

中国城市活力中心的街道步行环境指数测度*

Measurement of Street Walking Environment Index for Urban Vitality Centers in Chinese Cities

龙瀛¹, 李莉², 李双金³, 陈龙⁴, 潘支明⁵, 姚怡亭⁶, 陈鸣⁷,
王雅玲⁸, 权璟⁹, 张黎雪¹⁰, Cynthia Wang¹¹, 钱京京¹²

LONG Ying, LI Li, LI Shuang-jin, CHEN Long, PAN Zhi-ming, YAO Yi-ting, CHEN Ming,
WANG Ya-ling, QUAN Jing, ZHANG Li-xue, Cynthia WANG, QIAN Jing-jing

开放科学 (资源服务)

标识码 (OSID)



【本文引用格式】龙瀛, 李莉, 李双金, 等. 中国城市活力中心的街道步行环境指数测度 [J]. 南方建筑, 2021 (1): 114-120.

摘要 已有可步行性研究大多关注引发步行行为的建成环境特征, 而对影响步行体验的街道环境探讨较少。以城市空间为视角, 提出基于过街设施、街道绿化、沿街建筑宽高比、街道家具、机非隔离、步道宽度、占道停车、道路失修和专用自行车道等 9 项评价指标的步行环境评价方法。在中国 50 个典型城市的 71 个城市活力中心内, 结合街景影像与虚拟审计对总计 12740 条城市街道进行步行环境评价, 并剖析结果背后的现实问题、原因和对策。实证结果验证了评价指标体系的有效性和方法的可行性, 同时也明确了中国城市街道步行环境存在的问题, 为精细化规划和管理城市慢行交通系统提供思路和建议。

关键词 步行环境; 城市活力中心; 街景图片; 虚拟审计

ABSTRACT The existing studies concerning walkability mainly focus on the characteristics of the built environment that could encourage walking. However, few discussions have been reported regarding the influence of the street environment on walking experiences. In this study, a walking environmental assessment method was proposed, involving the nine indexes of crossing facilities, street planting, building aspect ratio, street furniture, isolation for non-motor vehicles, width of the sidewalk, illegal parking, sidewalk disrepair, and bike-exclusive lanes. This method was applied to evaluate the walking environment of 12,740 city streets in 71 urban vitality centres of 50 typical Chinese cities by combining street images and virtual audits. In addition, the practical problems, causes, and strategies behind the scores were analyzed. The empirical results validate the feasibility of the proposed method in revealing problems of the walking environment in Chinese cities. Research conclusions provide suggestions to refine urban planning and management of non-motorized traffic systems in cities.

KEY WORDS walking environment; urban vitality centre; street view picture; virtual auditing

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51778319): 中国收缩城市的精细化识别、空间表征与规划机制研究。

中图分类号 TU984.191

文献标志码 A

DOI 10.3969/j.issn.1000-0232.2021.01.114

文章编号 1000-0232 (2021) 01-0114-07

作者简介 ¹ 清华大学建筑学院、清华大学恒隆房地产研究中心、清华大学生态规划与绿色建筑教育部重点实验室, 研究员; ² 清华大学建筑学院, 研究助理; ³ 广岛大学, 博士研究生; ⁴ 清华大学建筑学院, 博士后, 通信作者, 电子邮箱: longchen0919@163.com; ⁵⁻¹² 自然资源保护协会, 研究员

引言

在过去的两年里, 中国政府愈加关注城市步行交通。快速城镇化带来了诸多的城市问题, 如快速机动化所导致的交通拥堵、越来越严峻的环境污染等, 城市慢行交通的空间和环境也同样面临挑战。与此同时, 随着人民

生活水平的提高和健康意识的增强, 日益形成的健康运动观念也对城市的街道环境提出了新要求。为了应对上述挑战, 我国政府颁布了一系列政策和标准, 如《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》^[1], 《步行和自行车交通系统规划设计

标准》^[2]，《2019年新型城镇化建设重点任务》^[3]等，旨在通过对城市慢行交通系统和基础设施的规划和设计，鼓励并促进绿色出行，从而提升城市环境和居民生活品质。

城市步行交通同样掀起了学术界的研究热潮，街道可步行性和街道环境的测度与评价受到越来越多的关注，尤其是大数据与互联网时代下出现的新技术与新方法，为城市步行交通的研究提供了新视野。Guan等^[4]从城市设计的视角出发，探讨了可步行城市的概念和其应具备的特征，并提出在算力提升和实证方法演进加持下，城市大数据在城市可步行性研究中的应用潜力。邓一凌等^[5]指出对可步行性的研究正在向关注步行环境质量和行人感受转变，其中以基于街景图片数据的步行环境评价为主要趋势。李智和龙瀛^[6]从城市空间的视角出发，通过识别腾讯街景图片中表征街道空间品质的要素，得到了齐齐哈尔市街道空间品质的评价结果与空间分布。甘欣悦等^[7]将机器学习模型引入到对街景图片的审计过程中，通过样本训练实现自动化识别表征空间特点的建成环境要素。

以城市步行交通为主题开展全面而系统的研究不但具有丰富的理论意义，尤其是探讨微观尺度建成环境与人的尺度时空行为的理论关系，更具有不可忽视的现实意义，为城市慢行交通规划与设计提供依据。然而，已有的步行交通研究多集中在对步行指数的测算，即关注可能诱发步行行为的建成环境特征要素，而对影响步行体验的街道环境探讨较少。本研究旨在提出城市街道步行环境的评价方法，构建步行环境评价指标体系，以街景影像数据为基础，采用虚拟审计的方法实现中国城市街道步行环境的大规模测度。

1 研究范围与方法

1.1 城市活力中心

城市中心区往往是步行交通相关研究的重点关注区域。一方面，已有研究普遍认为高密度的建成环境，较近的设施距离等要素会吸引和触发更多的步行行为，在城市中心区开展可步行性研究可以明确诱发步行行为的建成环境特征要素；另一方面，城市中心区承载了大量通勤、社交和生活相关的必须、必要的步行活动，是步行行为的高频率、高密度区域，对其展开步行环境的评价则是改善城市居民步行体验的必要前提。已有诸多学者对城市中心（副中心）的识别与划定展开了大量理论与实证研究，其中以就业人口的绝对密度（密度阈值）或相对密度（密度曲线）为依据的城市中心识别是应用最为广泛的方法^[8-10]。然而，Li等人^[11]指出，以就业密度高低定义的城市中心仅从经济活动的视角描绘了城市

的形态与结构，然而城市内的人类活动却更为丰富和多样，城市中心应被更全面的描述为城市居住（Live）、就业（Work）、和休闲（Play）中心（简称LWP中心）。LWP中心从3个不同的视角描绘城市中心的人口、活动和自然特征，充分体现城市中心的集聚性和多功能性。受LWP中心启发，本研究提出城市活力中心的概念：城市活力中心是城市生活、生产最密集的核心区，其在城市空间上具有布局紧凑、人口密度高、功能多样化等特点，也是步行活动最为密集的区域。城市活力中心与LWP中心在概念和内涵上具有较高的一致性，本研究采用Li等^[11]提出的方法，以兴趣点（POI）数据为基础，通过计算POI密度曲面和自然断点法分类对城市活力中心进行识别。

首先，通过百度地图API获取2017年的16类POI数据，并按照居住、就业和休闲三大基本功能对POI进行分类（表1）；其次，分别计算城市建成区内街道尺度上三类POI的密度，并采用自然断点法分别将这三类POI密度划分为8个等级。定位街道POI密度属于最高等级，且面积大于10ha的连片区域，并将其定义为城市活力中心。对于多活力中心城市，则进一步根据活力中心的面积和POI密度来区分主活力中心与次活力中心。通常情况下，主活力中心的面积最大且POI密度最高。若没有活力中心兼具最大面积和最高POI密度，则首先考虑各中心的面积；若存在一个活力中心的面积远大于（超过20%）其他中心，则该中心被定义为主活力中心；若各中心的面积差异较小，则根据POI密度排序确定主中心。

1.2 研究范围

综合考虑城市人口、经济和行政级别等要素，选取中国具有代表性的50个城市，其中包括4个直辖市，27个省会、自治区首府，5个独立规划城市和14个其他地级市（图1）。遵循上述城市活力中心的识别方法，共计识别出71个城市活力中心。其中，35个案例城市仅含有一个城市活力中心，北京，厦门，哈尔滨等15个城市则各拥有2~3个城市活力中心。

1.3 城市街道步行环境指数

已有的可步行性评价主要集中在对步行指数（Walk Score）的测算，国内外学者也围绕步行指数展开了大量的研究与实证。例如，Duncan等^[12]以波士顿为例，

表1 划分城市活力中心的POI类别

POI类别	POI功能
居住类	居住区、社区服务
休闲类	商业场所、餐饮场所、娱乐场所、酒店、旅游景点
就业类	公司、办公楼、金融服务、法律服务、政府机构、教育机构、医疗机构、其他设施

利用 GIS 数据验证了 Walk Score 评价结果的准确性；Yin^[13] 以布法罗市为例，衡量了街道尺度下城市设计质量的二维和三维 GIS 数据和步行指数的关系；基于华盛顿特区 115 个社区的步行指数，Koschinsky 等^[14] 探讨了居民收入与街道可步行性之间的关系；Gilderbloom 等^[15] 研究了美国 170 个中型城市步行指数和社区可持续性的相关性。国内学者则更多关注步行指数算法的优化和本土化，以及基于步行指数的城市公共设施便利度评价等研究^[16-19]。从步行指数的计算方法不难看出，步行指数的测度是基于城市设施的空间配置和步行出行距离，是从引发步行的可能性这一出发点来评价城市街道的可步行性。然而，良好的街道可步行性并不意味着出发地与目的地之间更短的空间距离，也意味着更便捷和舒适的步行环境^[16]。对城市街道建成环境的评价在考虑城市功能空间布局和步行可达性的基础上，应纳入更多表征街道物质空间环境的指标，如是否机非隔离和过街设施，是否有街道绿化等，这些指标同样影响着城市居民的步行行为和步行体验。

本研究从城市街道物质空间特征要素的视角出发，提出城市街道步行环境的评价方法。已有的文献中，对于城市建成环境的评价，大多采用评价指标的方法，如 Rundle 等^[20] 依据审美、物理破败、步行安全等 7 个指标评价了纽约市的邻里环境；陈纯等^[21] 提出了 19 项指标构成的城市空间品质测度方法。本研究沿用指标体系评价法，借鉴已有研究中对步行环境的探讨^[20, 22, 23, 26]

和国内外城市街道设计元素，并综合考虑大规模虚拟审计的可行性，从设施、环境和安全等层面提出 9 项城市街道步行环境的指标体系及评价标准（表 2）。

为了更科学、客观地反映各项指标在城市街道步行环境评价中的重要性，本研究采用德尔菲法邀请 20 位专家学者与从业者确定了各项指标在评价体系中的权重（表 3）。

1.4 研究数据与方法

环境审计是识别建成环境微观特征，评价建成环境的直接方式，也是应用最为广泛的手段。然而，传统的环境审计工具存在着成本高、耗时、繁琐等不足，同时又受到环境、地点的限制，尤其是面对大规模测度时更是缺乏快速而有效的途径。在城市建成环境研究领域，

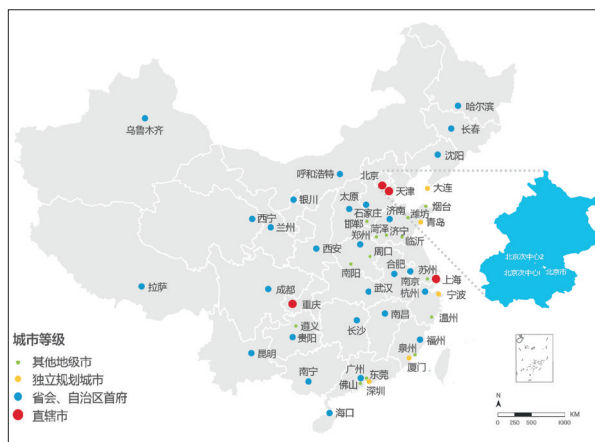


表 2 城市街道步行环境指数及评价指标

评价指标	评价标准
是否有过街设施	如有信号控制标识，过街天桥、地下通道、人行横道标线，行人安全岛等，则计 1 分；否则为 0 分
是否有街道绿化	如街道两旁有可提供树荫的行道树，则计 1 分；否则为 0 分
是否有舒适的两侧建筑高宽比	如两侧建筑宽高比为 0.5-1，则计 1 分；否则为 0 分
是否有街道家具	如有摆放在街道两旁的椅、凳等家具，则计 1 分；否则为 0 分
是否机非隔离	如有隔离栅、路侧停车线、隔离花坛、阻车桩，则计 1 分；否则为 0 分
步道宽度是否适宜	如不存在植物（类似树坑、灌木丛等）、设施（如垃圾箱、路灯、座椅、变电箱等）占道过多，行人行走不便（尤其要考虑残疾人或者婴儿推车、两人并肩同行宽度是否足够），则计 1 分，否则为 0 分
是否存在步道长期占道	如无长期占道，例如步道中无小商小贩占道经营、无机动车辆停放等现象，则计 1 分，否则为 0 分
是否存在步道失修	如无步道缺乏失修迹象，例如步道中无道路铺砖破损，无路面开裂等现象，则计 1 分，否则为 0 分
是否有专用自行车道	如有明显标识、铺装或隔离的专用自行车道，则计 1 分，否则为 0 分

表 3 城市街道步行环境指数权重

街道步行环境指数	权重 (%)
长期占道	12.99
过街设施	12.82
步道宽度	12.58
机非隔离	12.05
专用自行车道	11.01
步道失修	10.52
街道家具	9.81
街道绿化	9.71
两侧建筑宽高比	8.51

表 4 街道环境指数排名前 10 的城市活力中心

排名	城市活力中心	街道步行环境指数
1	北京次中心 2 (中关村)	59.9
2	广州次中心 (天河路 - 体育东路)	59.2
3	济南次中心 (山大北路)	57.6
4	北京市中心 (国贸 CBD)	56.8
5	深圳次中心 (深南中路)	54.2
6	佛山市中心 (祖庙)	52.6
6	临沂市中心 (新华路)	52.6
8	上海市中心 (九江路)	52.3
9	重庆次中心 (三峡广场)	50.9
10	济南市中心 (大观园)	50.1

有研究者提出基于谷歌街景影像数据对城市中的建成环境进行“虚拟的环境审计”，如 Philippa Clarke 等^[24]和 Nicole Edwards 等^[25]分别将街景影像数据应用在邻里建成环境和公共空间环境研究中。研究证实了基于街景影像的虚拟环境审计和传统的环境审计在结果上具有高度的一致性，且虚拟环境审计相比传统方法可以节省高达 90% 的审计时间。近年来，虚拟审计也因其效率高、成本低、适用范围广等特点越来越多的被应用在城市步行环境的评价研究中^[26]。

本研究涵盖的 71 个城市活力中心内共有 12740 条街道，总长度约 1500 km，传统的环境审计很难实现如此规模的实地调研。因此，本研究将采用虚拟审计的方法，依托街景影像数据实现对城市街道步行环境的审计和评价。考虑街景图片的视物景深，每隔 50m 设置一个“观测点”，共计 31226 个，并抓取每个观测点四个方向的街景影像。为了提高虚拟审计的工作效率，本研究搭建了“中国城市活力中心街道步行环境评价系统”（图 2）。评价系统页面左侧显示某观测点合成的 360° 街景图片，右侧为街道步行环境指标的 9 项指标。

在虚拟审计过程中，研究招募了城市规划专业背景的三位审计员对街道步行环境进行审计。在正式审计前，随机抽取 1000 条街道（约占总样本量的 10%）并对三位审计员的审计结果进行一致性分析，得到的 Kappa 值为 0.87>0.75，审计结果的一致性较好，证实了评价指标体系和虚拟审计的可行性和可操作性。

2 中国典型城市街道步行环境指数

2.1 街道步行环境指数总分不高

为了方便计算与结果对比，我们将打分得到的分数转化为百分制。从评价结果来看，71 个城市活力中心的街道步行环境指数仅获得了 41.9 分的平均分，且得分超过 50 分的城市活力中心仅有 10 个（表 4）。这一评价结果意味着，即便是在城市中人流相对密集、商业发达的活力中心，城市街道的步行环境仍存在严重不足，有着非常大的提升空间。然而，较低的平均分背后既反映了不同的建成环境特征，受城市自然、经济、文化和政策等多方面因素的影响，也暴露出了一

些共性问题。如绝大多数的城市街道普遍缺少专用自行车道；北方城市在街道绿化上的得分普遍偏低，街道家具的配置也略显不足；而对慢行交通的规划设计投入较多的一、二线城市，其整体得分则相对较高。在整体评估的基础上对细化指标进行深入分析，有助于厘清我国典型城市步行环境现状，剖析得分背后的深层原因，提出改善步行环境的思路和建议。

2.2 三项“基本环境指数”表现良好

在本研究定义的九项街道步行环境指标中，权重最高的三项指标分别为“长期占道”、“过街设施”和“步道宽度”，这三项指标构成了街道步行环境的基本特征要素，即是否具备步行的必要空间和设施，我们将这三项指标定义为街道的“基本环境指数”。其余 6 项指标则从安全、便利、美观等角度提出良好街道步行环境应具备的特征要素。

尽管 71 个城市活力中心的街道步行环境总得分不高，但在三项基本环境指数上的表现良好。我们对这三项基本环境指数的得分进行了百分制换算，表 5 列出了基本环境指数排名前十的城市活力中心。这一结果说明 71 个城市活力中心的多数街道可以为行人提供宽度适宜且无占道的步道，同时设置了必要的过街设施，以供行人安全地穿越街道。从城市规模来看，大城市更能为行人提供相对完备的必要步行设施与环境。一方面，大城市在基础设施建设中起步较早、投资较大，多年的积累实现了相对完善的道路基础设施；另一方面，近年来一、二线城市愈加重视与步行密切相关的环境建设，包括北京、上海、广州、深圳、重庆、南京、成都、昆明在内的城市都相继出台技术导则指导步行环境建设和改善，这既反映了城市对慢行交通系统建设的加大投入，也标志着城市交通发展走向精细化、智能化和可持续化。

2.3 单项指标得分参差不齐

从单项指标的评价结果来看，案例城市活力中心在“步道宽度适宜”、“步道无缺乏失修”和“街道绿化/行道树”三个指标中得到了较高的评价。这说明大多数街道具有满足步行需求的人行道宽度，同时步道路面物理状况良好，也能为行人提供林荫和绿化环境。相比之下，“专用自行车道”、“街道家具”、“机非隔离设施”、“过街设施”这四项目



图 2 基于街景影像对街道步行环境进行人工审计

表 5 街道“基本环境指数”排名前十的城市活力中心

排名	城市活力中心	街道步行环境指数
1	上海市中心（九江路）	77.0
2	北京市中心（国贸 CBD）	70.1
3	北京次中心（中关村）	69.9
4	深圳次中心（深南中路）	67.2
5	济南市中心（大观园）	66.6
6	宁波次中心 2（世纪城）	64.9
7	遵义次中心 1（南京路）	64.3
8	重庆次中心 2（南城大道）	62.3
9	潍坊市中心（胜利街 - 和平路）	61.6
9	广州次中心（天河路 - 体育东路）	61.6

标的得分普遍较低(图3),意味着:(1)专用自行车道仅存在于较少数的城市街道。我国以机动车为主导的交通模式在满足机动车需求的同时往往牺牲了自行车的行驶空间,造成自行车道的缺失和不连续;(2)大多数街道缺失街道家具,无法很好地为行人提供停留和休息的设施。这同时也暴露出城市规划设计中缺少对公共空间的美观性、实用性、系统性和社会性的综合考虑,场所营造的理念相对薄弱;(3)过街设施以及机动车道/非机动车道隔离设施不足,导致自行车与机动车辆争道、混行,在对步行者的过街安全保障方面有待提高。这一结果再次体现了机动车为主导的交通模式和人本尺度街道设计中存在的矛盾和冲突。此外,由于缺乏有效的监管与处罚机制,机动车长期占道现象仍在多数城市中也普遍存在。

尽管本研究中的71个城市活力中心在上述几项指标中的平均分不高,但部分城市中心仍具有较好的表现。上海市早在2007年制定了《上海市城市干道行人过街设施规划设计导则》,推动“快慢分行”与“慢行改善”,规定中心城区干道500m内必有过街设施。北京市交通委自2013年开始的步行自行车系统治理工作,通过整治非法停车,拓宽自行车道,安装机非护栏等措施,为骑行者与步行者提供更加安全和舒适的环境。

我们将评价结果在地图上进行了可视化,以分析我国城市街道步行环境在空间分布上的差异和规律。从南北差异来看,南方城市的城市活力中心在街道绿化/行道树这一单项指标上的得分明显高于位于北方的城市活力中心。在街道绿化/行道树单项指标得分排名前10的城市中,有7个城市位于南方(图4)。中国南北方的气候差异是导致这一结果的主要原因,南方城市的气候更

为温暖潮湿,利于树木的生长,相应的植被密度也普遍高于北方城市。通过典型城市的深入剖析,我们发现北方城市(如哈尔滨,烟台等)普遍存在树种单一、树龄较短、树木高度和密度较低等问题。以烟台市为例,其园林绿化的全面发展起步较晚,旧城区绿化规模小,近年来的新增绿化也多以树苗移植为主,夏天遮荫效果相对较差。哈尔滨市在街道绿化密度上仍旧存在较大的提升空间,近年来多次进行行道树补植,仅2019年上半年就补植了8213个行道树空坑。相比之下,佛山市禅城区的一项调研结果显示,城区内的行道树树种共计58种,骨干树种中胸径V级的老龄行道树依旧占有较大比例^[27],部分地区甚至出现种植密度过大^[28]。

2.4 直辖市城市活力中心的得分相对较高

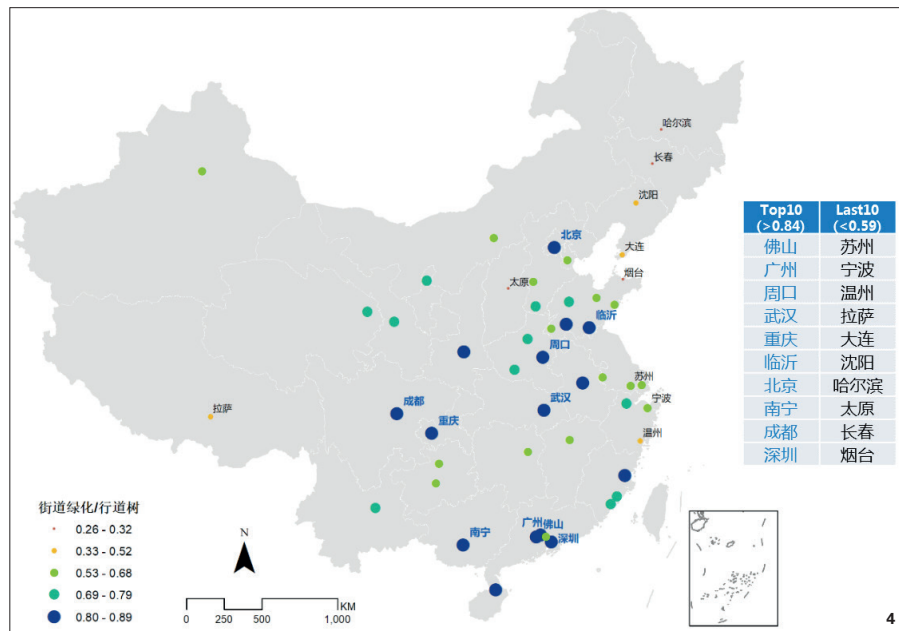
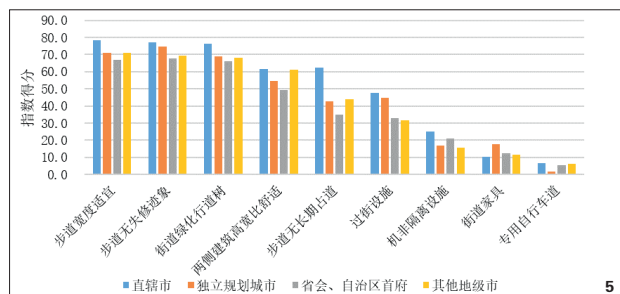
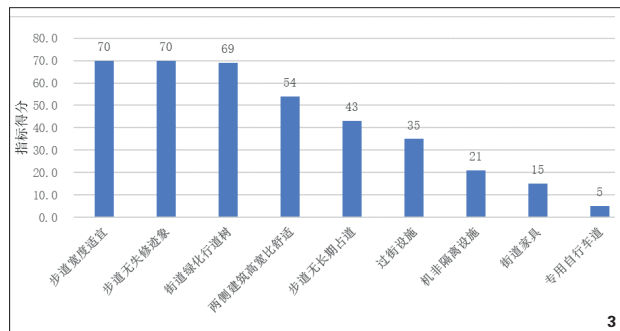
对比直辖市、省会/自治区首府、独立规划城市和其他地级市的城市活力中心在街道步行环境指数上的得分可以发现,8个位于直辖市内的城市活力中心得到了50.8分的平均分,明显高于其他三类城市的城市活力中心。除了天津市中心,其他7个城市活力中心均排在了全部71个城市活力中心的前20名。图5进一步对比了四类城市等级中的城市活力中心在单项指标上的得分差异。直辖市的城市活力中心在除街道家具外的其他各项指标中都具有较高的得分,而在街道绿化/行道树、步道宽度适宜和步道无长期占道三项指标的得分上明显高于其他等级的城市活力中心。

直辖市城市在慢行交通系统建设中的规划和投入,是其城市活力中心在街道步行环境指数上获得较高得分的主要原因,如北京市结合《城市道路空间规划设计规范》编制了多项指南和标准,指导步行设施和自行车道的建设与完善,使得其在除“两侧建筑宽高比”和“街道家具”

图3 71个城市活力中心步行环境单项指标的平均得分

图4 71个城市活力中心在街道绿化/行道树上的得分空间分布

图5 四类城市等级的城市活力中心在单项指标上的平均得分



以外的7项指标中均获得前10名的得分；上海市2016年发布了中国城市的第一部街道设计导则，推动道路向街道进行“人性化”的转变，使其在步道设计、维护和治理等方面均有较好的表现。这种差异同时说明步行环境的质量和城市在慢行交通系统建设的积极性是直接相关的。作为资源和人才集中的地区，直辖市对步行环境的投入也明确了步行友好是城市发展和进步的方向之一。

3 结论与讨论

本研究构建了城市街道步行环境评价指标体系，提出基于街景影像数据和虚拟审计的街道步行环境评价方法，并以中国典型城市中的71个城市活力中心为例进行了街道步行环境的大规模测度。实证研究证实了指标体系的有效性，虚拟审计的可操作性和整体方法的逻辑自洽性。同时，评价结果显示，我国城市的街道步行环境尚有较大的提升空间，虽然大部分城市能够为步行者提供最基础的步行环境与设施，但在安全、便利和美观等方面仍存在不足。整体来看，中国城市街道普遍存在长期占道，过街设施与机非隔离设施缺乏，街道家具布设不足，以及缺少专用自行车道等问题。

本研究是对城市街道可步行性评价的又一次探索，具有丰富的理论和现实意义。理论方法层面，本研究提出城市街道步行环境指数这一概念和评价指标体系，旨在以物质空间特征为视角对街道的可步行性进行测度。研究从街道步行环境的视角提出9项指标，测度街道上是否存在有益于步行环境提升的物质空间特征要素，如适宜的步道宽度、道路两侧绿化、过街设施、街道家具等。在实证研究层面，本研究计算了中国50个典型城市中71个城市活力中心的街道步行环境指数。评价结果显示现阶段我国城市的街道步行环境仍存在诸多不足。研究结果在精细尺度上暴露了部分城市街道环境存在的问题，为精细化建设和管理城市内的步行交通提供了依据和思路。基于对我国典型城市街道步行环境的评价及其背后现实问题的深入剖析，本文尝试提出改善步行环境的几点思路和建议：（1）从规划层面上，逐步转变以机动车为主导的交通模式和规划思路，推进人本尺度下的步行友好性和交通可持续性；鼓励更多的城市编制慢行交通规划与设计导则，引导慢行交通走上正轨，提高城市街道步行环境和居民生活品质；（2）从设计层面上，进一步加强对步道设计与维护的投入，确保为行人提供舒适和安全的步行空间；作为城市内的重要公共空间，通过街道家具的设计提升步行空间的实用性和社会性，加强场所营造；在街道绿化的设计中要因地制宜，充分考虑绿化植物配置的科学性、整体性和美观性；（3）从技术手段上，充分利用大数据、传感器与人工智能相结合的新方法和新技术，助力精细化的城市空间研究。

本研究也存在着一些不足，在指标体系构建上，研究提出的九项指标并不能全面涵盖所有影响人们步行行为与体验的城市空间要素，其他如过街时长、针对行人的交通标识、无障碍设施，以及城市街道的声环境、视觉环境等感官感受都是未来研究中需要考虑的因素。在虚拟审计过程中，审计员对道路两侧建筑宽高比，以及步道宽度的评价中难免会存在误差。虽然虚拟审计已经极大缩减了环境审计的时间和成本，其仍具有改进和发展空间，如结合机器学习的街景影像识别与评价，在实现客观、准确评价的基础上进一步减少审计所需的人力物力。

图、表来源

文中图、表均为作者绘制。

参考文献

- [1] 中国中央人民政府. 中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见 [EB/OL]. (2018-06-24) [2018-11-06]. http://www.gov.cn/zhengce/2018-06/24/content_5300953.htm
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房城乡建设部办公厅关于国家标准《步行和自行车交通系统规划设计标准》公开征求意见的通知 [EB/OL]. (2018-10-18) [2018-11-06]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201810/t20181019_237971.html
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发《2019年新型城镇化建设重点任务》的通知 [EB/OL]. (2019-03-31) [2019-04-08]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201904/W020190408339953053184.pdf>
- [4] Guan C, Keith M, Hong A. Designing walkable cities and neighborhoods in the era of urban big data[J]. Urban Planning International, 2019, 1-16.
- [5] 邓一凌, 陈前虎, 过秀成. 步行性评价的研究与规划应用综述 [J]. 现代城市研究, 2018(2): 101-107.
- DENG Yi-ling, CHEN Qian-hu, GUO Xiu-cheng. General Review of the Studies of Walkability Assessment and its Applications in Planning [J]. Modern Urban Research, 2018(2), 101-107.
- [6] 李智, 龙瀛. 基于动态街景图片识别的收缩城市街道空间品质变化分析——以齐齐哈尔为例 [J]. 城市建筑, 2018(6): 21-25.
- LI Zhi, LONG Ying. An Analysis on Variation of Quality of Street Space in Shrinking Cities Based on Dynamic Street View Pictures Recognition: A Case Study of Qiqihar [J]. Urbanism and Architecture, 2018(6), 21-25.
- [7] 甘欣悦, 余天唯, 龙瀛. 街道建成环境中的城市非正规性——基于北京老城街景图片的人工打分与机器学习相结合的识别探索 [J]. 时代建筑, 2018(1): 62-68.
- GAN Xin-yue, SHE Tian-wei, LONG Ying. Understanding Urban Informality in Street Built Environment Combining Manual Evaluation with Machine Learning in Processing the Beijing Old City's Street-view Images [J]. Time + Architecture, 2018(1), 62-68.

- [8] McDonald, J F. The identification of urban employment subcenters[J]. Journal of Urban Economics, 1987, 21(2):242-258.
- [9] Pfister, N, Freestone, R, Murphy, P. Polycentricity or dispersion? Changes in center employment in metropolitan Sydney, 1981 to 1996[J]. Urban Geography, 2000, 21(5):428-442.
- [10] McMillen, D P, Smith, S C. The number of subcenters in large urban areas[J]. Journal of Urban Economics, 2003, 53(3):321-338.
- [11] Li J, Long Y, Dang A. Live-Work-Play Centers of Chinese cities: Identification and temporal evolution with emerging data[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2018, 71:58-66.
- [12] Duncan D T, Aldstadt J, Whalen J, et al. Validation of Walk Scores and Transit Scores for estimating neighborhood walkability and transit availability: a small-area analysis[J]. GeoJournal, 2012, 78(2): 407-416.
- [13] Yin L. Street level urban design qualities for walkability: Combining 2D and 3D GIS measures[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2017, 64:288-296.
- [14] Koschinsky J, Talen E, Alfonzo M, et al. How walkable is walker's paradise?[J]. Environment & Planning B, 2017, 44(2): 343-363.
- [15] Gilderbloom J I, Riggs W W, Meares W L. Does walkability matter? An examination of walkability's impact on housing values, foreclosures and crime[J]. Cities, 2015, 42(42):13-24.
- [16] 卢银桃, 王德. 美国步行性测度研究进展及其启示 [J]. 国际城市规划, 2012(1): 10-15.
- LU Yin-tao, WANG De. Walkability Measuring in America and Its Enlightenment[J]. Urban Planning International, 2012(1), 10-15.
- [17] 周垠, 龙瀛. 街道步行指数的大规模评价——方法改进及其成都应用 [J]. 上海城市规划, 2017(1): 88-93.
- ZHOU Yin, LONG Ying. Large-scale Evaluation for Street Walkability: Methodological Improvements and the Empirical Application in Chengdu[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2017(1), 88-93.
- [18] 吴健生, 沈楠. 基于步行指数的深圳市福田区公园绿地社会服务功能研究 [J]. 生态学报, 2017(22): 7483-7492.
- WU Jian-sheng, SHEN Nan. Walk score method-based evaluation of social service function of urban park green lands in Futian district, Shenzhen, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017(22), 7483-7492.
- [19] 黄建中, 胡刚钰. 城市建成环境的步行性测度方法比较与思考 [J]. 西部人居环境学刊, 2016(1): 43-47.
- HUANG Jian-zhong, HU Gang-yu. Comparison and Thinking of the Walkability Measure Methods on Urban Built Environment[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2016(1), 43-47.
- [20] Rundle A G, Bader M D M, Richards C A, et al. Using Google Street View to audit neighborhood environment. [J]. American Journal of Preventive Medicine, 2011, 40(1): 94-100.
- [21] 陈纯, 陈婧佳, 贾紫牧, 等. 基于空间失序理论的城市街道空间品质大规模测度——以合肥市二环内为例 [J]. 南方建筑, 2020(02):10-18.
- CHEN Chun, CHEN Jing-jia, JIA Zi-mu, et al. Large-scale Measurement of the Quality of Urban Street Space Based on Physical Disorder Theory: A Case Study of Area within the Second Ring of Hefei City[J]. South Architecture, 2020(2), 10-18.
- [22] Boarnet M G, Forsyth A, Day K, et al. The street level built environment and physical activity and walking: results of a predictive validity study for the Irvine Minnesota inventory[J]. Environment and Behavior, 2011, 43(6):735-775.
- [23] Reid Ewing, Amir Hajrasouliha, Kathryn M. Neckerman, et al. Streetscape Features Related to Pedestrian Activity[J]. Journal of Planning Education and Research, 2016, 36(1):5-15.
- [24] Clarke P, Ailshire J, Melendez R, et al. Using Google Earth to conduct a neighborhood audit: reliability of a virtual audit instrument[J]. Health & place, 2010, 16(6): 1224-1229.
- [25] Edwards N, Hooper P, Trapp G S, et al. Development of a public open space desktop auditing tool (POSDAT): a remote sensing approach[J]. Applied Geography, 2013, 38: 22-30.
- [26] Steinmetts-Wood M, Velauthapillai K, O' Brien G, et al. Assessing the micro-scale environment using Google Street View: the Virtual Systematic Tool for Evaluating Pedestrian Streetscapes (Virtual-STEPS) [J]. BMC Public Health, 2019, 19: 1246.
- [27] 李洪斌, 陈李利, 周贱平, 等. 佛山市禅城区行道树调查研究 [J]. 广东园林, 2007(02):58-61.
- LI Hong-bin, CHEN Li-li, ZHOU Jian-ping, et al. An Investigation on Roadside Trees of Chancheng District of Foshan City[J]. Guangdong Landscape Architecture, 2007(2), 58-61.
- [28] 周焯辉, 李清明, 梁慧清. 佛山市城市绿化建设存在的问题及对策 [J]. 广东园林, 2014, 36(3):57-61.
- ZHOU Zhuo-hui, LI Jie-ming, LIANG Hui-qing. The Problems and Countermeasures of Urban Greening Construction in Foshan[J]. Guangdong Landscape Architecture, 2014, 36(3), 57-61.