

面向步行交通品质提升的人行道宽度设计

雷雪琪^{1,2}, 白玉¹, 张建波², 李春艳², 杜华兵²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 北京交通发展研究院, 北京 100161)

摘要: 为提升街道步行交通品质、促进全龄友好城市建设, 针对人行道服务水平及宽度设计开展实证研究。首先, 基于上海市典型路段的人行道实地观测数据, 运用多项式拟合方法分析行人流量、人均占用空间(POS)与步行速度的关系, 同时结合闵可夫斯基距离和对比法分析年龄、性别因素对步行特征的影响。研究发现: 行人交通流具有显著可压缩性, 不同年龄段行人的步行速度及 POS 差异显著, 同年龄段的行人流量、POS 和步行速度之间的相关性不强。其次, 将 POS 作为表征服务水平的关键指标, 经分析发现影响 POS 的因素按显著程度由高到低依次为人行道宽度、年龄以及单位距离和时间的行人流量。基于 K-means 聚类法将人行道宽度划分为3组, 并针对老年、壮年和少年儿童群体分别制定 A-F 级人行道服务水平分级标准。最后, 针对不同的使用场景、步行群体和流量需求提出相应的人行道宽度设计建议。

关键词: 步行交通; 人行道宽度; 步行速度; 人均占用空间; 服务水平

Width Design of Urban Sidewalks for Improving Pedestrian Walking Quality

LEI Xueqi^{1,2}, BAI Yu¹, ZHANG Jianbo², LI Chunyan², DU Huabing²

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Beijing Transport Institute, Beijing 100161, China)

Abstract: To enhance the quality of pedestrian traffic on the streets and promote the construction of an age-friendly city, an empirical study was conducted on the sidewalk service level and width design. Firstly, based on the filed observation data of sidewalks in typical sections of Shanghai, the relationship between pedestrian flow, per-person occupation space (POS), and walking speed were analyzed by polynomial fitting method, and the influence of age and gender on walking characteristics was analyzed by Minkowski Distance and comparison method. Results show that the pedestrian traffic flow is significantly compressible, pedestrian walking speed and POS of different age groups are different, and the correlation between pedestrian flow, POS, and walking speed within the same age group is relatively poor. Secondly, taking POS as the key indicator of service level, it is found that the factors affecting POS in descending order of significance are width, age, and pedestrian flow per unit distance and time. Based on the K-means clustering method, the sidewalk width is divided into three groups, and the A-F sidewalk service level classification standards are formulated for the elderly, middle-aged, and children groups. Finally, according to different usage scenarios, pedestrian groups, and flow demand, the corresponding sidewalk width design suggestions were put forward.

Keywords: pedestrian traffic; sidewalk width; walking speed; per-person occupation space; level of service

收稿日期: 2024-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目“演变中的现代城市道路交通系统集成设计基础理论与方法”(51238008)

作者简介: 雷雪琪(1992—), 女, 内蒙古包头人, 博士研究生, 工程师, 研究方向为交通规划与管理, 电子邮箱 tjjtlxq@163.com。

通信作者: 张建波(1991—), 男, 河北唐山人, 博士, 博士后, 高级工程师, 研究方向为交通规划与管理, 电子邮箱 zhangjb928@163.com。

0 引言

随着城市机动化发展及街区高密度开

发, 城市道路步行空间和行人路权逐渐被侵占。在道路红线范围内, 车行道及设施带的需求往往优先得到满足, 而人行道宽度则不

断被压缩。为促进绿色交通的发展,推进全龄友好城市建设,应当塑造有魅力的道路空间,营造宜人宜居的街道环境。要特别重视城市的可步行性^[1],充分考虑地段特征、功能需求以及使用者差异,为不同年龄、性别及出行目的的居民提供多元化、高品质的步行空间。

人行道的服务水平及宽度设计应建立在行人交通流特征研究基础上,其中速度、密度、流量及其相互关系构成经典研究框架。既有研究多集中于流量大、具有连续行人流的场馆和枢纽内部的走廊、通道和台阶等^[2-5],而对具有典型随机性、非连续特征的人行道研究相对不足。在行人个体特征(性别^[6-7]、年龄、出行目的等)对步行参数(流量、密度、速度)及冲突行为的影响研究方面,研究对象也主要集中于步行通道、台阶和交叉口等场景^[8-11],缺乏针对人行道的专门研究。

既有研究中,关于人行道步行交通流特征的分析存在明显局限:数据采集多限于中央商务区等特殊区域^[12]而非常规街道空间;观测时段多选择高峰时段^[13]而非涵盖高峰、平峰的全时状态。事实上,人行道宽度设计应基于服务水平研究,而服务水平是步行网络、设施条件、环境品质以及行人交通流特征等多因素综合作用的结果。其中,行人交通流特征作为可量化的客观指标,直接影响步行体验与舒适度^[14]。

在评价体系方面,J. J. Furin^[15]以行人流理论为基础,以流率、密度和速度等为依据制定了六级人行道服务水平评价标准,但忽略了道路条件、环境条件以及行人心理感受等关键因素。F. Jaskiewicz 等^[16]虽从出行质量角度探讨了道路环境的影响,但评价指标体系仍缺乏对人行道设施条件的系统考量。对此,美国《道路通行能力手册》(Highway Capacity Manual, HCM)2010年版^[17]引入步行舒适度与安全感的满意度评分,改进了服务水平分级方法。然而后续研究表明,城市道路人行道很少出现HCM定义中的C级及以下服务水平(该标准更适用于枢纽等密集且封闭的环境)^[18-21],难以有效评估普通城市道路非连续流人行道设施的实际服务水平。此外,现有研究在以下方面仍存在不足:不同年龄、性别使用者在不同人行道宽度上的行为差异研究,年龄、性别因素对人行道服务水平分级的影响机制研究,考虑行人特征及步行品质的人行道设计方法研究等。

为提升步行交通品质,打造更人性化的街道公共空间,促进全龄友好城市建设,本文以人行道宽度为切入点,通过实地调查城市道路不同人行道宽度的步行特征,采集不同年龄、性别行人的流量,人均占用空间(Per-person Occupation Space, POS)和速度,探究不同年龄、性别行人的步行特征差异,构建适应各类行人特征的人行道服务水平评价标准,并给出多元需求下的人行道宽度设计建议。

1 数据采集

本文选取上海市中心城区9条城市道路人行道作为观测点,在2019年5月工作日的晚高峰时段通过拍摄视频采集行人流量、POS和步行速度数据,并记录行人年龄和性别特征。观测点选取标准如下:1)具备独立、连续的步行通道(不小于1 m);2)与非机动车停车带至少划线隔离,与机动车停车带、非机动车道物理隔离;3)位于居民日常生活密集区域;4)与道路交叉口、地块出入口、城市轨道交通车站及公共汽车站保持足够距离(不小于30 m),确保行人通行空间相对连续且不受干扰。如图1所示,观测区域纵向为固定长度5 m(为便于观测,将其均分为5段,每段1 m),横向宽度为实测有效通行宽度(去掉台阶、绿化、停车带等设施后的净宽)。

行人数据采集采用连续30 s间隔随机抽样法,每个采集时段随机选取6名行人作为样本。样本涵盖老年(≥60岁)、壮年(18~59岁)、少年儿童(≤17岁)3个年龄段,且男女各半,年龄和性别主要通过外貌判别。研究共获取有效样本16 820个。行人步行轨迹呈现非线性特征,包括避让、超越、徘徊等行为以及驻足交谈、打电话、照顾儿童等活动。

2 指标选取

1) 步行速度。

逐帧回放视频并分别记录行人进出观测区域的时刻,计算时间差值进而得到行程时间,以此得出精确到0.04 s的步行速度(视频码率25帧·s⁻¹)。步行速度计算公式为

$$v = 125 / (f_{\beta} - f_{\alpha}),$$

式中: v 为行人步行速度/(km·h⁻¹); f_{β} 为行人离开观测区域时的帧数值; f_{α} 为行人进

入观测区域时的帧数值。

2) 人均占用空间。

通过人均占用空间表征人行道上的行人密度,即观测区域面积与观测区域内行人数量之比。每秒拍摄一张快照记录观测区域内行人数量,再计算连续5 s的平均值,计算公式为

$$POS=A/P,$$

$$A=5 \times W,$$

$$P=(p_1+p_2+p_3+p_4+p_5)/5,$$

式中: POS 为人均占用空间/($\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$); A 为观测区域面积/ m^2 ; P 为5 s内行人数量的均值/人; W 为测试区的实际宽度/m; p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 分别为每张快照内观测区域的行人数量/人。

3) 行人流量。

将观测区域的纵向中点连接线作为观测断面,以双向(来向和去向)的流量之和作为观测断面的行人流量。以30 s为统计时段,再将结果转化为小时行人流量。由于观测的人行道宽度不同,但行人交通流特征研究需在统一尺度下进行,因此采用单位宽度(每米)的小时通过量作为行人流量指标,即

$$Q=120q/W,$$

式中: Q 为单位距离和时间的行人流量/(人次· $\text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); q 为统计时段的行人流量/(人次·(30 s) $^{-1}$)。

3 行人步行特征分析

3.1 步行速度

人行道的实测步行速度为 $4.60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,与香港室外步行道^[13]的步行速度均值 $4.66 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以及日本步行道^[22]在良好天气下的步行速度均值 $4.68 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 接近,证明观测数据的有效性。

采用闵可夫斯基距离(Minkowski Distance)量化不同人行道宽度条件下行人步行速度的年龄及性别差异。该方法适用于类域交叉或重叠显著的样本分类场景。选取步行速度的均值、方差和十分位数作为分类参数,在标准化处理后求各指标间的不相似性,计算公式为

$$d_{ij}(n)=\left(\sum_{k=1}^l |x_{ik}-x_{jk}|^n\right)^{1/n},$$

式中: d_{ij} 为速度 i 和 j 之间的闵可夫斯基距离/m; n 为计算阶数,反复试验后 n 取4,在欧式距离($n=2$)的基础上放大指标间的差

异,同时相比切比雪夫距离($n \rightarrow \infty$)不忽略其他所有指标; k 为每个速度的特征维度; l 为总维度数,均值、方差和十分位数共11个分类参数, $l=11$; x 为速度参数,即某类人群相应特征维度的速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。

基于闵可夫斯基距离分析不同人行道宽度条件下行人步行速度的年龄与性别差异(见图2),图中数值1~5为闵可夫斯基距离,在特定人行道宽度(外圈数值)条件下,距离值越大表示对比对象与本图参照对象的速度不相似性越大。结果显示:1)同年龄段内性别差异较小,老年(图2a和图2b)、壮年(图2c和图2d)及少年儿童群体(图2e和图2f)中男性与女性的速度分布最为接近,但少年儿童群体的波动性显著;2)年龄差异显著,整体上壮年与少年儿童、老年群体间存在明显速度差异。鉴于性别对步行速度影响较弱,后续分析中将同年龄段的男女样本合并处理。

不同人行道宽度条件下,各年龄段行人的步行速度存在显著差异(见图3)。首先,少年儿童平均步行速度为 $4.85 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,普遍高于壮年群体,且其标准差最大。少年儿童在人行道上不仅以惯性匀速前进,还常伴有追逐嬉闹、跑跳玩耍、迂回逗留等多样化活动。其次,与HCM及中国既往研究^[23]的结论不同,本文研究发现老年人平均步行速度为 $4.99 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,甚至高于壮年群体。可能的原因主要有两方面:一方面,当代老年人身体素质和平均寿命显著提高,步行能力与年轻群体相比并不逊色;另一方面,老年人使用人行道的目的更加多样,如买菜、锻炼、接送小孩上下学等活动日益普遍,而其中锻炼和接送行为往往伴随着较快的步行速度。最后,壮年群体的平均步行速度最低($3.96 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),且标准差较小,表明该群体

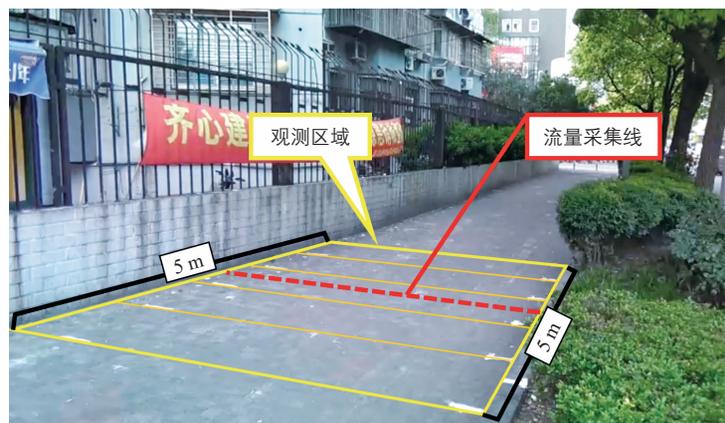


图1 观测区域示例

Fig.1 Example of the observation area

的步行行为差异较小。

人行道宽度与步行速度的关系分析表明：1.5 m宽度对应的行人步行速度普遍较高。由于空间受限、自由度较低，行人倾向于快速通过。2.0 m与2.5 m宽度下，各年龄段的步行速度相近，且处于相应年龄段的中低水平。3.0 m及以上宽度时，不同年龄段的步行速度差异增大。老年和少年儿童群体在3.0~5.0 m宽度范围内的步行速度相近，且处于各自年龄段的中高水平。壮年群体在3.0~4.0 m宽度范围内的步行速度处于中高水平；随着人行道宽度进一步增至4.5 m和5.0 m时，步行速度反而降低，一定程度表明4 m及以下宽度能满足基本通行需求，超过4 m时步行自由度增加，行人可能因缺乏紧迫感而降低步速。

3.2 人均占用空间

采用闵可夫斯基距离衡量不同人行道宽度条件下各群体的 POS 差异(见图4)，图中数值1~5为闵可夫斯基距离，在特定人行道宽度(外圈数值)条件下，距离值越大表示对比对象与本图参照对象的 POS 不相似性越大。同一年龄段内，男性与女性 POS 差异较小，表明性别不是影响 POS 的主要因素，因此后续分析中将同一年龄段的男女数据合并处理。

统计3个年龄段行人的 POS 累计百分比(见图5)，发现老年和壮年群体的 POS 分

布规律相近，少年儿童群体的 POS 整体偏小。一方面少年儿童较少独自长时间出现在观测区域内，例如幼儿由成人陪伴，学生成群结伴或有家长陪同；另一方面，在步行活动中未成年人的空间独立意识与边界感知相对较弱。

在不同人行道宽度条件下，将3个年龄段行人的步行速度与 POS 的关系进行多项式拟合分析(见图6)，结果显示 R^2 值均小于0.1，说明与机动车流特征不同，行人步行速度与 POS 之间不存在显著相关性。具体表现为：老年和壮年群体的步行速度随 POS 增加呈现先下降后趋于平稳的趋势；少年儿童群体的步行速度与 POS 关系的规律性较弱。值得注意的是，在 $POS \leq 10 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ (1.5 m宽人行道对应 $POS \leq 5 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$) 时，人行道宽度对步行速度与 POS 关系的影响较大：在1.5 m宽度条件下，行人因空间受限被迫排队快速通过，步行速度相对较高；2.0~2.5 m宽度时，速度处于中等水平，行人仍受限空间而需保持快速行进；3.0~4.0 m宽度提供了适度自由度，步行速度升高；4.5~5.0 m宽度时，由于空间自由度最大，步行速度呈现高低不一的特点。

3.3 行人流量

统计不同人行道宽度条件下单位距离和时间的行人流量并做累计百分比(见图7)，研究发现：1.5 m宽人行道的最大行人流量

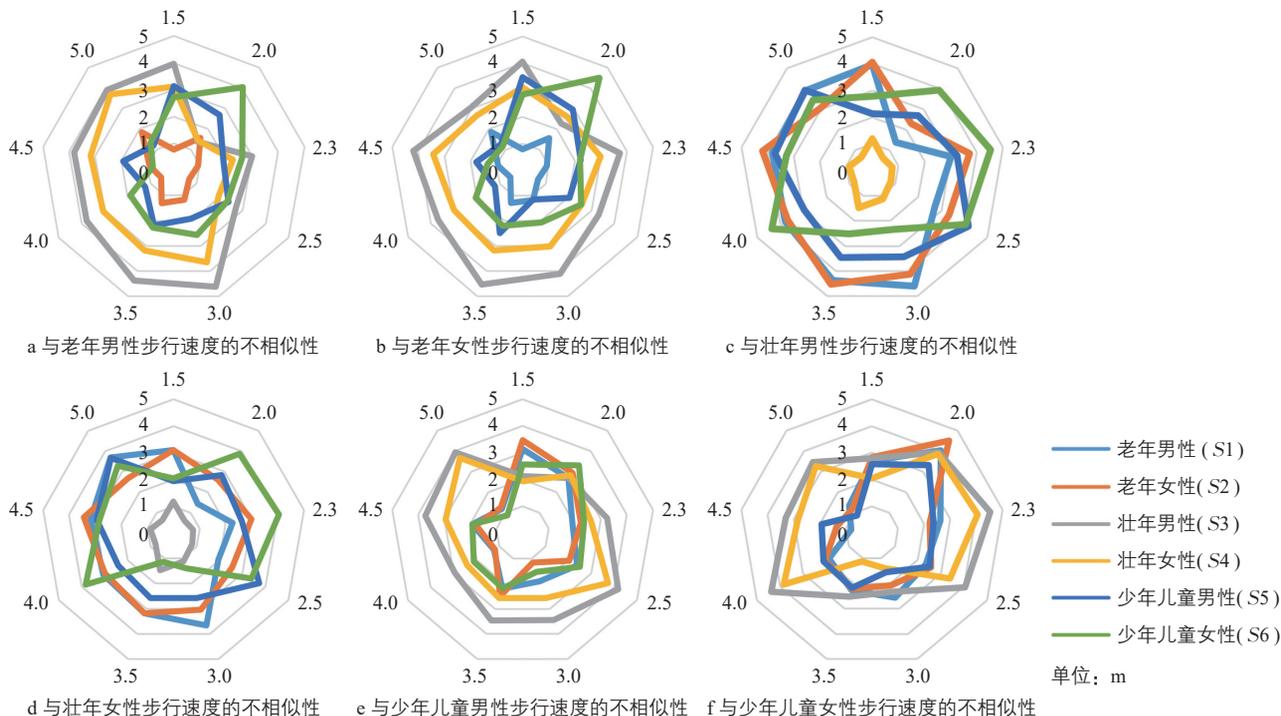


图2 基于闵可夫斯基距离分析不同人行道宽度条件下行人步行速度的群体差异

Fig.2 Pedestrian walking speed group differences under different sidewalk widths based on Minkowski distance

达到2 000 人次·m⁻¹·h⁻¹，该数值与《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)三级服务水平的每米通行能力标准以及《城市步行和自行车交通系统规划标准》(GB/T 51439—2021)中每0.75 m宽的人行道设计通行能力相当；而随着人行道宽度增加，实测最大单位距离和时间的行人流量为1 000 人次·m⁻¹·h⁻¹，仅达到《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)一级服务水平的每米通行能力标准。这一结果验证了文献^[18-21]关于“城市道路人行道较少能达到高密度流量，也很少出现规范标准的中等及以下服务水平”的结论。基于上述发现，本文将进一步研究人行道的实际单位宽度通行能力特征，并探寻适应各类

群体步行需求特征的人行道服务水平分级方法。

对不同人行道宽度条件下单位距离和时间的行人流量与POS关系进行多项式拟合分析(见图8)，结果显示R²值均小于0.6，表明行人流量与POS之间不存在显著相关性。研究发现，随着行人流量的增加，不同人行道宽度的POS均呈现先匀速下降后趋于平缓的变化趋势，揭示了行人流具有可压缩性。值得注意的是，POS大于行人实际占用面积^[24]，说明行人之间存在可接受社会空间距离。

在不同人行道宽度条件下，对3个年龄段单位距离和时间的行人流量与步行速度关

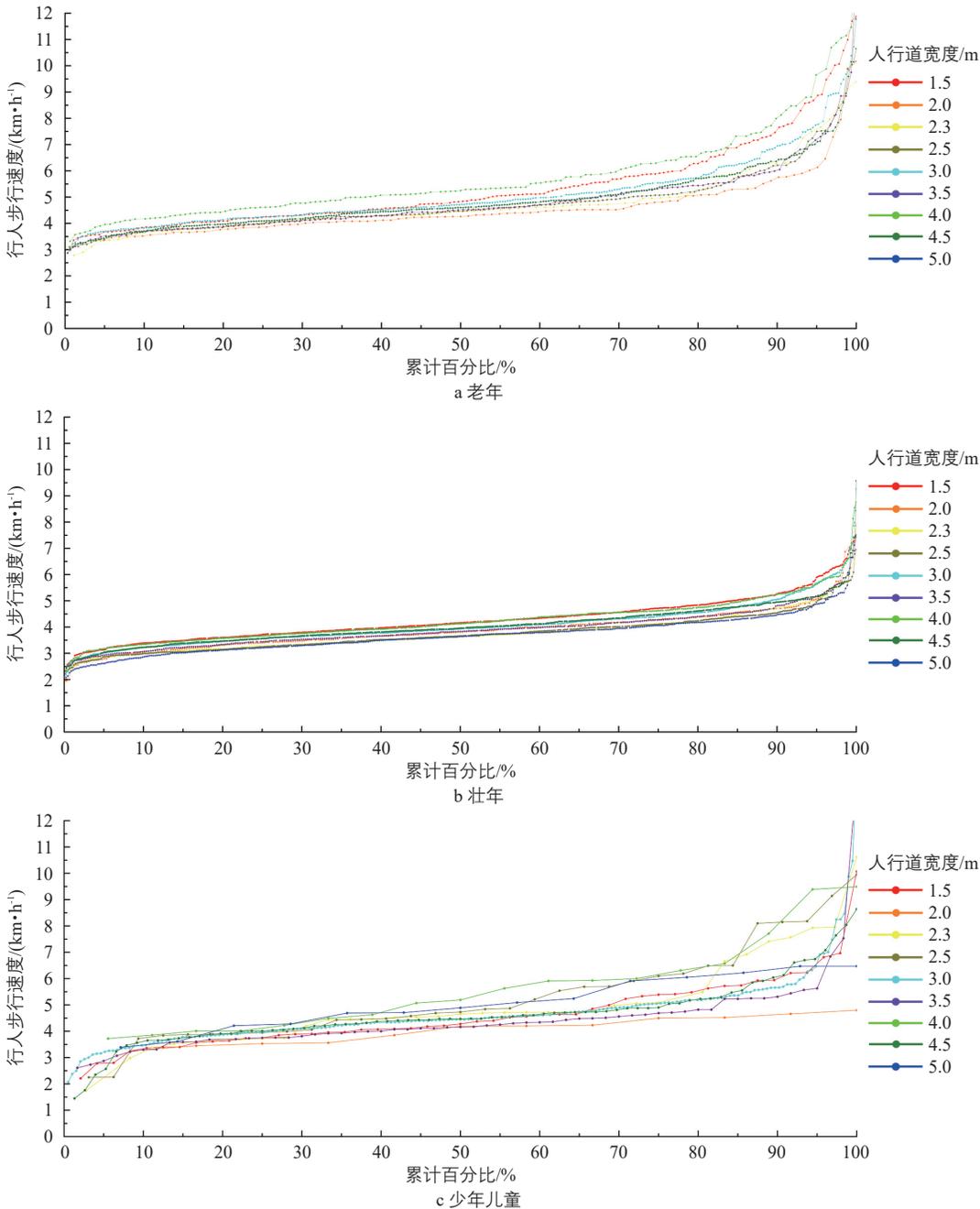


图3 不同人行道宽度条件下行人步行速度累计百分比的群体差异

Fig.3 Group differences in cumulative percentage of pedestrian walking speed under different sidewalk widths

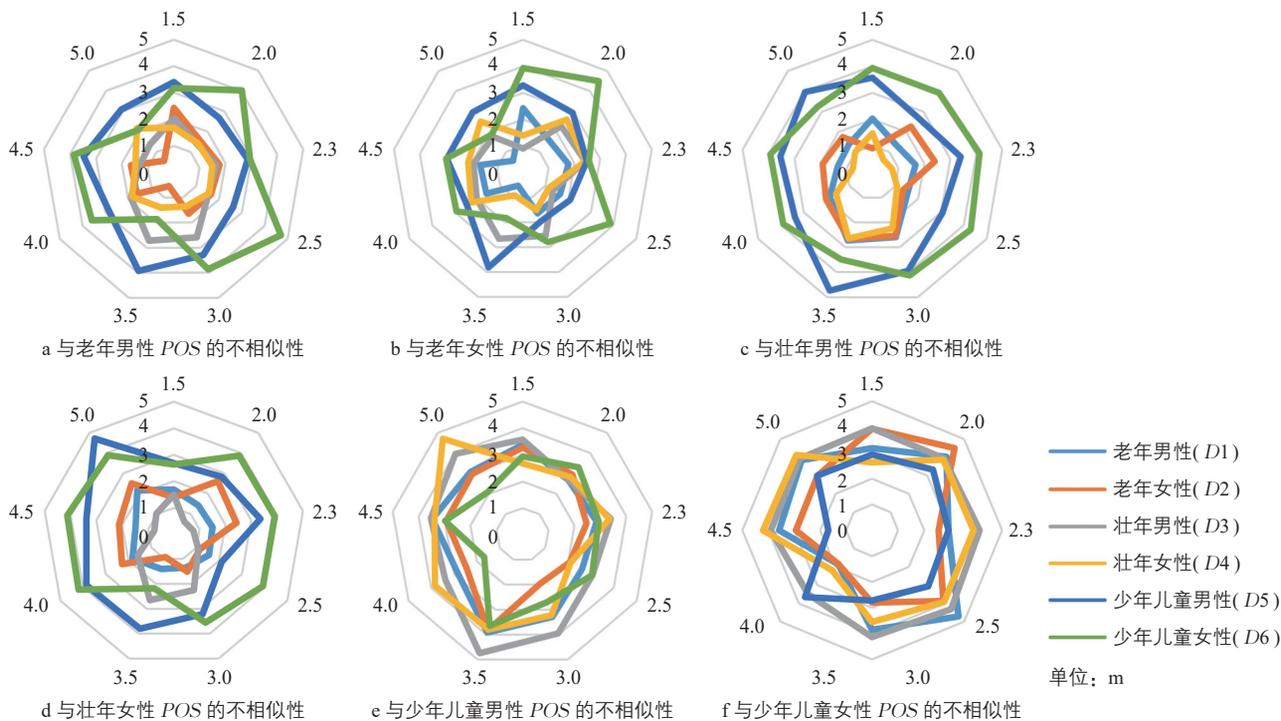


图4 基于闵可夫斯基距离分析不同人行道宽度条件下各群体的 POS 差异

Fig.4 POS differences among different groups under different sidewalk widths based on Minkowski distance

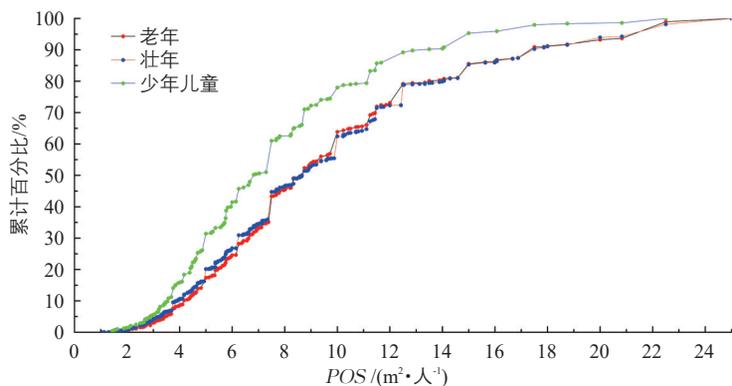


图5 不同年龄段行人 POS 累计百分比

Fig.5 Cumulative percentage of POS of different age groups

系进行多项式拟合分析(见图9), 结果显示 R^2 值均小于0.2, 表明行人流量与步行速度之间相关性较弱。具体表现为: 老年群体步行速度随单位距离和时间的行人流量增加呈现先升高后降低的趋势; 少年儿童群体步行速度与单位距离和时间的行人流量关系的离散程度较高, 反映出该群体步行行为自由度高, 行人流量对步行速度的影响具有较强的随机性; 壮年群体步行速度受行人流量的影响相对较小, 稳定性较高。进一步分析发现, 人行道宽度 ≥ 3 m时, 行人流量增加会促使步行速度提升; 人行道宽度 < 3 m时, 行人流量增加则导致速度下降。这一现象说明, 较窄的人行道在大流量情况下难以形成快速通过的列队交通流。

4 人行道宽度聚类与服务水平评价

4.1 人行道宽度聚类

根据行人步行特征, 利用K-means聚类法对标准化处理后的单位距离和时间的行人流量和 POS 指标进行聚类分析, 最终将人行道宽度划分为3个典型分组: 1.5 m, 2.0~3.0 m和3.5~5.0 m。

图10为三组人行道宽度条件下各年龄段行人流量与 POS 的多项式拟合关系, 图11为步行速度与 POS 的多项式拟合关系。三组人行道宽度的 POS 分布区间存在显著差异, 表现为宽度越大, POS 越高, 对应的最大单位距离和时间的行人流量越小而最大步行速度越大; 在各组人行道宽度内部, 老年、壮年与少年儿童群体的特征各不相同。这一结果表明, 人行道宽度是影响 POS 的首要因素, 而年龄因素次之。

4.2 考虑人行道宽度的服务水平分级

选取 POS 作为表征人行道服务水平的关键指标。影响因素按显著程度由高到低依次为: 人行道宽度、年龄、单位距离和时间的行人流量。效应表征采用两个核心指标: 人行道实际最大瞬时流率和步行速度。基于人行道宽度聚类(< 2 m, $2\sim 3$ m和 $> 3\sim 5$ m 3个分组), 对各年龄段行人制定差异化的人行道服务水平分级标准(见表1~3)。服务水平

划分为A~F六级，POS 阈值取由小到大排列的第90，70，50，30，10分位数。为剔除极端值影响，单位距离和时间的行人流量与步行速度均取第5，95分位数作为最小、最大值。实际最大瞬时流率用于表征各组人行道宽度的实际瞬时最大流量水平，计算公

式为

$$Q_{\max} = 120q' \times W_{\max}$$

式中： Q_{\max} 为实际最大瞬时流率/(人次·h⁻¹)； q' 为单位距离统计时段的行人流量/(人次·m⁻¹·30 s⁻¹)； W_{\max} 为每组人行道的最大宽度/m。

A~F 级服务水平分级标准及其运行特征

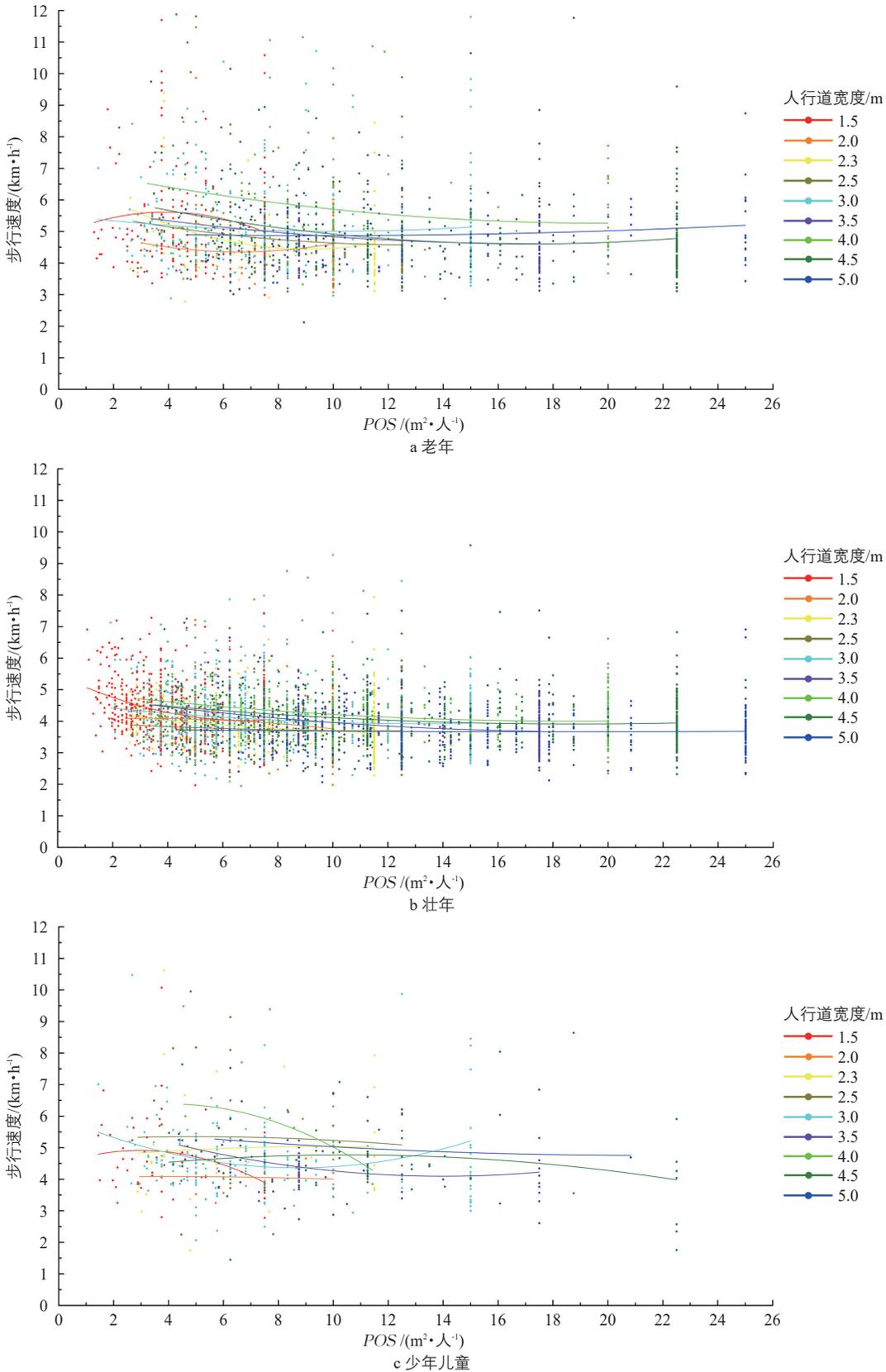


图6 不同人行道宽度条件下各年龄段行人的步行速度与 POS 关系的拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of the relationship between walking speed and POS of pedestrians at all ages under different sidewalk width groups

如下：A级，行人活动完全自由，按自由速度行走，舒适度最佳；B级，行人活动基本自由，基本按自由速度行走，舒适度良好；C级，行人活动出现轻微限制，步行速度开始降低，舒适度较好；D级，行人活动受到明显限制，步行速度和超越行为受限，舒适度尚可接受；E级，行人活动显著受限，步行速度明显降低，出现列队行进现象，舒适度较差；F级，行人活动严重受限，速度大幅降低，强制列队行进，舒适度最差。

在相同服务水平下，人行道宽度越大、POS 也越大。当服务水平和人行道宽度相同时，不同年龄段的 POS 存在显著差异：老年与壮年群体的 POS 相近，且普遍高于少年儿童群体。由于 POS 与行人流量的相关性较弱，单位距离和时间的行人流量呈现相互重叠的范围值，且在总体趋势上随服务水平下降而上升。实际最大瞬时流率在 F 级服务平时均达到最大值，此时行人主要以列队方式行进。当人行道宽度为 <2 m 和 2~3 m 时，最大瞬时流率约为 3 000 人次·h⁻¹，但两

者的区别在于：宽度 <2 m 的人行道 POS 普遍较小而步行速度较大，说明该宽度虽然能满足基本通行需求，但无法满足舒适性要求；只有当人行道宽度达到 3~5 m 时，才能实现 3 000 人次·h⁻¹ 的瞬时流率，这表明宽度 <3 m 的人行道难以满足实际流量超过 3 000 人次·h⁻¹ 的需求。

随着服务水平下降，各年龄段的步行速度总体呈上升趋势，行人状态逐渐从自由行走转变为被迫列队行进。在 A~C 级服务水平情况下，随着人行道宽度增加，老年和壮年群体的步行速度下降，但活动自由度逐渐提高。从 D 级服务水平开始，人行道宽度对步行速度变化的影响逐渐减弱。在 E 级服务水平情况下，前后行走的成年行人之间的头顶距离和足间距离分别小于 1.6 m 和 0.8 m^[24]，此时 POS 接近实测行人间社会空间距离的最小值。因此，到 E 级和 F 级时，在相同人行道宽度条件下，各年龄段的步行速度下限趋于接近，行人以列队方式行进；然而，老年和少年儿童群体的步行速度上限明显提高，这表明在高密度行人流中，壮年群体的接受度更高，更倾向于跟随队伍行进，而老年和少年儿童群体的接受度较低，更倾向于快速超越。

5 人行道宽度设计建议

基于对人行道步行特征及服务水平的研究，本文提出适应步行交通品质提升要求的人行道宽度精细化设计建议。

1) 对于宽度 <2 m 的人行道，行人超越和并行行为较为受限，在人行道规划设计时建议尽量避免使用此宽度。这类人行道仅能满足基本通行需求，舒适性较差，因此在行人流量需求 ≥2 000 人次·h⁻¹ (对应各年龄段 E 级服务水平) 的情况下，应尽量避免采用人行道宽度 <2 m 的设计。

2) 宽度为 2~3 m 的人行道可满足最大瞬时流率 3 000 人次·h⁻¹ (对应各年龄段 E 级服务水平) 的通行需求。然而，最大瞬时流率对应的 POS 不宜作为人行道设计标准，因此当行人流量需求 >3 000 人次·h⁻¹ 时，建议将人行道宽度设置为 >3 m。

3) 当行人流量需求 >2 400 人次·h⁻¹ (对应各年龄段 C/D 级服务水平) 时，人行道宽度需 >4 m 才能满足舒适性要求。在此条件下，步行有一定活动自由度，步行速度也呈现相对多样化的特征。

4) 针对地铁车站、多条公共汽车线路

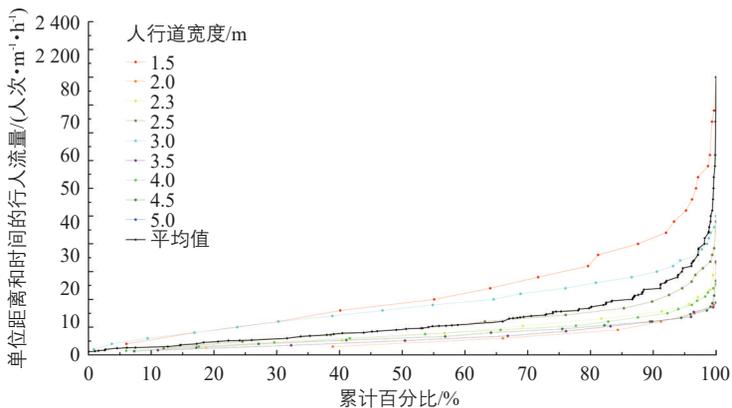


图7 不同人行道宽度条件下的单位距离和时间的行人流量累计百分比
Fig.7 Cumulative percentage of hourly flow per meter under different sidewalk width groups

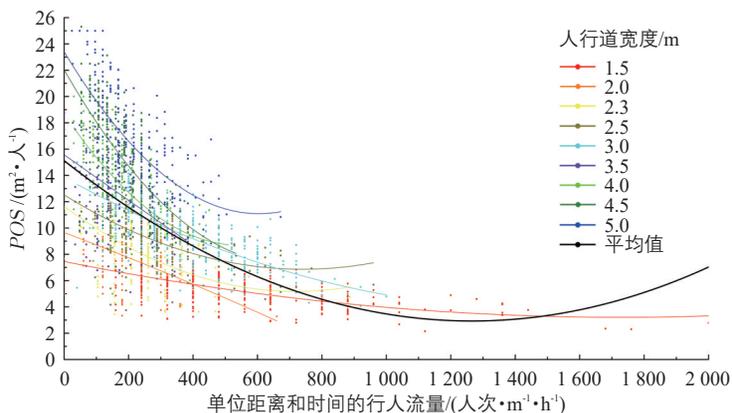


图8 不同人行道宽度条件下单位距离和时间的行人流量与 POS 关系的拟合曲线
Fig.8 Fitting curves of pedestrian flow per unit distance and time with POS under different sidewalk widths

交汇的车站等大客流集中区域的人行道设计，应以满足通行需求为主要目标。通过对比壮年群体在三组不同人行道宽度条件下C级和D级服务水平的运行特征，建议人行道宽度应 $>3\text{ m}$ 。

5) 对于居住小区、街坊等需要兼顾通行与休闲功能的人行道，其宽度设计应优先保障老年和少年儿童群体的步行品质。在A级和B级服务水平(行人流量 $\leq 1\,440\text{ 人次}\cdot\text{h}^{-1}$)时，行人活动相对自由，建议人行道宽度采

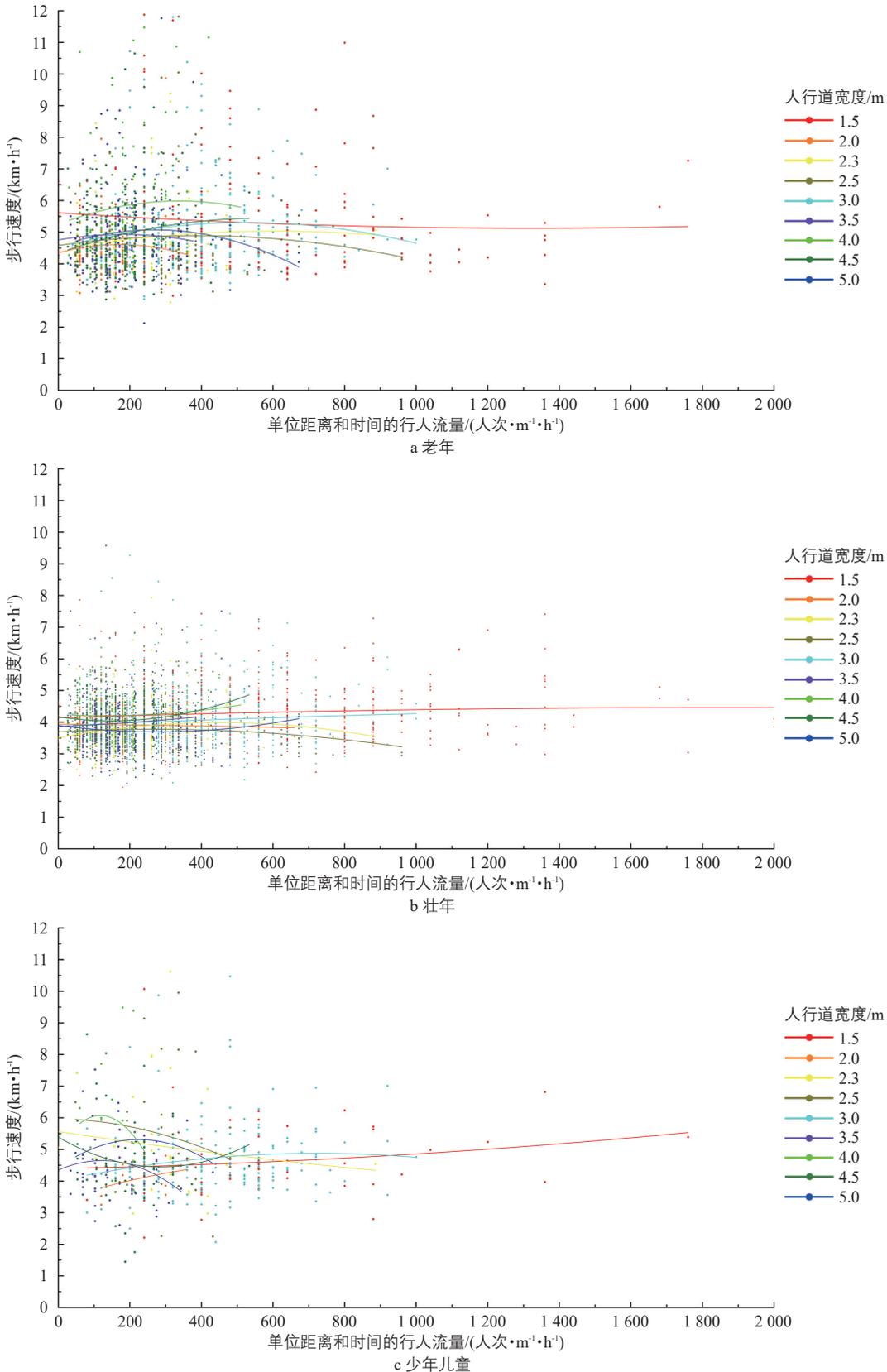


图9 不同人行道宽度条件下各年龄段单位距离和时间的行人流量与步行速度关系的拟合曲线

Fig.9 Fitting curves of pedestrian flow and walking speed per unit distance and time at different ages under different sidewalk widths

用2~3 m；当行人流量上升至1 440~1 920人次·h⁻¹(对应各年龄段C级和D级服务水平)时，3~5 m的宽度可满足基本步行需求；当行人流量≥3 360人次·h⁻¹(对应各年龄段3~5 m人行道宽度的最大瞬时流率)时，则应确保人行道宽度≥5 m。

6) 针对少年儿童群体较多的人行道，设计时应充分考虑其行为特征和活动需求，不宜单纯依据行人流量指标确定人行道宽

度。当人行道宽度<2 m时，从C级服务水平开始，单位距离和时间的行人流量会出现剧烈波动，且速度趋于一致，这将严重限制少年儿童的活动空间；当人行道宽度为2~3 m时，行人流运行特征趋于稳定，能够基本满足少年儿童的通行需求；当人行道宽度达到3~5 m时，单位距离和时间的行人流量增长趋缓，步行速度分布呈现多元化特征，表明少年儿童可进行驻足玩耍、追赶跑跳等自由活动。

7) 人行道步行空间设计需与街道其他功能要素统筹考虑。具体而言：在大客流集散区域，应确保扣除公共汽车站台、非机动车停车区、交通设施后的净通行宽度；对于商业、餐饮、文化等沿街建筑，需将人行道与建筑前区一体化设计，在预留行人驻足空间和室外餐饮区域的同时保障通行功能；与绿化带、休憩节点及街角公园等要素衔接时，需注意这些空间不计入人行道有效通行宽度；此外，应结合行道树的冠幅尺寸和种植间距合理确定人行道宽度，以满足遮阳挡雨等功能需求。

8) 人行道的空间设计应保持适度弹

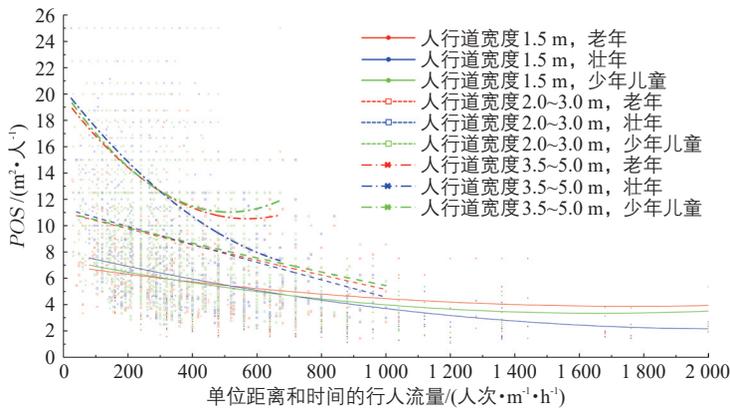


图10 三组人行道宽度条件下的单位距离和时间的行人流量与 POS 关系的拟合曲线

Fig.10 Fitting curves of pedestrian flow per unit distance and time with POS under three groups of sidewalk widths

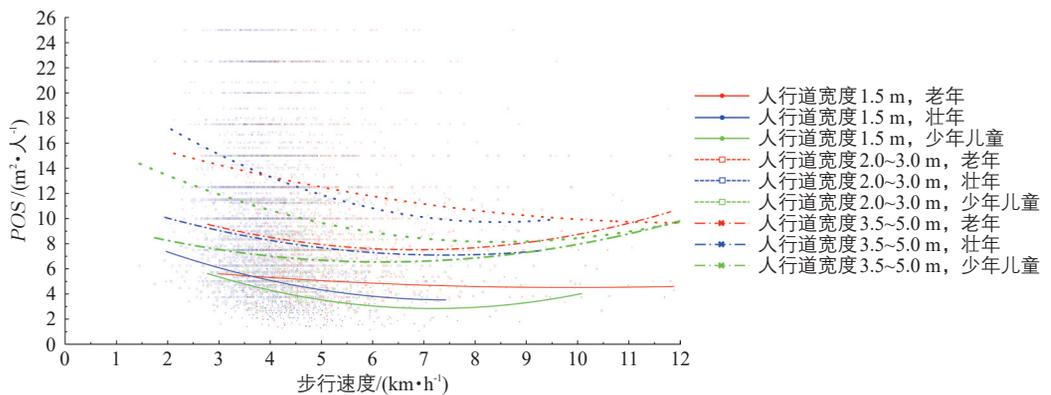


图11 三组人行道宽度条件下步行速度与 POS 关系的拟合曲线

Fig.11 Fitting curves of the relationship between walking speed and POS under three groups of sidewalk width

表1 适应老年群体步行特征的人行道服务水平分级

Tab.1 Division of pedestrian service level adapted to the walking characteristics of the elderly group

划分依据	POS / (m ² ·人 ⁻¹)			单位距离和时间的行人流量 / (人次·m ⁻¹ ·h ⁻¹)			实际最大瞬时流率 / (人次·h ⁻¹)			步行速度 / (km·h ⁻¹)		
	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5
人行道宽度/m	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5
A级	>7.21	>12.68	>21.77	80~880	40~400	27~267	1 512	1 920	1 333	3.63~7.45	3.56~7.71	3.43~6.98
B级	6.62~7.21	10.60~12.68	17.19~21.77	112~1 008	144~434	30~311	1 829	2 016	2 100	3.68~7.81	3.34~6.92	3.47~6.98
C级	4.98~6.62	8.44~10.60	12.63~17.19	160~1 040	60~520	60~336	2 040	2 520	2 202	3.76~8.71	3.58~7.75	3.54~7.03
D级	3.62~4.98	5.99~8.44	9.41~12.63	240~1 040	96~640	69~384	2 160	2 880	2 667	3.62~7.04	3.56~6.37	3.61~7.17
E级	2.42~3.62	4.36~5.99	6.77~9.41	240~1 348	120~720	69~388	3 000	3 000	3 360	3.62~5.85	3.69~7.51	3.65~8.48
F级	<2.42	<4.36	<6.77	364~1 680	181~768	92~420	3 000	3 000	2 550	4.09~8.41	3.77~7.89	4.08~8.64

表2 适应壮年群体步行特征的人行道服务水平分级

Tab.2 Division of pedestrian service level adapted to the walking characteristics of the middle-aged group

划分依据	POS / (m ² ·人 ⁻¹)			单位距离和时间的行人流量 / (人次·m ⁻¹ ·h ⁻¹)			实际最大瞬时流率 / (人次·h ⁻¹)			步行速度 / (km·h ⁻¹)		
	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5
人行道宽度/m	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5
A级	≥7.24	≥12.67	≥21.98	80~560	40~440	53~288	1 200	1 680	1 920	3.07~4.90	2.95~5.05	2.98~5.01
B级	6.72~7.24	10.72~12.67	18.43~21.98	160~800	48~480	60~326	1 800	2 160	1 982	3.07~5.23	2.80~5.07	2.85~4.94
C级	4.87~6.72	8.54~10.72	13.22~18.43	240~884	60~480	69~316	2 040	2 400	2 400	3.12~5.41	2.96~5.35	2.80~5.02
D级	3.53~4.87	6.15~8.54	9.95~13.22	320~988	144~627	80~360	2 040	2 520	2 400	3.13~5.63	2.91~5.29	2.91~5.30
E级	2.40~3.53	4.35~6.15	7.00~9.95	380~1 220	104~694	103~384	3 000	2 880	2 520	3.46~5.96	2.90~5.51	3.01~5.38
F级	<2.40	<4.35	<7.00	468~1 760	192~800	137~480	3 000	3 000	3 360	3.76~6.35	3.01~5.73	3.14~5.86

表3 适应少年儿童群体步行特征的人行道服务水平分级

Tab.3 Division of pedestrian service level adapted to the walking characteristics of children group

划分依据	POS / (m ² ·人 ⁻¹)			单位距离和时间的行人流量 / (人次·m ⁻¹ ·h ⁻¹)			实际最大瞬时流率 / (人次·h ⁻¹)			步行速度 / (km·h ⁻¹)		
	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5
人行道宽度/m	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5	<2	2~3	>3~5
A级	>6.86	>12.56	>19.39	80~720	80~440	53~312	1 200	1 920	1 560	3.02~5.14	3.19~9.38	2.32~6.93
B级	5.36~6.86	9.39~23.56	15.07~19.39	160~800	50~480	60~330	2 040	2 016	1 800	3.49~5.87	3.12~6.40	3.56~6.27
C级	4.20~5.36	7.79~9.39	11.69~15.07	284~1040	60~520	60~341	3 000	2 304	2 400	3.12~6.59	3.77~6.98	3.40~6.72
D级	3.10~4.20	5.74~7.79	8.86~11.69	121~1 068	120~640	60~360	2 640	3 000	2 520	3.81~5.94	3.02~5.97	3.56~6.46
E级	2.16~1.80	4.08~5.74	6.43~8.86	320~1 360	120~720	69~371	2 520	3 000	2 550	3.43~5.26	3.68~8.02	3.36~7.24
F级	<1.80	<4.08	<6.43	336~1 424	792~800	120~456	3 000	2 880	3 360	4.18~6.65	3.54~7.00	4.46~8.10

性，以适应使用功能的灵活转换和时空需求变化。具体而言：学校周边的学径可在不同时段分别满足少年儿童群体通学、壮年群体通勤、老年群体买菜以及周末健身等多样化需求；地铁站、大型公共交通枢纽等大客流区域的人行道可实现昼夜功能转换，白天承担客流集散功能，夜晚则可作为便民市集使用；白天用于机动车和非机动车停放的区域，夜晚可转变为居民休闲活动空间。

6 结论

基于不同年龄、性别行人的步行特征，本文开展了人行道服务水平分级标准及宽度设计方法的实证研究，主要结论如下：

1) 人行道的行人流量和 POS 与步行速度的相关性较弱，行人流呈现显著的可压缩性特征；老年、壮年、少年儿童群体的步行特征差异明显，同年龄段内不同性别行人的步行特征差异较小。

2) 人行道宽度是影响 POS 的首要因素，年龄因素次之。人行道宽度与 POS 呈正相关关系，与最大单位距离和时间的行人

流量呈负相关关系。选取 POS 作为表征人行道服务水平的关键指标，按照 <2 m，2~3 m 和 >3~5 m 3 个人行道宽度进行分组，分别针对老年、壮年、少年儿童群体提出 A~F 级人行道服务水平量化指标。

3) 基于服务水平分级和步行特征研究，综合考虑应用场景、使用人群、活动类型和流量需求，提出人行道宽度精细化设计建议，为居民提供多元化、高品质的步行设施。

参考文献：

References:

[1] 陈小鸿, 崔扬, 王婷, 等. 交通出行提质推动城市转型升级: 中国城市交通发展论坛第 34 次研讨会 [J]. 城市交通, 2024, 22(1): 107-123.
CHEN X H, CUI Y, WANG T, et al. Enhancing urban transformation and upgrading through quality improvement in transportation: debrief of the 34th Urban Transportation Development Forum in China [J]. Urban transport of China, 2024, 22(1): 107-123.

[2] WU J R, YE J H, CHEN X. Service level anal-

- ysis of exhibition halls for large-scale activities [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2007, 35(6): 850-855.
- [3] WU J R, FENG J D, LU S G. Research on pedestrians' overtaking behavior in passageway [J]. Journal of Tongji University, 2012, 40(2): 228-234.
- [4] ZHOU J B, HONG C, YAN B, et al. Pedestrian traffic characteristics analysis in the metro transfer hub[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(4): 92-99.
- [5] YE J, CHEN X. Applicability analysis of tri-parametric fundamental equations for pedestrian traffic flow[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(1): 138-144.
- [6] 任福田, 刘小明, 荣建, 等. 交通工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 318-319.
- REN F T, LIU X M, RONG J, et al. The traffic engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 318-319.
- [7] 陈然, 董力耘. 中国大都市行人交通特征的实测和初步分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2005, 11(1): 93-97.
- CHEN R, DONG L Y. Observations and preliminary analysis of characteristics of pedestrian traffic in Chinese metropolis[J]. Journal of Shanghai University (natural science), 2005, 11(1): 93-97.
- [8] SHARIFI M S, DAN S, CHRISTIANSEN K, et al. Analysis of walking speeds involving individuals with disabilities in different indoor walking environments[J]. Journal of urban planning and development, 2015, 142(1): 04015010.
- [9] YE J, CHEN X, JIAN N. Impact analysis of luggage-carrying on pedestrian traffic[J]. Fire safety journal, 2012, 52: 46-54.
- [10] WU H L, YUAN Z Z, et al. A capacity simulation model of stairway in subway station considering pedestrian heterogeneity[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2016, 16(3): 141-147.
- [11] University of California. Why older adults don't walk: safer designs could encourage more pedestrian trips[J]. Traffic safety center newsletter, 2002, 1(1): 9-10.
- [12] POLUS A, SCHOFER J L, USHPIZ A. Pedestrian flow and level of service[J]. Journal of transportation engineering, 1983, 109(1): 46-56.
- [13] LAM W H K. Pedestrian speed/flow relationships for walking facilities in Hong Kong[J]. Journal of transportation engineering, 2000, 126(4): 343-349.
- [14] 周梦茹, 魏寒宾, 边兰春. 街道空间步行环境测评研究: 以北京什刹海历史文化街区为例[J]. 上海城市规划, 2021(3): 74-80.
- ZHOU M R, WEI H B, BIAN L C. Research on evaluation of walking environment on streets: a case study of Shichahai historic scenic area[J]. Shanghai urban planning review, 2021(3): 74-80.
- [15] FRUIN J J. Pedestrian planning and design [R]. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.
- [16] JASKIEWICZ F, JACKSON G, ANGLIN K, et al. Pedestrian level of service based on trip quality[J]. Transportation research circular, 2000(501): G1/1-G1/14.
- [17] Transportation Research Board. Highway capacity manual[M]. Washington DC: National Research Council, 2010.
- [18] 边扬, 王伟, 陆建. 人行道行人服务水平评价方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007(4): 695-699.
- BIAN Y, WANG W, LU J. Pedestrian level of service for sidewalks[J]. Journal of Southeast University (natural science), 2007(4): 695-699.
- [19] 边扬, 高海龙, 王伟. 基于道路环境的人行道行人服务水平评价方法[J]. 公路交通科技, 2007(9): 136-139.
- BIAN Y, GAO H L, WANG W. Pedestrian service level at sidewalks based on road conditions[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2007(9): 136-139.
- [20] 赵琳, 边扬, 荣建, 等. 基于有序 Logistic 回归的城市人行道服务水平研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(4): 131-138.
- ZHAO L, BIAN Y, RONG J, et al. Pedestrian LOS of urban sidewalks based on orderly logistic regression[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2014, 14(4): 131-138.