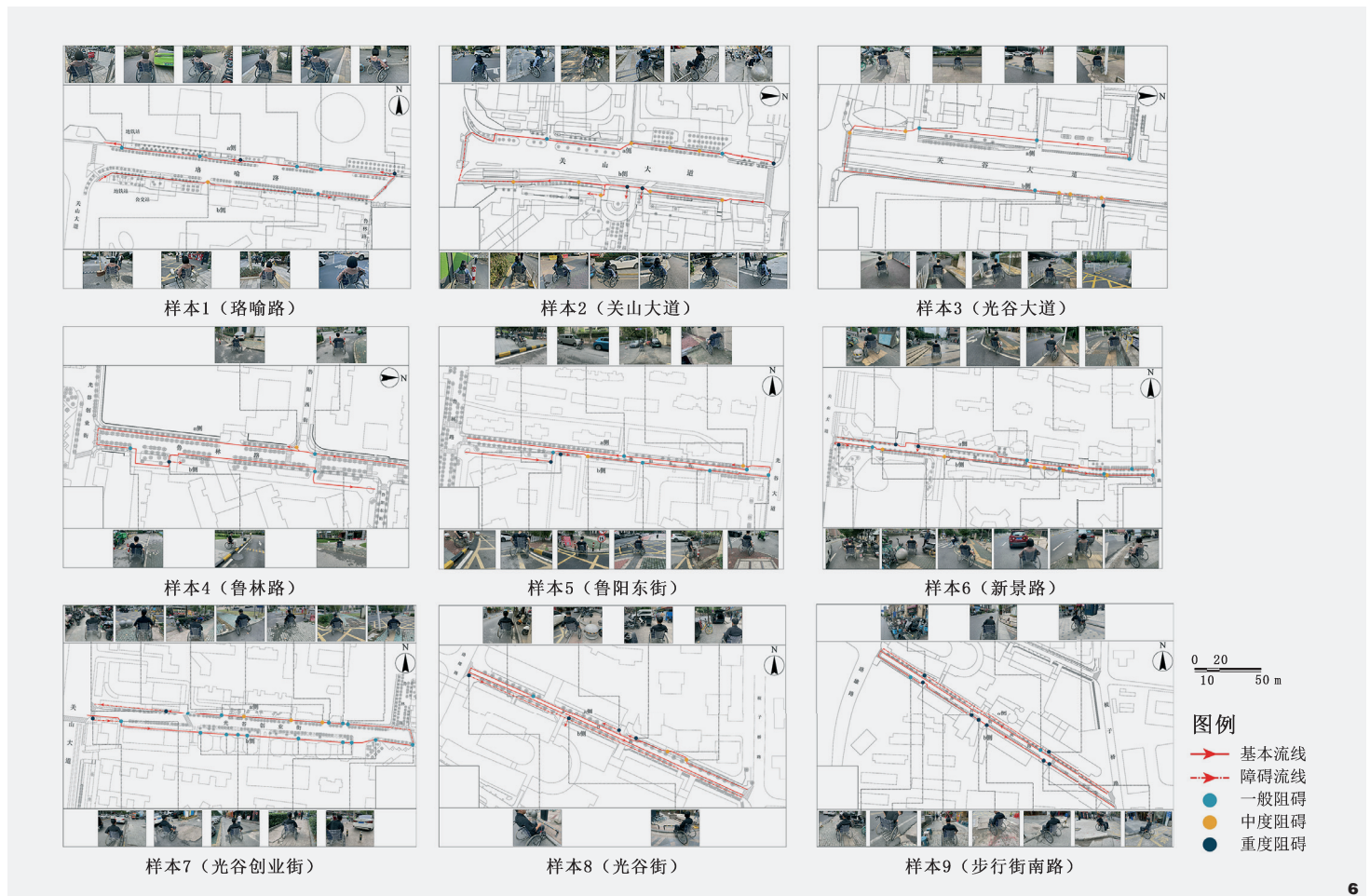


图6 实验者在样本街道的活动障碍
Fig. 6 Activity patterns of wheelchair users in sample streets

谈，补充获取轮椅使用者的实际障碍与通行策略，并以此优化实验流程，从而提高结果的针对性与解释力。未来研究将引入真实轮椅使用者参与实验，以进一步提升样本的代表性和结论的可靠性。

实验结果显示，实验者通行时间为13~29 min，平均约20 min；通行速度为0.30~0.45 m/s，平均0.37 m/s。关山大道b侧和光谷创业街a侧的最低速度为0.30 m/s，鲁林路b侧最高达0.42 m/s，表明后者通行更为顺畅。随着距离增加，实验者疲劳感增强，约每100 m需休憩一次，平均休憩时间约2 min；

当距离进一步延长，休憩频次和持续时间相应增加。部分街道由于依靠他人推行，休憩次数和时长存在差异。

3.2 活动障碍特征

实验者在街道通行的过程中遇到了三种程度的阻碍：(1) 轻度阻碍指轮椅使用者在自主推行时不需要借助外力就能够勉强通行的阻碍，例如在通行时遇到的小坎坷、不平整的路面和小坡度的上坡路与下坡路等。(2) 中度阻碍指轮椅使用者需要借助外力推行的情况下才能解决的阻碍，无法依靠自身

的力量完成推行，例如较陡的坎、极不平整的道路等，这种情况往往会导致轮椅的轮子卡在路面因而无法顺利推行。(3) 重度阻碍指轮椅使用者在行进过程中借助外力也无法顺利通行的阻碍，例如多级台阶、高差较大的人行道等。

实验结果表明，街道阻碍个数严重影响了轮椅使用者的通行体验（图6）。除样本1与样本4外，其余样本街道都需要依靠外力才能顺利完成推行，说明目前街道的无障碍环境品质普遍不理想，无法有效满足轮椅使用者独立出行的需求。而在上述样本中，样

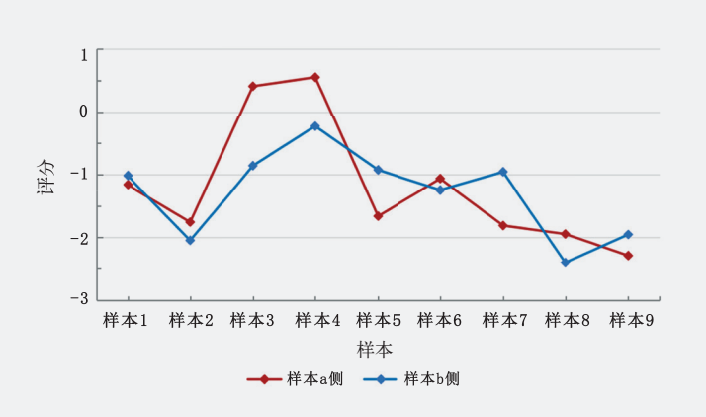


图7 街道空间的无障碍品质综合评价图
Fig. 7 Comprehensive evaluation map of barrier-free quality of street spaces

本5的a侧、样本8的b侧以及样本9的a侧的情况较为特殊，其人行空间基本无法通行，故街道的阻碍数量偏少；样本3的a侧以及样本4两侧的阻碍个数较少，实验者在该街道中通行有较好的体验。

4 城市街道空间环境品质评价及其影响因素

4.1 品质评价

对问卷调查数据进行统计，得到最终的SD测度表（表4）。根据评分表可知，样本街道的各个评价指标的平均分都在0分以下，整体评价的水平较低，直接反映出街道的整体环境不利于轮椅使用者。并且在5组评价因子当中，舒适性<便捷性<安全性<通畅性<识别性，说明整体而言，轮椅使用者的舒适性最差，而街道识别性的平均值为-0.28，相对于其他指标而言，这一方面没有造成主要的障碍。根据问卷的指标数据以及专家打分后的权重计算得到样本街道的无障碍环境品质综合评价折线图（图7）。分析可知，街道空间的无障碍环境品质评价基本都<0，表明轮椅使用者的通行活动受到较大的限制，最基本的出行环境难以得到保障。

4.2 影响因素

一方面，空间环境影响因素。以街道品质的综合评价为因变量，分析街道空间环境特征与品质之间的关联性，将数据导入SPSS作相关性分析，初步确定影响街道环境品质的指标（表5）。将相关性检验筛选的两个因素分别与街道无障碍环境品质进行回归分析，得到模型摘

表4 各样本实验者心理活动感知评价表
Tab. 4 Psychological perception evaluation

序号 No.	样本名称 Sample name	位置 Location	安全性 Security	舒适性 Comfort	便捷性 Convenience	通畅性 Patency	识别性 Identification
1	珞喻路	a 侧	-1.27	-1.47	-1.40	-1.13	0.00
		b 侧	-1.07	-1.27	-1.27	-0.87	-0.27
2	关山大道	a 侧	-2.00	-2.07	-1.73	-1.47	-1.27
		b 侧	-2.20	-2.40	-2.13	-1.87	-1.33
3	光谷大道	a 侧	0.53	-0.13	0.33	1.00	0.00
		b 侧	-0.73	-1.47	-1.20	-0.53	-0.20
4	鲁林路	a 侧	0.80	0.27	0.07	0.73	1.00
		b 侧	0.07	-0.47	-0.53	-0.47	0.40
5	鲁阳东街	a 侧	-1.60	-1.55	-2.20	-2.00	-0.27
		b 侧	-0.47	-1.40	-1.60	-0.67	-0.47
6	新景路	a 侧	-1.13	-1.53	-1.33	-0.67	-0.40
		b 侧	-1.27	-1.40	-1.53	-1.20	-0.47
7	光谷创业街	a 侧	-1.67	-2.53	-2.07	-1.80	-0.60
		b 侧	-1.13	-1.27	-1.00	-0.80	-0.27
8	光谷街	a 侧	-2.07	-2.27	-2.20	-2.27	-0.07
		b 侧	-2.87	-2.60	-2.67	-2.47	-0.33
9	步行街南路	a 侧	-2.93	-2.33	-2.40	-2.40	-0.27
		b 侧	-2.00	-2.20	-2.40	-2.13	-0.27
平均值			-1.28	-1.56	-1.51	-1.17	-0.28

要表（表6）^①。根据表7可知，街道的三维界面密度的显著性为0.022，并与街道的环境品质表现出一定负相关，说明三维界面密度越高，对于轮椅使用者来说，街道舒适度感知则越差。缘石坡道密度的显著性为0.005，表明缘石坡道的密度越高，街道的环境品质越好，有较强的正向关联。其余指标则显著性数值较高，与街道的环境品质关联度偏弱。由表7可知，模型3的显著性均<0.1，说明街道的无障碍环境受到三维界面密度和缘石坡道密度的共同影响。交通型街道、生活型街道及商业型街道无障碍环境品质的综合评价关系与散点图如图8所示，数据分析显示，三类街道的无障碍环境品质评价呈现不同特征：交通型街道的评价得分分布最为离散且均匀；生活型街道的评价结果存在显著差异，其中样本4的评分明显高于样本5和样本6；商业型街道各样本间的评价差异较小，但整体评分维持在较低水平。

另一方面，空间使用特征影响因素。将空间使用特征的路径长度、变化次数、主要转折次数、阻碍个数、通行速度和平均休憩时间等与街道无障碍环境品质进行相关性分析（表8），转折次数、阻碍个数、通行速度、平均休憩时间与街道的无障碍环境品质的关联

① 其中，模型3引入三维界面密度与缘石坡道密度构建最优回归模型，调整后 R^2 为0.472，模型解释能力为47.2%，拟合程度达到最优。所有变量相关性分析与回归分析均在SPSS 26.0环境下完成，显著性水平设定为 $p<0.05$ 。变量筛选方法包括前期Pearson相关性分析及显著性热图辅助判断，再进入逐步回归模型构建，确保模型的科学性与稳定性。

表5 街道空间环境特征及街道无障碍环境品质的相关性
Tab. 5 The correlation between the characteristics of the street space environment and the quality of the street barrier-free environment

指标类型 Indicator type	相关系数 Correlation coefficient	安全性 Security	便捷性 Convenience	通畅性 Patency	舒适性 Comfort	识别性 Identification
街道长度	皮尔逊相关系数	-0.128	-0.077	-0.045	-0.147	-0.34
	显著性	0.614	0.763	0.858	0.560	0.167
街道宽度	皮尔逊相关系数	0.087	0.227	0.226	0.040	-0.445*
	显著性	0.731	0.364	0.368	0.874	0.064
平均坡度	皮尔逊相关系数	0.081	0.037	0.059	0.067	0.074
	显著性	0.750	0.885	0.815	0.792	0.772
人行道平均宽度	皮尔逊相关系数	0.257	0.119	0.141	0.064	-0.210
	显著性	0.302	0.637	0.576	0.801	0.402
人行道平整度	皮尔逊相关系数	0.313	0.187	0.193	0.097	-0.121
	显著性	0.207	0.458	0.442	0.702	0.633
建筑前区平均宽度	皮尔逊相关系数	-0.049	0.026	0.08	-0.144	-0.630***
	显著性	0.846	0.918	0.754	0.568	0.005
建筑前区平整度	皮尔逊相关系数	-0.264	-0.344	-0.293	-0.426	-0.303
	显著性	0.290	0.162	0.239	0.078	0.222
交叉口数量	皮尔逊相关系数	-0.324	-0.310	-0.255	-0.397	-0.574**
	显著性	0.190	0.211	0.306	0.102	0.013
高差路段比例	皮尔逊相关系数	-0.357	-0.487**	-0.459*	-0.29	-0.087
	显著性	0.146	0.04	0.055	0.243	0.732
非机动车道平均宽度	皮尔逊相关系数	0.161	0.232	0.218	0.148	-0.145
	显著性	0.524	0.354	0.385	0.559	0.565
车行道宽度	皮尔逊相关系数	0.033	0.183	0.165	0.023	-0.332
	显著性	0.897	0.467	0.513	0.928	0.178
车行道平整度	皮尔逊相关系数	0.108	0.244	0.260	0.082	-0.321
	显著性	0.669	0.329	0.298	0.746	0.194
宽高比	皮尔逊相关系数	0.272	0.399	0.379	0.265	-0.136
	显著性	0.274	0.101	0.121	0.287	0.592
三维界面密度	皮尔逊相关系数	-0.572**	-0.485**	-0.524**	-0.480**	-0.342
	显著性	0.013	0.041	0.026	0.044	0.165
绿视率	皮尔逊相关系数	0.356	0.318	0.305	0.310	0.107
	显著性	0.147	0.198	0.219	0.210	0.672
天空开敞度	皮尔逊相关系数	0.056	0.189	0.208	0.009	-0.400
	显著性	0.825	0.452	0.407	0.973	0.100
盲道密度	皮尔逊相关系数	0.490**	0.274	0.355	0.337	0.132
	显著性	0.039	0.272	0.149	0.171	0.603
缘石坡道密度	皮尔逊相关系数	0.657***	0.621***	0.605***	0.598***	0.265
	显著性	0.003	0.006	0.008	0.009	0.287
隔离设施密度	皮尔逊相关系数	-0.249	-0.283	-0.209	-0.202	-0.261
	显著性	0.32	0.256	0.405	0.423	0.296
标识设施密度	皮尔逊相关系数	-0.128	-0.138	-0.084	-0.073	-0.23
	显著性	0.613	0.584	0.741	0.774	0.359
市政设施密度	皮尔逊相关系数	-0.219	-0.145	-0.149	-0.176	0.092
	显著性	0.383	0.567	0.554	0.485	0.718
绿化覆盖率	皮尔逊相关系数	0.472**	0.469**	0.447*	0.419*	0.193
	显著性	0.048	0.049	0.063	0.084	0.444

注：*表示 $p < 0.1$ ，呈现一定的相关性；**表示 $p < 0.05$ ，呈现显著相关性；***表示 $p < 0.01$ ，呈现较显著相关性。

显著性都小于0.1，转折次数、平均休憩时间和阻碍个数与无障碍环境品质呈负相关，而通行速度与无障碍环境品质之间呈正向关联。将上述相关性分析筛选后的4个指标构建模型，进行回归分析，分别得到逐步回归模型摘要表以及回归系数表，模型引入4个变量达到最优解， R^2 为0.768，调整后 R^2 为0.676，模型解释能力达到67.6%，拟合程度达到最优解。这表明主要是转折次数、街道阻碍数量、通行速度和平均休憩时间影响了街道的无障碍环境品质。其中转折次数反映了街道路径的复杂程度，街道的阻碍数量直接代表了街道空间品质，通行速度直接显示了街道环境的包容程度，平均休憩时间则反映了轮椅使用者的身体活动状况。

由上述两方面结合分析，街道空间的侧面三维界面和缘石坡道显著影响了轮椅使用者的空间使用特征，二者及其密度特征是轮椅使用者视角下对街道空间包容性能评价要素与因子。其中，街道空间侧面三维界面的进深关系与封闭程度以及形态组织与设计模式，影响了低视点的轮椅使用者通行过程中对街道场所场景的视觉感知，从而影响了街道空间环境品质舒适度评价结果；缘石坡道的配置数量与质量状况以及空间布置与设计模式，影响了轮椅行进的路径长度、变化次数，主要转折次数、阻碍个数、通行速度和平均休憩时间，从而影响了街道空间环境品质便捷度评价结果。当然，街道空间底界面坡度和材质、顶界面绿视率和天空开敞度、隔离设施和绿化设施以及导向设施等，也是街道空间包容性能的影响因素，只不过样本街道在这些方面的建设条件良好，基本能够有效满足轮椅使用者的通行需求。总之，就城市建设现状来讲，街道空间的低密度侧面三维界面与高密度缘石坡道，是目前面向轮椅使用者

表6 逐步回归的模型摘要表
Tab. 6 Model summary table for stepwise regression

模型 Model	R	R^2	调整后 R^2 Adjusted R^2	标准估算的错误 Errors in standard estimates
1	0.536 ^a	0.287	0.243	0.73927
2	0.630 ^b	0.397	0.359	0.68004
3	0.731 ^c	0.535	0.472	0.61696

注：模型1预测变量为（常量）、三维界面密度；模型2预测变量为（常量）、缘石坡道密度；模型3预测变量为（常量）、三维界面密度、缘石坡道密度。

表7 逐步回归模型的回归系数表
Tab. 7 Regression coefficient table for stepwise regression models

模型 Model		未标准化系数 Coefficients not normalized		标准化系数 Beta	t	显著性 Significance
		B	标准错误			
1	（常量）	0.051	0.539	—	0.095	0.925
	三维界面密度	-0.023	0.009	-0.536	-2.538	0.022
2	（常量）	-2.270	0.355	—	-6.399	0.000
	缘石坡道密度	1.597	0.492	0.630	3.244	0.005
3	（常量）	-1.153	0.620	—	-1.861	0.083
	三维界面密度	1.316	0.466	0.519	2.824	0.013
	缘石坡道密度	-0.016	0.008	-0.387	-2.107	0.052

表8 街道空间的使用特征及街道无障碍环境品质的关联性
Tab. 8 The correlation between the use characteristics of street spaces and the quality of the barrier-free environment of the streets

中介变量 Mediating variables	因变量 Cause variable	系数分析 Coefficient analysis	
		皮尔逊相关系数	显著性
路径长度	街道无障碍环境品质的评价	-0.194	0.488
空间变化次数		-0.269	0.332
主要转折次数		-0.571**	0.026
阻碍个数（加权）		-0.636**	0.011
通行速度		0.723***	0.002
平均休憩时间		-0.723***	0.002

注：N=15；*表示 $p<0.1$ ，呈现一定的相关性；**表示 $p<0.05$ ，呈现较强的相关性；***表示 $p<0.01$ ，呈现很强的相关性。

街道空间包容性品质的两个重要保障，并分别对应“人”场所感知与“轮椅”路面行进。

5 城市街道空间的包容性优化设计与研究展望

5.1 优化设计

根据上述研究可知，轮椅使用者视角下街道包容性能提升，关键在于：如何通过减

少街道两侧三维界面密度，增加缘石坡道密度，有效改善轮椅使用者在街道中的舒适度感知；如何通过优化轮椅使用者的通行路径，有效降低轮椅通行的转折次数、平均休憩时间以及阻碍个数，最终提升整体的通行速度。这两个方面涉及到街道设施、侧界面以及底界面的综合设计与总体布设。

（1）街道设施布设优化。在控制盲道位

置前提之下，需要在街道两端及中间尽量增加缘石坡道的布设数量，并可根据实际情况选择全宽式缘石坡道或者三面缘石坡道。街道的隔离设施可以将部分线性隔离设施替换为点状隔离设施，既能起到隔离作用，也为轮椅通行提供空间，有效减少通行的转折次数。另外，增设适宜于轮椅使用者的街道导向标识，并将高度控制在1.15 m左右。再者，可以将街道的绿化设施替代部分隔离设施，在改善街道视觉舒适性的同时，也需要注意避免绿化设施对轮椅通行的阻碍。最后，需要有效管控街道商业设施以及机动车停车，以减少对轮椅通行的障碍。

（2）街道侧界面优化设计。除了常规的降低街道两侧建筑排布密度之外，街道两侧建筑进行一定程度退界，特别是可以采用建筑首层退界的方式，留出充裕的空间，以有效减少街道两侧界面的三维界面密度。与此同时，还需要注意预留的空间与人行道相互平齐，以形成供轮椅使用者通行的连续公共空间。并且，在用地建设容量允许条件下，可以适当降低街道两侧建筑的平均高度，使轮椅使用者的视野面更加宽广。

（3）街道底界面优化设计。一是结合缘石坡道及其他设施布设与机动车停车位管控，合理控制轮椅使用者通行路径的复杂性与长度，并尽量减少街道轮行空间地面整体坡度。二是通过道路空间权的分配调控，适度拓宽街道轮行空间宽度，给轮椅使用者预留充足的休憩空间。三是在保障地面材质防滑的基础上，确保底界面的平整铺装。

（4）三类街道类型在无障碍环境表现方面存在显著差异：交通型街道整体通行速度与坡道设置相对优越，但受限于高密度建筑，界面压迫感较强；生活型街道存在一定设施缺失，但路径结构相对简单、休憩点布

设合理；商业型街道障碍密度最高，设施占道问题严重，显著影响轮椅用户通行效率与心理体验。综合来看，商业型街道需重点提升设施布设规范性与标识引导系统，而交通型与生活型街道则需提升界面舒适度与引导连续性。

5.2 研究不足与展望

本研究以轮椅使用者为视角，结合实验模拟、路径行为记录与空间要素分析，揭示了街道空间环境对其通行行为及身心健康的综合影响机制。结果表明，三维界面密度、坡道密度和路径转折度等因素不仅影响通行负担与安全性，也显著关联疲劳感、心理压力及社交参与度，进而影响健康生活质量。研究成果为城市更新、慢行系统完善和适老化改造提供了科学参考，尤其适用于老城区街道、社区微更新及智慧无障碍导航系统优化。在智慧城市建设背景下，街道的包容性不仅关乎物理可达性，还应拓展至信息可达性与交互公平性。总体来看，本研究深化了对街道空间健康性与包容性的理解，突显了面向轮椅使用者的街道优化在促进公共健康与社会公平中的重要作用。

然而，本研究仍存在局限：首先，在实验方法上，虽通过健全人群模拟和残联访谈弥补真实样本不足，但难完全还原长期使用体验和心理负担，结果代表性有限；其次，在数据采集上，主要依赖行为记录与主观反馈，缺乏轨迹监测与智能感知数据，难以全面揭示环境要素与心理感知的互动；再次，在指标构建方面，虽提出三维界面密度、坡道密度等维度，但对动态视觉负担和社会心理体验的刻画不足；最后，研究样本集中于武汉，缺乏多城市对比，普适性与推广性仍待验证。

未来研究可在4方面深化：（1）扩大真实轮椅使用者参与范围，引入长期出行日志和轨迹数据，提升结果的真实性；（2）结合智能轮椅与动态感知技术，构建“轨迹—感知—环境”一体化分析框架；（3）进一步拓展心理与社会维度指标，完善包容性街道评估体系；（4）加强多城市、多区域比较，以验证模型的适应性和推广价值。通过这些改进，有望更全面揭示街道环境与轮椅群体健康生活的关系，为健康城市与包容性街道设计提供更坚实的实证支撑。

注：文中图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] DUHL L J. The Healthy City: Its Function and Its Future[J]. Health Promotion International, 1986, 1(01): 55-60.
- [2] ZHANG Z H, ZHAO M C, ZHANG Y P, et al. How Does Urbanization Affect Public

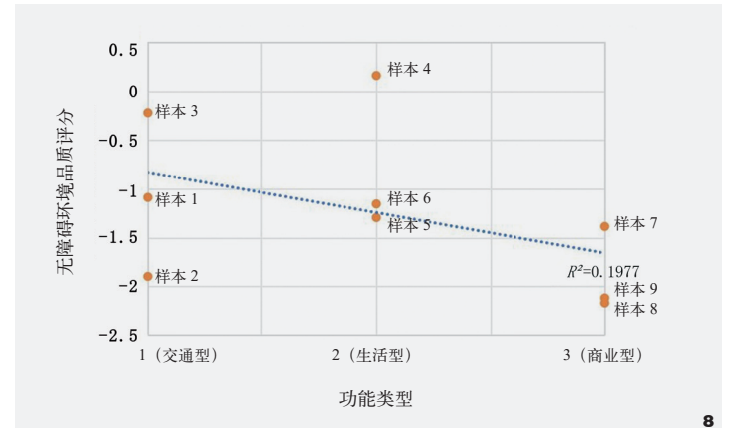


图8 街道功能类型与无障碍环境品质评价的散点图

Fig. 8 Scatter plots of street function types and barrier-free environment quality evaluation

Health? New Evidence From 175 Countries Worldwide[J]. Frontiers in Public Health, 2023, 10: 1096964.

- [3] KURIHARA M, NONAKA H, YOSHIKAWA T. Use of Highly Accurate GPS in Network-based Barrier-free Street Map Creation System[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Hague: IEEE, 2004: 1169-1173.
- [4] WANG Y C, WONG Y D, DU B, et al. Sociospatial Inclusiveness of Streets Through the Lens of Urban Pedestrian Mobilities: Go-along Interviews with less Mobile Pedestrians in Singapore[J]. Journal of Transport Geography, 2024, 115: 103811.
- [5] ULAHANNAN A, BIRRELL S, HERRIOTTS P. Inclusive Streetscapes: Embedding Disabled People's Lived Experience into Street Accessibility[J]. Wellbeing, Space and Society, 2025, 8: 100261.
- [6] ARAI K, TATEISHI T, KOBAYASHI T, et al. On-demand Barrier-free Street View System Using Sensor Information From General-purpose Wheelchair Users[C]// Proceedings of the 2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference. Turin: IEEE, 2017: 348-353.
- [7] 朱海鹏. 道路无障碍设计的探讨[J]. 中国市政工程, 2004(02): 8-9.
- [8] 李真, 谢宏坤. 浅谈城市道路环境中的无障碍设计[J]. 福建建筑, 2008(06): 15-18.
- [9] 江征. 山地城市公共步行空间无障碍设计研究——以重庆市主城区为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [10] 赵欣, 徐苏宁, 卢新潮. 寒地城市街道空间无障碍规划设计研究——以哈尔滨市为例[C]// 规划60年: 成就与挑战——2016中国城市规划年会论文集. 沈阳: 中国城市规划学会, 2016: 1214-1223.
- [11] 谭茜. 立体城市交通无障碍系统化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [12] 韩菁菁, 王艳婷. 包容性视角下的城市街道空间适老化设计研究[J]. 艺术与设计(理论版), 2022, 2(10): 75-77.
- [13] 胡娜木子. 城市街道步行空间包容性研究——以合肥市金寨路路段为例[J]. 住宅产业, 2023(02): 25-29.
- [14] 王凌瑾, 浦钰, 李若冰, 等. 残疾人休闲活动空间使用研究——以济南市五里牌坊社区为例[C]// 规划60年: 成就与挑战——2016中国城市规划年会论文集. 沈阳: 中国城市规划学会, 2016: 157-173.
- [15] 成燕, 章国琴, 倪松楠. 基于人因工程学街道空间界面增活设计探究——以上海文定路街道空间改造为例[J]. 设计, 2022, 35(08): 150-153.