

高密度城市澳门人行道轮椅无障碍环境评估体系构建研究

Research on Establishing an Evaluation Framework for Wheelchair Accessibility of Sidewalks in High-Density City Macao

田义朋 孟岭超* 唐啸 朱庭钰 张艺华

TIAN Yipeng, MENG Lingchao*, TANG Xiao, ZHU Tingyu, ZHANG Yihua

基金项目: 广东省高等教育学会“十四五”规划2024年度高等教育研究课题“适应社会需求的景观人才培养模式探索: 景观设计专业课程转型思考”(编号: 24GYB222); 澳门科技大学研究基金“高密度城市澳门街区长者疗愈空间设计研究”(编号: FRG-24-032-FA)

摘要

澳门作为典型的高密度城市, 空间资源紧张且人口老龄化加剧, 其社区人行道轮椅无障碍环境的更新需求复杂且迫切, 需要构建系统性的评估框架以帮助城市在资源有限的情况下进行精准的无障碍环境更新。基于澳门人行道的情况, 构建“重要性-可评估性-可改造性”三维评估模型, 运用模糊德尔菲法与层次分析法, 筛选出涵盖本体物理属性与支持设施属性两方面的10项指标, 并对这些指标进行权重估计。根据三维模型分类结果, 宽度、铺装材质及井盖与检修口平整度具有高重要性、高可评估性与高可改造性, 被确定为优先改造对象; 人行道纵向坡度、路缘石设计具有高重要性、高可评估性、低可改造性, 受地形条件与技术施工条件制约, 建议分期逐步改造; 便利设施具有低重要性、高可评估性、高可改造性, 可作为提升公众满意度的优化方向; 信息指引系统具有低重要性、低可评估性、高可改造性, 通过标识更新即可提高服务水平; 绿化设施与安全设施属于低重要性、低可评估性、低可改造性指标, 受生态保护与安全刚性管约束, 建议维持现行管理强度。最后针对不同分类的指标提出相应改进建议。

Abstract

As a typical high-density city with constrained spatial resources and accelerating population ageing, Macao faces complex and urgent demands for improving sidewalk wheelchair accessibility, necessitating a systematic evaluation framework to guide targeted interventions under resource constraints. This study developed a three-dimensional evaluation model comprising Importance, Evaluability, and Retrofittability dimensions. Using the Fuzzy Delphi Method and Analytic Hierarchy Process (AHP), the study identified 10 indicators across two dimensions: physical attributes and supporting facility attributes. Weights were then assigned to each indicator. According to the classification results of the three-dimensional model: Sidewalk width, pavement material, and manhole cover flatness scored high across all three dimensions, identifying them as priority renovation targets. Longitudinal slope and curb design exhibit high importance and evaluability but low retrofittability. Given topographic and technical constraints, phased renovation is recommended. Convenience facilities, with low importance but high evaluability and retrofittability, offer cost-effective opportunities to enhance public satisfaction. Wayfinding systems exhibit low importance and evaluability but high retrofittability, and can be readily improved through signage updates. Greening and safety facilities exhibit low scores across all three dimensions. Given stringent ecological and safety regulations, maintaining current management practices is recommended. Tailored improvement strategies are proposed for each indicator category.

关键词

无障碍; 人行道; 高密度城市; 城市更新; 三维评估模型

Keywords

Accessibility; Sidewalk; High-density city; Urban renewal; Three-dimensional evaluation model

收稿日期: 2025-05-30

修回日期: 2025-07-23

文章亮点

1) 创新构建“重要性-可评估性-可改造性”三维评估模型, 整合物理环境与支持设施属性, 解决指标碎片化问题; 2) 结合模糊德尔菲法与层次分析法, 筛选 10 项核心指标并精准赋权, 明确优先改造对象; 3) 聚焦高密度城市特性, 提供差异化改造策略, 为资源有限情况下的精准更新提供科学支撑。

无障碍性是城市包容性的重要衡量标准, 无障碍的实质是平等使用公共空间^[1]。目前中国在城市无障碍环境建设方面颁布了《中华人民共和国无障碍环境建设法》, 以及《无障碍设计规范》(GB 50763-2012) 等国家标准, 和《澳门特区无障碍通用设计建筑指引》《设计手册: 畅通无阻的通道 2008》(香港) 等地方标准, 但是这些执行标准仅规范了基础设施的“最低保障性”, 缺乏“效能性”的评估^[2]。而已有研究表明, 缺乏系统性的评估框架制约了无障碍环境的发展^[3]。

无障碍性贯穿于城市各类公共空间与基础设施之中, 步行道路系统作为连接城市功能节点的关键载体, 其无障碍建设水平直接关乎轮椅使用者等特殊群体的出行权益与社会参与能力^[4], 是高密度城市无障碍环境更新中的关注重点。因此, 城市人行道轮椅无障碍性的系统评估框架亟待建立, 以推动高密度城市的无障碍环境的精准、高效更新。

已有的人行道轮椅无障碍性研究主要从物理环境、行为感知、规划控制 3 个方面开展, 已取得一定成果, 对于无障碍环境的发展具有促进作用。如在物理环境层面, 已有研究明确轮椅最小通行宽度为 0.9 m^[5]、适宜轮椅通行的最大坡度为 1 : 12^[6]; 路面粗糙度大于 1.10 in/ft^①时, 轮椅震动幅度的均方根 (RMS) 值大于 0.5 m/s², 已进入健康危害区间^[7]; 不同铺装材质的轮椅阻碍系数存在差异^[8]等。在行为感知层面, 研究证实触觉预警带可提高轮椅使用者的路径辨识效率^[9]; 标识类型对寻路效率有显著影响^[10-11]; 复杂路径会导致轮椅使用者寻路时间延长约 6 min^[11]等。在规划控制层面, 研究聚焦管理因素对无障碍评估的制约作用, 其核心载体为相关标准、指引的制定与落地; 以及完善规划管控机制。但目前关于人行道轮椅无障碍性的研究多聚焦于单一要素, 如通过加速度传感器评价路面平整度对轮椅的影响^[2], 采用地理信息系统分析路径连通性对轮椅使用者寻路的影响^[12]等, 相较于步行性研究, 缺乏对物理环境与非物理环境间的协同效应的探索^[9,13], 未形成较为完善的人行道轮椅无障碍性评价指标体系。而构建一个整合物理环境、行为感知及改造可行性的人行道轮椅无障碍环境系统性评估框架, 可为城市道路无障碍更新提供更科学的依据。

澳门特别行政区 (以下简称“澳门”) 作为典型的高密度城市, 其历史城区街道狭窄、路面情况复杂, 人行道基础设施更新难度大。同时根据澳门特区政府历次人口普查数据, 澳门老龄化率从 1981 年的 7.2% 增长至 2025 年的 17%, 澳门已进入深度老龄化社会, 轮椅使用者数量也随之增加,

而狭窄的人行道与老化的路面设施会影响轮椅通行的稳定性^[14-15]。因此, 澳门的社区公共空间面临着开展轮椅无障碍通行精准更新的现实需求。

基于澳门的人行道情况, 本研究拟构建一套兼顾物理环境、行为感知及改造可行性的人行道轮椅无障碍环境评估体系, 识别改造要素的优先级, 为澳门及类似高密度城市社区的人行道无障碍环境精准更新改造提供科学依据。

1 三维决策框架建立

上述物理环境、行为感知层面的研究表明, 人行道的物理属性及人行道的附属设施, 都对轮椅使用者的行为有着较大的影响。而现有的规划管控体系多存在碎片化问题, 或缺乏对轮椅物理特性的精准考量, 或未将设施改造可行性纳入管控范畴, 导致管理因素难以有效支撑轮椅无障碍环境的系统性优化。《无障碍设计规范》作为国家层面的核心管理标准, 虽明确了人行道宽度、路缘石坡道等基础指标, 但仅设定“最低保障性”要求, 未针对轮椅在高密度城市环境下通行的物理特性 (如铺装阻力、井盖平整度适配性) 制定专项管控细则, 也缺乏与设施改造更新相衔接的动态调整机制^[2]; 《澳门特区无障碍通用设计建筑指引》在历史城区等高密度空间的适配性不足, 未充分考虑狭窄街道、复杂管网导致的复杂路面情况对轮椅通行的影响, 且未建立“规划-建设-改造”的闭环管控流程^[6]。

因此, 基于物理环境、行为感知、规划管控 3 个层面的理论研究, 本文提出“重要性-可评估性-可改造性”的决策框架 (图 1), 以“多维指标支撑-三维决策导向”为核心逻辑, 系统整合人行道轮椅无障碍环境的影响要素与决策维度: 重要性聚焦人行道的指标属性对轮椅使用者通行安全、效率、舒适度的影响程度; 可评估性关注人行道的指标属性是否具备明确可测量、可量化的评价标准; 可改造性衡量相关指标属性通过工程或管理手段实现改善的难易程度。本模型旨在突破传统评估的一维度局限, 通过多维度要素的系统整合, 为人行道轮椅无障碍环境的评估、改造优先级判定及策略制定提供科学工具, 为高密度城市资源约束下的无障碍环境精准更新提供理论与方法支撑。

2 人行道轮椅无障碍性指标体系的构建

2.1 指标体系的初步构建

通过对文献的分析整理与归纳, 梳理出相关指标。Zheng Liang 等^[16]提出的步行属性分类体系将人行道基础

① in/ft 是用于量化表面粗糙度的单位, 核心定义为在水平方向上每 1 ft (英尺, 1 ft=0.304 8 m) 的长度范围内, 表面在垂直方向上产生的偏差 (即凹凸起伏) 的总和, 单位以 in (英寸, 1 in=25.4 mm) 表示。

设施分为基本属性和辅助设施，其中基本属性指人行道本体的物理属性，如宽度、铺装材料，辅助设施指路灯、座椅等。在 Rosilawati Binti Zainol 等^[17] 评估人行道满意度的研究中，以及 Andréa Holz Pfützenreuter^[18] 等提出的步行友好性评估框架中均采用类似分类。依据以上参考，将人行道属性分为人行道本体物理属性和人行道支持设施属性。人行道本体物理属性是直接决定轮椅无障碍通行的基础条件，包括人行道宽度、人行道纵向坡度、人行道横向坡度、人行道铺装材质、路缘石设计、井盖与检修口设计 6 个指标。人行道支持设施属性指附加于人行道本体之上的辅助性设施系统，通过功能补充提升轮椅使用者体验，但与人行道基础通行能力不冲突，包括安全设施、绿化设施、便利设施、信息指引系统、夜间照明 5 个指标^[5, 11, 19~29]（表 1）。

2.2 指标的一致性检验与权重估计

本研究邀请 15 位来自城市交通、景观设计、城市规划领域的研究者，对 11 个指标的重要性、可评估性、可改造性进行评价，采用三角模糊数（最低值 L 、最可能值 M 、最高值 U ）形式独立打分。

随后对打分结果进行一致性检验，通过重叠度公式计算专家意见共识度。此处只考虑重要性的一致性检验，因为本次人行道轮椅无障碍环境评估的核心目标是优先解决对轮椅通行影响最显著的问题，而重要性直接反映指标对轮椅使用者安全、效率、舒适度的影响程度，是后续精准更新的价值判断基础。先通过重要性一致性检验筛选出专家公认的高影响指标，再进一步分析其可评估性、可改造性，符合“需求导向—分步筛选”的研究逻辑，避免非核心维度（如可评估性）过早介入导致关键指标被误筛。重叠度计算公式如下：

$$O_{ij} = \frac{\min(H_i, H_j) - \max(L_i, L_j)}{H_j - L_j} \quad (\text{若 } H_i \geq L_j \text{ 且 } H_j \geq L_i) \quad (1)$$

$$O_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n O_{ij}}{C_n^2} \quad (2)$$

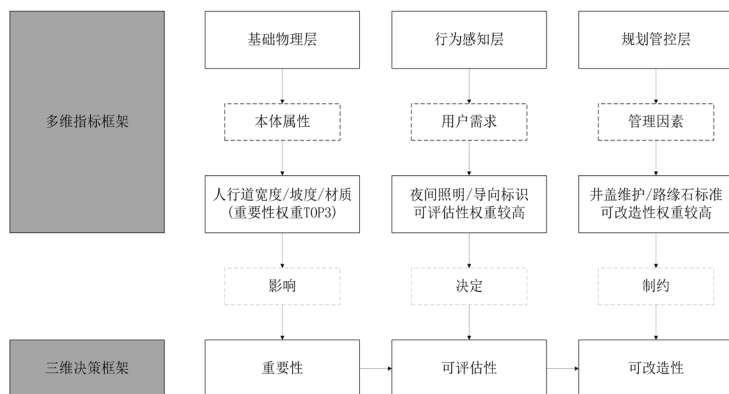


图 1 决策框架生成路径

Fig.1 Generation path of the decision-making framework

式（1）中， O_{ij} 表示第 i 位专家与第 j 位专家对同一评估指标打分结果的重叠度，用于量化两位专家意见的共识程度，重叠度越高说明专家对该指标的判断越一致； H_i 和 H_j 分别为第 i 位和第 j 位专家对该指标打分的最高值 U ； L_i 和 L_j 分别为第 i 位和第 j 位专家对该指标打分的最低值 L 。式（2）中， O_{avg} 是某指标某维度的专家重叠度平均值，是指标筛选的核心依据； n 表示参与打分的专家总数。

将阈值设定为 $O_{avg} \geq 0.5$ ^[30~31]，剔除不达标的指标“人行道横向坡度”（ $O_{avg}=0.44$ ）（表 2）。

研究采用模糊德尔菲法与层次分析法结合的权重计算框架。首先使用重心法将三角模糊数得分转换为明确值。公式如下：

$$W_{ni} = \frac{\bar{L}_{ni} + 2\bar{M}_{ni} + \bar{U}_{ni}}{4} \quad (n = 1, 2, 3; i = 1, 2, \dots, 10) \quad (3)$$

表 1 文献分析所得轮椅无障碍性初步评价指标

Tab.1 Preliminary wheelchair accessibility indicators from literature review

分类	指标	指标描述	参考文献
人行道本体物理属性	人行道宽度	①无人行道 ②小于 0.9 m：构成显著障碍 ③大于等于 0.9，小于 1.2 m：基本通行但局促 ④大于等于 1.2，小于 1.5 m：基本无障碍 ⑤大于等于 1.5，小于 3 m：理想宽度 ⑥大于 3 m：极宽敞	[5,19]
人行道支持设施属性	人行道纵向坡度	①小于 5%：适宜坡度 ② 5%~8%：可接受坡度 ③大于 8%：陡坡风险	[20]
	人行道横向坡度	①小于 2%：安全舒适 ② 2%~4%：行动不便者通行受阻 ③大于 4%：摔倒风险高	[21~22]
人行道支持设施属性	人行道铺装材质	①混凝土：阻碍最小 ②铺路石：阻碍系数 1.2 ③柏油：阻碍系数 1.3 ④砖 / 卵石：阻碍系数 1.6	[23]
	路缘石设计	①高路缘石：严重障碍 ②圆形路缘石：侧翻风险 ③坡道路缘石：安全性依赖坡度 ④缺陷坡道：轮椅损坏风险	[23]
人行道支持设施属性	井盖与检修口平整度	①盖框差大于 5 mm：有绊倒风险 ②衔接不良：阻碍通行 ③位置不当：需警示标识	[24]
	安全设施	防护栅栏 / 防撞柱 / 监控等（达标性）	[25~26]
	绿化设施	植被离地高度不少于 2.1 m（达标性）	[27]
	便利设施	座椅 / 垃圾桶 / 车站等设置合理性（达标性）	[28]
人行道支持设施属性	信息指引系统	交通信号 / 标志清晰度（达标性）	[11]
人行道支持设施属性	夜间照明	公共照明覆盖率不少于 70%（达标性）	[29]

式 (3) 中, W_{ni} 为第 i 个指标第 n 个维度的三角模糊数得分转换后的明确值, 即其初步得分; $\bar{L}_{ni}$ 、 $\bar{M}_{ni}$ 、 $\bar{U}_{ni}$ 分别对应专家对第 i 个指标第 n 个维度打分的最低值的平均值、最可能值的平均值、最高值的平均值, 其中 M 乘以 2 是因为其为专家核心判断, 需突出其对最终得分的影响权重。

本次问卷采用 9 级量表, 重要性初步得分大于 5 的为较重要的指标, 10 个指标均满足此条件 (表 3)。

在对属性层和指标层分别进行归一化处理后, 进行 AHP 综合权重计算。得到每个指标重要性、可评估性、可改造性的最终权重 (表 4)。

表 2 指标重叠度
Tab.2 Indicators overlap

属性分类	重叠度平均值	指标	重叠度平均值
人行道本体物理属性	0.55	人行道宽度	0.58
		人行道纵向坡度	0.51
		人行道横向坡度	0.44
		人行道铺装材质	0.62
		路缘石设计	0.63
		井盖与检修口平整度	0.54
人行道支持设施属性	0.67	绿化设施	0.66
		信息指引系统	0.60
		安全设施	0.51
		夜间照明	0.52
		便利设施	0.51

表 3 属性分类及指标在 3 个维度的初步得分
Tab.3 Preliminary importance scores of attribute categories and indicators

属性分类	重要性	可评估性	可改造性	指标	重要性	可评估性	可改造性
人行道本体物理属性	5.35	5.65	5.18	人行道宽度	5.53	5.42	4.85
				人行道纵向坡度	5.30	5.17	4.45
				人行道铺装材质	5.13	5.18	4.87
				路缘石设计	5.25	5.05	4.68
				井盖与检修口平整度	5.13	5.05	5.28
人行道支持设施属性	5.05	5.65	5.23	绿化设施	5.25	4.70	5.77
				信息指引系统	5.73	5.30	5.98
				安全设施	5.75	5.40	5.37
				夜间照明	5.78	5.73	5.78
				便利设施	5.72	5.65	6.23

2.3 三维评估模型构建

以归一化后的属性权重为基础, 以重要性、可评估性、可改造性作为三维模型进行指标分类, 采用二分法对 10 个二级指标实施系统性分类。各维度权重总和为 1, 单指标理论平均权重阈值为 0.100, 故以 0.100 为临界值划分高 (H)、低 (L) 重要性等级; 按 0.100 标准界定高 (H)、低 (L) 可评估性类别; 采用 0.100 基准区分高 (H)、低 (L) 可改造性层级。通过笛卡尔坐标系将三维属性组合划分为 8 类空间象限 (2^3), 其分类规则为: 若权重值小于 0.100, 则划定为 L 等级; 若权重值不小于 0.100, 则划定为 H 等级。

3 结果分析

3.1 属性权重分析

人行道本体物理属性与人行道支持设施属性的权重在核心评估维度上呈现显著差异 (表 4)。在重要性维度与可评估性维度中, 物理属性的权重更高; 而在可改造性维度, 支持设施属性的权重以微弱差值超越物理属性。值得注意的是, 两种属性的重要性差值 (3%) 与可评估性差值 (4.6%) 较可改造性差值 (0.4%) 大, 表明物理属性作为人行道无障碍性的客观条件, 在工程干预层面上的优化潜力相对较小。

3.2 三维评估结果分析

人行道指标在三维矩阵中的分布 (表 5, 图 2) 呈现显著异质性: 分布在 H-H-H 象限的指标有人行道宽度、人行道铺装材质、井盖与检修口平整度, 属功能性指标, 存在改善的可能及空间, 可给予较高的优先级。分布在 H-H-L 象限 ($I \geq 0.1$, $E \geq 0.1$, $M < 0.1$) 的指标如人行道纵向坡度、路缘石设计, 受地形条件、技术施工条件等的影响, 建议

表 4 指标最终权重
Tab.4 Final weights of indicators

属性分类	指标	重要性权重 I	可评估性权重 E	可改造性权重 M
人行道本体物理属性	人行道宽度	0.108	0.110	0.100
	人行道纵向坡度	0.104	0.104	0.092
	人行道铺装材质	0.100	0.105	0.100
	路缘石设计	0.103	0.102	0.097
	井盖与检修口平整度	0.100	0.102	0.109
	总计	0.515	0.523	0.498
人行道支持设施属性	绿化设施	0.090	0.084	0.099
	信息指引系统	0.099	0.094	0.103
	安全设施	0.099	0.096	0.093
	夜间照明	0.099	0.102	0.100
	便利设施	0.098	0.101	0.107
	总计	0.485	0.477	0.502

分期逐步改造。分布在 L-H-H 象限 ($I < 0.1$, $E \geq 0.1$, $M \geq 0.1$) 的指标以便利设施为代表, 功能重要度低的同时可改造性较高, 可将其作为公众满意度提升的方向。信息指引系统指标分布在 L-L-H 象限 ($I < 0.1$, $E < 0.1$, $M \geq 0.1$), 说明更新标识可提高服务水平, 可行性高。绿化标准、安全设施指标分布在 L-L-L 象限, 因其受到生态保护、安全等刚性管制, 建议维持现行管理强度。

4 讨论

本研究通过三维评估框架揭示了高密度城市人行道无障碍环境的核心属性特征与优化路径。研究表明, 人行道本体物理属性在重要性与可评估性维度明显优于人行道支持设施属性, 与 Stephanie Gamache 等^[32]通过专家共识法验证的步行基础设施优先性理论相呼应。其中, 人行道宽度与纵向坡度的重要性权重较高, 即两个指标对轮椅行驶有较大影响。但在 V. Aromal 等^[33]对城市地区行人设施评估体系的研究中, 宽度指标获得较高得分, 坡度指标的得分相对较低。研究结果的差异可能源于坡度的设计缺陷对轮椅使用者独特的动力学特征(如稳定性、推力需求)有着显著影响^[33]。

在可评估性维度下, 人行道本体物理属性的总权重高于支持设施属性。本体物理属性中的人行道宽度、铺装材质指标的评估标准清晰且易量化, 这与《城市道路工程设计规范》(CJJ 37-2012) (2016 年版)中对人行道最小宽度的分级界定、铺装相关的路侧带功能划分标准直接对应。且在基于模糊层次分析法与数据包络分析整合的行人道路系统多准则评估中, 这类可通过尺寸测量、材质性能检测的量化指标, 因数据获取难度低、客观性强, 也普遍获得更高权重分配^[34]。在支持设施属性中, 夜间照明、便利设施指标的权重较高, 其中夜间照明的照度参数可依据《澳门特区无障碍通用设计建筑指引》中“公共通道地面照明不低于 120 lx”“无障碍标识照明不低于 150 lx”的技术规范, 通过照度计直接检测。而绿化设施、信息指引系统等指标的权重相对较低, 量化评估难度较大, 如绿化设施需通过行人视角绿化可见比例、绿化遮荫率等复合指标结合使用者主观感知评分综合评估; 信息指引系统则缺乏统一的对于标识辨识度与信息完整性的量化标准, 其评估过程需结合专家打分(如指标权重赋值)与轮椅使用者、视障人士等群体的反馈数据(如寻路中断次数、信息理解正确率)。

在可改造性维度上, 人行道支持设施属性占据微弱优势, 而人行道本体物理属性改造面临多方面的限制, 如井盖平整度改造需协调市政管网系统, 人行道扩展受道路红线制约等。这与杨瑞华等^[24]提到的市政设施协同改造理论具有实践一致性。

本研究通过三维评估矩阵的象限分析揭示差异化治理路径: H-H-H 象限包含宽度、铺装材质、井盖与检修口平整度指标, 权重占比为 30.8%, 其高可改造性与高可评估性支持其作为优先改造对象, 建议通过铺装更换、井盖顶面与路面顺接等工程, 实施快速改造。H-H-L 象限包含

表 5 指标分布特征
tab.5 Distribution characteristics of indicators

属性组合象限	指标	重要性 I	可评估性 E	可改造性 M	象限重要性权重占比	策略建议
H-H-H	人行道宽度	0.108	0.110	0.100	30.80%	优先改造 (铺装优化、宽度拓展)
	人行道铺装材质	0.100	0.105	0.100		
	井盖与检修口平整度	0.100	0.102	0.109		
H-H-L	人行道纵向坡度	0.104	0.104	0.092	20.70%	分期改造 (微型坡道、地形适配)
	路缘石设计	0.103	0.102	0.097		
H-L-H	-	-	-	-	0	高重要性但评估难, 需开发新测量方法
H-L-L	-	-	-	-	0	高重要性但改造受限, 需政策突破
L-H-H	便利设施	0.098	0.101	0.107	19.70%	低成本提升 (模块化设施、智能布局)
	夜间照明	0.099	0.102	0.100		
L-H-L	-	-	-	-	0	低重要性但评估易, 可监测维护
L-L-H	信息指引系统	0.099	0.094	0.103	9.90%	服务优化 (标识更新、数字导航)
L-L-L	绿化设施	0.090	0.084	0.099	18.90%	维持管理 (生态保护优先)
	安全设施	0.099	0.096	0.093		

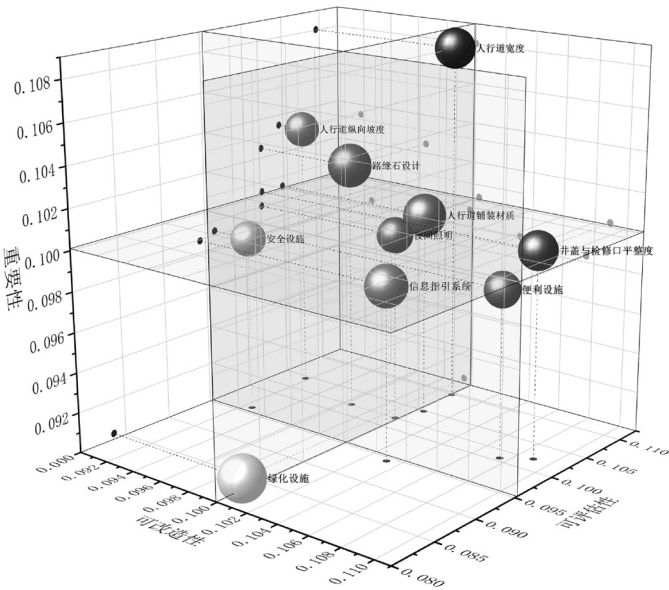


图 2 人行道无障碍指标三维属性分布散点图
Fig.2 Scatter plot of the three-dimensional attribute distribution of sidewalk accessibility indicators

纵向坡度、路缘石设计指标, 坡度改造需调整竖向高程, 路缘石改造涉及道路断面重构, 此象限指标受地形与技术规范双重制约, 宜采取微型干预(局部坡道优化)与定期维护相结合的中期策略^[6]。L-H-H 象限包含可改造性较高的便利设施指标, 建议通过模块化布局, 使用射频识别定位技术^[35], 布置可根据人流移动调整的座椅与垃圾桶, 让公共设施使用率提升。L-L-H 象限包含指引信息, 可设置信息系统(2个/百米以上), 结合数字导航提升服务水平^[36]。绿化设施为“三低”指标, 应考虑剔除, 这也符合 Dwi Oktavalyan Saputri 的绿化冲突管理理论^[27]。需进一步讨论的是, 支持设施属性中的安全设施指标的三维权重均低于 0.1, 且当前澳门相关现状已基本符合《无障碍设计规范》及《澳门特区无障碍通用设计建筑指引》中关于防护栅栏、监控设备等的基础设置标准, 额外投入资源进行重点改造的边际效益较低。尽管上文未实际删除此类指标, 但从资源高效利用角度出发, 可将绿化设施与安全设施从重点关注干预对象范围中剔除, 减少非必要的资源消耗, 维持现有的管理状态。此举能将有限的资金、技术集中投向本体物理属性中可改造性高的核心指标(如井盖平整度、铺装材质), 进一步强化模型对精准更新的指导价值, 更贴合澳门高密度城市资源约束下的改造需求。

此次研究针对高密度城市社区人行道空间面临的空间局促、设施密集等影响轮椅无障碍性的问题, 提出了一种优先级决策框架。此框架有助于社区管理者在资源有限的情况下, 识别出对轮椅通行影响较大、改造难度与成本相对较低的要素进行优先关注与更新, 从而提升社区环境的包容性与可达性。

5 结论

针对高密度城市澳门的社区人行道轮椅无障碍环境更新的实际情况, 本研究构建了以“重要性-可评估性-可改造性”为核心的人行道无障碍性三维评估体系, 筛选出涵盖两大属性的 10 项指标: 人行道本体物理属性包含宽度、纵向坡度、铺装材质、路缘石设计、井盖与检修口平整度; 人行道支持设施属性包含绿化标准、信息指引系统、安全设施、夜间照明、便利设施。其中, 人行道宽度、纵向坡度及井盖与检修口平整度被识别为对轮椅无障碍通行影响最显著的关键物理要素, 应作为高密度城市的优先改造对象。人行道本体物理属性的重要性和可评估性相对较高, 人行道支持设施的可改造性相对较高。

相较于既有评估研究, 本研究突破了传统研究中物理参数(如坡度)、行为感知(如寻路效率)与管控要素(如改造可行性)互不关联的孤立状态, 将三类指标纳入统一评估框架, 有效提升了评估指标的系统性; 同时, 进一步增强了评估框架对高密度城市空间约束条件下改造优先级决策的适应性, 最终为高密度社区在有限资源条件下实施精准、高效的人行道轮椅无障碍更新提供了科学支撑。

然而, 本研究存在以下局限。首先, 基于模糊德尔菲法

的指标筛选依赖专家主观判断, 可能导致群体偏好偏差。其次, 模型构建与结论推导基于专家评估, 缺乏轮椅使用者的实证数据支持。此外, 研究聚焦高密度城市环境, 结论对其他城市类型的普适性有待验证。还需考虑轮椅使用者与行人的空间交互, 如通行冲突或避让行为, 也需考虑人行道动态变化因素, 如临时占道施工或早晚高峰行人流量变化等。未来研究需通过定量纵向比较弥补数据缺口, 并深入探索轮椅使用者与普通行人的通行需求平衡机制。

注: 图片均由作者自绘。

参考文献:

- [1] 王阳, 孙计领, 陈功. 无障碍的概念和相关问题研究[J]. 人口与发展, 2023, 29(4): 138-149, 74.
- [2] LEE C, DAVELER B, CANDIOTTI J, et al. Usability and Vibration Analysis of a Low-Profile Automatic Powered Wheelchair to Motor Vehicle Docking System[J]. *Vibration*, 2023, 6(1): 255-268.
- [3] ZALLIO M, CLARKSON P J. On Inclusion, Diversity, Equity, and Accessibility in Civil Engineering and Architectural Design. A Review of Assessment Tools[J]. *Proceedings of the Design Society*, 2021, 1: 2297-2306.
- [4] IWARSSON S, STÅHL A. Accessibility, usability and universal design - positioning and definition of concepts describing person-environment relationships[J]. *Disability and Rehabilitation*, 2003, 25(2): 57-66.
- [5] FAST V, GUO J. Putting Pedestrians First: Sidewalk Infrastructures, Width Patterns and COVID-19[J]. *GI_Forum*, 2021, 1(1): 242-250.
- [6] ALHAJAJ N, HABIBULLAH A. Assessing Walking Routes for Wheelchair Accessibility at a Historic District in Saudi Arabia to Enhance Social Sustainability[J]. *Sustainability*, 2025, 17(8): 3636.
- [7] DUVAL J, COOPER R, SINAGRA E, et al. Development of surface roughness standards for pathways used by wheelchairs[J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2387: 149-156.
- [8] GUZMAN L A, ARELLANA J, CASTRO W F. Desirable streets for pedestrians: Using a street-level index to assess walkability[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 111: 103462.
- [9] MITROPOULOS L, KAROLEMEAS C, TSIGDINOS S, et al. A composite index for assessing accessibility in urban areas: A case study in Central Athens, Greece[J]. *Journal of Transport Geography*, 2023, 108: 103566.
- [10] SHI Y, ZHOU X. Evaluating the Effectiveness of Different Directional Signage Systems in Indoor Wayfinding: A Human-Centered Experiment Conducted in Virtual Reality[C]//AHRAM T, KARWOWSKI W, MARTINO C, et al. *Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2025): Integrating People and Intelligent Systems*. Nanjing: AHFE International, 2025: 351-361.
- [11] 王玥, 秦华, 王辉, 等. 基于轮椅使用者的地铁导向标志可达性研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(24): 10698-10705.
- [12] KOZIEVITCH N P, ALMEIDA L D A, SILVA R, et al. An Alternative and Smarter Route Planner for Wheelchair Users - Exploring Open Data[C]//HELFFERT M, KLEIN C, DONNELLAN B,

- et al. Smart Cities, Green Technologies, and Intelligent Transport Systems: 5th International Conference, SMARTGREENS 2016. Zurich: Springer, 2017: 94-99.
- [13] FELICIANI C, MURAKAMI H, SHIMURA K, et al. Efficiently informing crowds – Experiments and simulations on route choice and decision making in pedestrian crowds with wheelchair users[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 114: 484-503.
- [14] BORDAS EDDY M, GARCIA SOLER S, VIDAL WAGNER C, et al. Four Wheelchair-User Architects [M]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [15] JIMÉNEZ MARTÍN D, RAMÍREZ SAIZ A, AJURIAGUERRA ESCUDERO M A. Urban Accessibility in World Heritage Cities. Accessibility Considerations in Pedestrian Routes in Historic City Centres [C]//GAROFOLLO I, BENCINI G, ARENGHI A. Studies in Health Technology and Informatics. Amsterdam: IOS Press, 2022.
- [16] LIANG Z, LO H K, NG K F, et al. Towards walkability enhancement: A systematic review and future directions[C]// Swiss Transport Research Conference. Proceedings of 23rd Swiss Transport Research Conference (STRC 2023). [S.l.]: Ascona, 2023.
- [17] ZAINOL R, AHMAD F, NORDIN N A, et al. Evaluation of users' satisfaction on pedestrian facilities using pair-wise comparison approach[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, 18: 012175.
- [18] PFÜTZENREUTER A H, OLIVEIRA L G P D. Estudo de caminhabilidade da área central de Balneário de Barra do Sul[J]. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, 2019, 7: 49.
- [19] SILVA O H D, ANGELIS NETO G D. Nível de serviço de calçadas: proposta de modelo de avaliação para cidades de pequeno porte[M]. Guarujá-SP: Editora Científica Digital, 2021.
- [20] ALVES F, CRUZ S, RIBEIRO A, et al. Walkability Index for Elderly Health: A Proposal[J]. Sustainability, 2020, 12 (18) : 7360.
- [21] PÉREZ JIMÉNEZ T, LÓPEZ S, MARTÍNEZ ORDÓÑEZ A, et al. Guía de entornos caminables seguros: Lineamientos de diseño para el acceso a equipamientos urbanos y al transporte público en ciudades mexicanas[Z]. México: World Resources Institute (WRI) México, 2022.
- [22] SUTRISNO A, WAHYUNI A. Pedestrian User Satisfaction Analysis[J]. The Spirit of Society Journal, 2021, 4: 126-136.
- [23] MATTHEWS H, BEALE L, PICTON P, et al. Modelling Access with GIS in Urban Systems (MAGUS) : Capturing the Experiences of Wheelchair Users[J]. Area, 2003, 35 (1) : 34-45.
- [24] 杨瑞华, 柴鹏娟, 廖崎龙. 浅析城市道路检查井“盖框差”类病害 [J]. 科技风, 2024 (1) : 65-67.
- [25] SYAH E, PURWANTIASNING A W. KAJIAN KONSEP TRANSIT ORIENTED DEVELOPMENT PADA KAWASAN CENTRAL BUSINESS DISTRICT BINTARO JAYA, TANGERANG[J]. PURWARUPA Jurnal Arsitektur, 2024, 8 (2) : 107.
- [26] CHUA C, KOSNIN A M, YEO K J. Fuzzy Delphi method for A-level mathematics technological pedagogical and content knowledge module[J]. International Journal of Evaluation and Research in Education, 2024, 13 (1) : 441.
- [27] SAPUTRI D O. Fasilitas Pejalan Kaki bagi Penyandang Disabilitas pada Jalur Pedestrian di Lapangan Merdeka Kota Bengkulu[J]. INKLUSI, 2023, 9 (2) : 125-144.
- [28] MARTÍNEZ-CHAO T, MENÉNDEZ-DÍAZ A, GARCÍA-CORTÉS S, et al. Analysis of Building Accessibility Using Inertial and Optical Sensors[J]. SENSORS, 2023, 23 (12) : 5491.
- [29] MANDASARI V. Generating walkability concept for basuki rahmat corridor: a content analysis[D]. Jakarta: Universitas Indonesia, 2020.
- [30] KAMARUDDIN K, JAFRI R, ABD AZIZ S, et al. Application of Fuzzy Delphi Technique for Developing a Higher Education Competency Model: Insights from HR practitioners[J]. Environment-Behaviour Proceedings Journal, 2025, 10 (SI28) : 45-52.
- [31] MOHAMMED R T, YAAKOB R, SHAREF N M, et al. Unifying The Evaluation Criteria Of Many Objectives Optimization Using Fuzzy Delphi Method[J]. Baghdad Science Journal, 2021, 18 (4 suppl.) : 1423.
- [32] GAMACHE S, ROUTHIER F, MORALES E, et al. Mapping review of accessible pedestrian infrastructures for individuals with physical disabilities[J]. Disability and Rehabilitation. Assistive Technology, 2019, 14 (4) : 410-422.
- [33] AROMAL V, NASEER M A. A methodology for the identification of significant factors for the improvement of pedestrian facilities in an urban area[J]. Journal of Urban Management, 2022, 11 (3) : 353-364.
- [34] LI H, LIN Y, WANG Y, et al. Multi-Criteria Analysis of a People-Oriented Urban Pedestrian Road System Using an Integrated Fuzzy AHP and DEA Approach: A Case Study in Harbin, China[J]. Symmetry, 2021, 13 (11) : 2214.
- [35] STEFFAN I T, DE SALVATORE A, MATONE F. Improving Accessibility and Usability in the Built Environment. Case Study: Guide Lines by the Lombardy Region, Italy[C] //GAROFOLLO I, BENCINI G, ARENGHI A. Studies in Health Technology and Informatics. Amsterdam: IOS Press, 2022.
- [36] GROFELNIK I, TOPOLŠEK D, STERNAD M, et al. Construction of the model and analysis of the suitability of the urban environment in the city center of Celje in connection with people with mobility disabilities[J]. Business Logistics in Modern Management, 2021, 21 (6) : 119-131.

作者简介:

田义朋/1998年生/男/江苏无锡人/澳门科技大学人文艺术学院(澳门 999078)/在读硕士研究生/专业方向为空间感知与行为

孟岭超(*通信作者)/1987年生/男/山东烟台人/博士/澳门科技大学人文艺术学院(澳门 999078)/硕士生导师、助理教授/研究方向为疗愈环境设计、社区营造、空间环境感知与行为/E-mail: lcmeng@must.edu.mo

唐啸/1999年生/男/湖南永州人/澳门科技大学人文艺术学院(澳门 999078)/在读硕士研究生/专业方向为空间感知与行为

朱庭钰/2002年生/女/福建厦门人/澳门科技大学人文艺术学院(澳门 999078)/在读硕士研究生/专业方向为空间感知与行为

张艺华/2002年生/女/山东青岛人/澳门科技大学人文艺术学院(澳门 999078)/在读硕士研究生/专业方向为环境设计与文化遗产保护