

# 数字技术辅助的城市公共空间体验研究进展与趋势 \*

Research Progress and Trends in Urban Public Space Experience under the Assistance of Digital Technology

董 雯<sup>1</sup>, 戴冬晖<sup>2</sup>  
DONG Wen, DAI Donghui



开放科学 ( 资源服务 )

标识码 ( OSID )

## [ 本文引用格式 ]

董雯, 戴冬晖. 数字技术辅助的城市公共空间体验研究进展与趋势 [J]. 南方建筑, 2024 ( 3 ) : 20–31.

DONG Wen, DAI Donghui. Research Progress and Trends in Urban Public Space Experience under the Assistance of Digital Technology[J]. South Architecture, 2024(3): 20–31.

**摘要** 在城市高质量发展的新阶段, 公共空间对改善人居环境品质具有重要意义, 从人文视角出发, 探究空间如何被人所体验, 其与环境特征有何复杂关系日益受到关注, 新兴数字化技术的发展为相关研究提供了新路径。针对传统研究存在的难点, 梳理了数字化技术在体验特征描述、空间关联解析和体验预测模拟三个方面提供的多样化支持路径和应用方式, 揭示了整体耦合研究系统化、技术测度方法精细化、空间特征分析多元化、体验研究方式动态化的发展趋势, 并从研究对象、研究内容、内在机理三个方面提出展望。

**关键词** 数字化技术; 城市公共空间; 空间体验; 以人为本; 感知

\* **基金项目** 国家自然科学基金资助项目 ( 52078159 ) : 基于主体建模技术的居住区空间模拟与优化方法研究; 深圳市稳定支持计划面上项目 ( GXWD20220811163309001 ) : 基于主体建模方法的深圳市社区生活圈识别与评价。

**中图分类号** TU984      **文献标志码** A

**DOI** 10.3969/j.issn.1000-0232.2024.03.003

**文章编号** 1000-0232 ( 2024 ) 03-0020-12

**作者简介** <sup>1</sup>博士研究生; <sup>2</sup>副教授, 通讯作者, 电子邮箱: dai\_donghui@hotmail.com; <sup>1&2</sup>哈尔滨工业大学 ( 深圳 ) 建筑学院

**ABSTRACT** In the new stage of high-quality urban development, public space is of great significance in improving the quality of the human environment. From a humanistic perspective, there is growing attention on exploring how space is experienced by people and its complex relationships with environmental features. The new demand for the humanized and refined construction of public space has posed a new challenge to design modes based on traditional analytical tools (e.g., questionnaire research and field observations) as well as the relatively ambiguous and subjective experiences of designers.

New tools emerging from the fourth industrial revolution provide new perspectives and ways to study experiences of urban public space from a humanistic perspective. To offset challenges in traditional studies, digital technologies provide support on three levels: the description of experience characteristics, analysis of spatial correlation, and simulation of experience prediction. Accordingly, it enables more accurate and scientific experience

measurements, a closer correlation analysis with spatial characteristics, and guides the implementation of space design schemes based on human-centered experiences.

A development history was reviewed using CiteSpace. Both Chinese and foreign digital technologies first focused on studies on behavioral experiences. Then, they were gradually employed in the field of perceptual experience, wherein considerable development occurred around 2018. Although studies on spatial behaviors and perception have attracted considerable research attention in the fields of urban and landscape design since the 20th Century, it is difficult to match perceptual experience, as psychological content, with physical space. However, the development of digital technology has built a bridge between perceptual experience and space, as well as supporting the spatial layout design of plane morphology and the perspective of façade. Based on the space experience process frame of "feeling-perception-cognition-behaviors", the research progress on spatial experiences in different stages based on digital technologies was reviewed, revealing the following themes: assisting in understanding of feeling experience, providing a characterization pathway for sensory stimuli; achieving the intelligent scale measurement of perceptual experiences and exploring driving factors of urban environment; supporting studies on cognitive emotions and preferences thereby achieving in-situ evaluation and characteristic extraction; achieving the spatiotemporal monitoring and analysis of behaviors and expanding studies on optimal behavioral solutions to simulation. There were some general development trends in research on space experience with the assistance of digital technology, such as the systematization of general coupling studies, refinement of technological measurement methods, diversification of space characteristic analysis, and dynamic experience studies. Finally, prospects were proposed from the perspectives of research objects, research contents, and internal mechanisms.

**KEY WORDS** digital technology; urban public space; space experience; human-centered; perception

## 引言

随着我国城镇化发展进入转型期,以人为本的人居环境建设日益受到关注。城市公共空间作为居民日常生活的重要场所,其品质和氛围提升对于改善人居环境质量具有重要意义<sup>[1]</sup>。公共空间人性化、精细化的建设新需求,对基于问卷调研、现场观察等传统分析工具和依靠设计师相对模糊主观的设计模式提出了新的挑战。如何有效捕捉公共空间体验过程和结果,理解空间与人的感知和行为的内在关系,从而为设计提供科学支持已成为研究的热点。

21世纪以来,数字化技术以其瞬时性、互联性、可视化的特点为城市公共空间研究打开了新的视野。相比大数据技术多维度、大数量、范围广等特点,数字化技术可深层次、细腻化地挖掘人类感知和行为等环境体验信息,实现强大的数据计算和可视化能力<sup>[2, 3]</sup>,并有效推动公民的主动式参与,从人本视角为城市公共空间研究提供了新路径<sup>[4]</sup>。

## 1 城市公共空间体验的过程框架与研究难点

### 1.1 公共空间体验的过程框架

传统城市公共空间设计中,个人经验判断往往与实际空间体验存在差异<sup>[5]</sup>,如何明晰空间体验及其与环境特征的复杂关系日益受到关注。现代汉语辞典中,“体验”一指亲身经历,二指亲身实践所获得的经验。有学者将公共空间体验定义为人在场所中亲身经历并与空间环境的身体互动过程,指出空间体验包含着感知与行为的统一性<sup>[6, 7]</sup>。基于环境心理学,其体验过程框架可以分为感觉、知觉、认知和行为<sup>[8]</sup>(图1)。该框架通过递进的层次关系简明阐释了人在空间中的体验过程和驱动结果,并已在感知过程和评价体系的相关研究中得到了应用<sup>[1, 9]</sup>。

在体验过程框架中,感觉,即人的感觉器官接受

环境刺激的过程,包括视觉、听觉、嗅觉和热觉层面;知觉,是人脑对直接作用于感官的客观事物的整体反应及对空间属性的评价,包括开放性、围合度、秩序性等;认知,是人基于感知觉进一步进行情感加工和逻辑推理的结果<sup>[1, 9]</sup>;行为,则为人在感受和认识空间后进行的行动反应,行为对空间环境特征及其进一步的场所感知体验可产生反向影响。

### 1.2 公共空间体验研究的面临难点

城市公共空间体验研究的主要流程及内容包括三个方面:确定研究方法、描述体验特征和解析空间关联(图1)。在这一框架下,传统的工具和方法存在一定局限性,体现为:1)体验特征描述上,由于感知个体性、主观性和复杂性的特点,问卷、量表等传统方法存在现场回忆扭曲、情感数据与空间数据脱节、感知体验结果难以测度等难点,而大数据分析对中微观空间中个体时空行为的解读则同样存在不足。2)空间关联分析上,以问卷为工具的传统研究中,感知多作为停留在心理学层面的指标化定性因子,难以在空间层面实现与场所元素和行为的联动分析。3)研究方法上,传统的现场实验由于固定场景限制,难以分析空间环境的改变及其对体验的影响。

### 1.3 数字技术辅助公共空间体验研究的路径

21世纪后新兴技术的发展对规划设计影响深远,信息通信技术(ICT, information and communications technology)、虚拟现实(VR, virtual reality)、可穿戴传感器(Wearable sensor)和人工智能(AI, Artificial Intelligence)等工具通过科学精细化的测度方法、可视化可量化的结果呈现和提供“不在场”的研究方式三条路径,为空间体验研究提供了新的可能性(图2):一是基于可穿戴传感器、互联网通信及无人机等智能设备,通过生理指标测度、居民主动参与和时空监测方式提取即时量化的感知信息和行为数据;二是基于人工智能实现元素内容和空间分布的可视化呈现,并通过支持充足

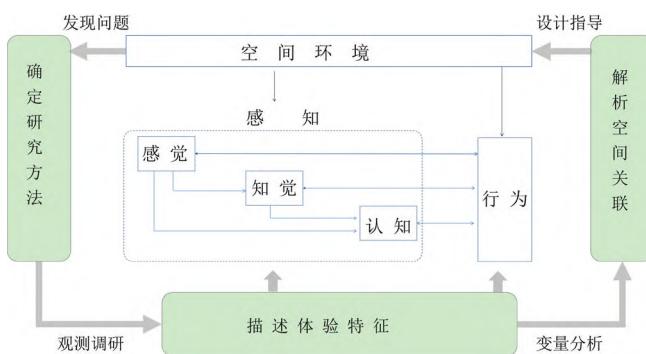


图1 空间体验过程及研究流程框架

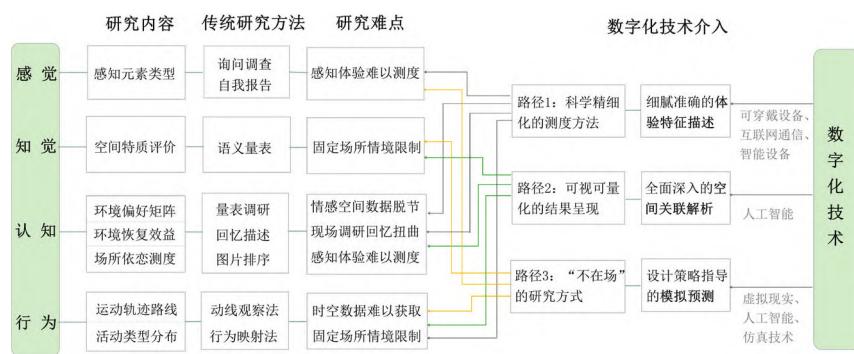


图2 数字技术辅助的城市公共空间体验研究

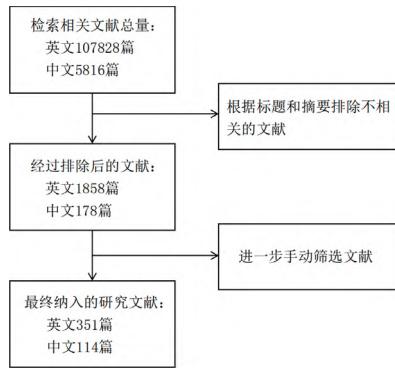


图3 文献检索流程图

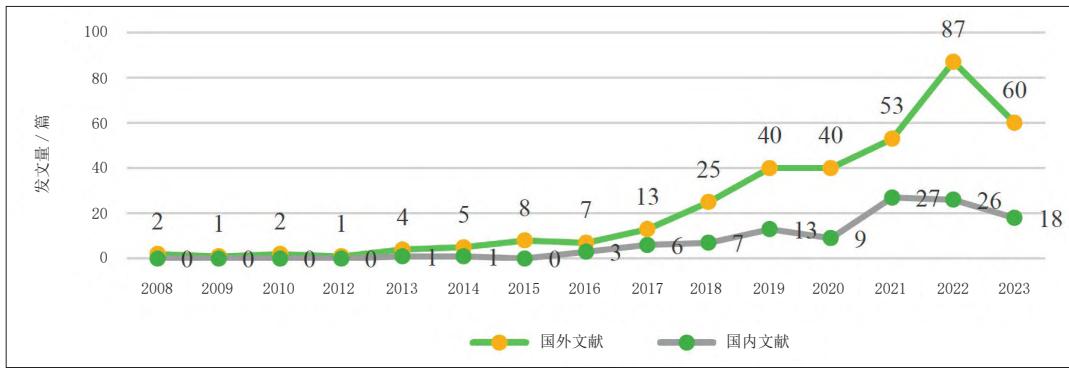


图4 国内外发文趋势图

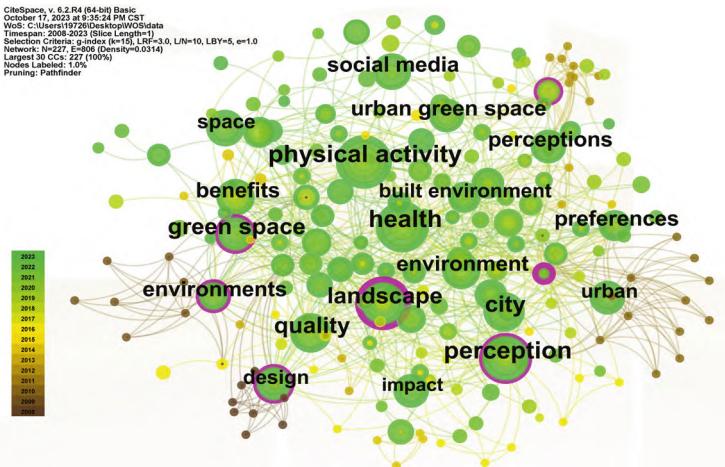


图5 国内外关键词共线图谱

的样本量和空间可量化的指标因子，为进一步与空间特征的关联分析提供基础；三是通过虚拟现实、人工智能和仿真模拟技术为感知和行为研究提供“不在场”的仿真模拟或预测，为空间方案生成或改造提供决策支持。

## 2 数字技术辅助的公共空间体验研究整体脉络

### 2.1 检索工具和流程

国内外文献检索分别以 Web of Science (WoS) 数据库和 CNKI 数据库作为数据源，本文数据截至收集 2023 年 10 月。检索的研究对象关键词界定为：“urban public space”、“park”、“square”、“street”，检索的研究内容关键词界定为：“perception”、“experience”、“cognition”、“sense”、“behavior”、“distribution”、“psychological”，为保证数据源的完整性，在“Digital\* tools”检索词的基础上，以具体数字技术名称进行检索。WoS 核心数据库检索得到 107827 篇文献。CNKI 数据库检索得到 5816 篇文献。排除生态学、动物学等不相关的专业领域，得到英文文献 1858 篇，

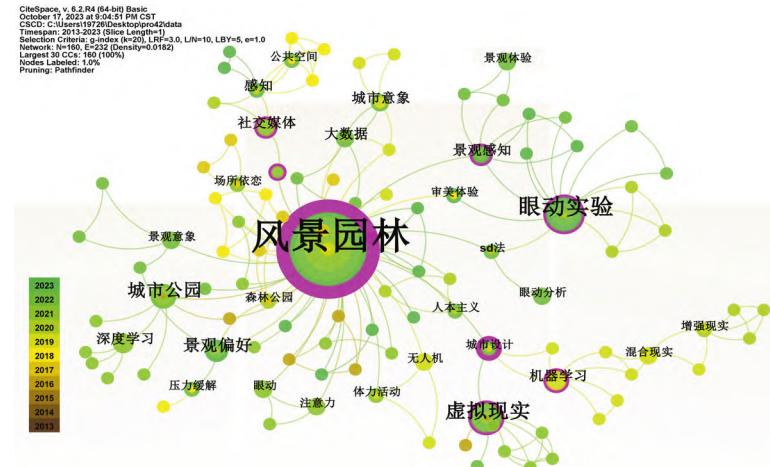
中文 178 篇。在此基础上进一步筛选，标准为：(1) 尺度为城市公共空间，排除室内等空间环境；(2) 仅关注空间体验，去除数字化城市设计实践及管理等相关研究；(3) 仅研究 WoS 和 CNKI 收录的高质量中英文全文文献，最终得到英文文献 351 篇，中文文献 114 篇（图 3）。

### 2.2 发文趋势与关键词共现分析

图 4 显示了 2008~2023 年间 WoS 和 CNKI 数据库中的中外文文献检索数量。图 5 显示了国内外相关文献的关键词共现图谱。2008~2012 年间，国外发表了少量文献。2013 年相关研究开始在国内受到关注。自 2017 年开始，国外相关研究迅速增多，国内研究则在 2019 年左右有较大幅度增长。其中景观偏好、体力活动和恢复效益是国内外共同的主要关键词，且都注重与城市设计和景观设计的联系。

### 2.3 研究集群与发展脉络阐述

CiteSpace 软件的关键词时间线图谱直观展示了研究集群及各集群中关键词出现的时间脉络和相互关系。突现词谱可呈现不同时期对特定关键词的关注，引用率较



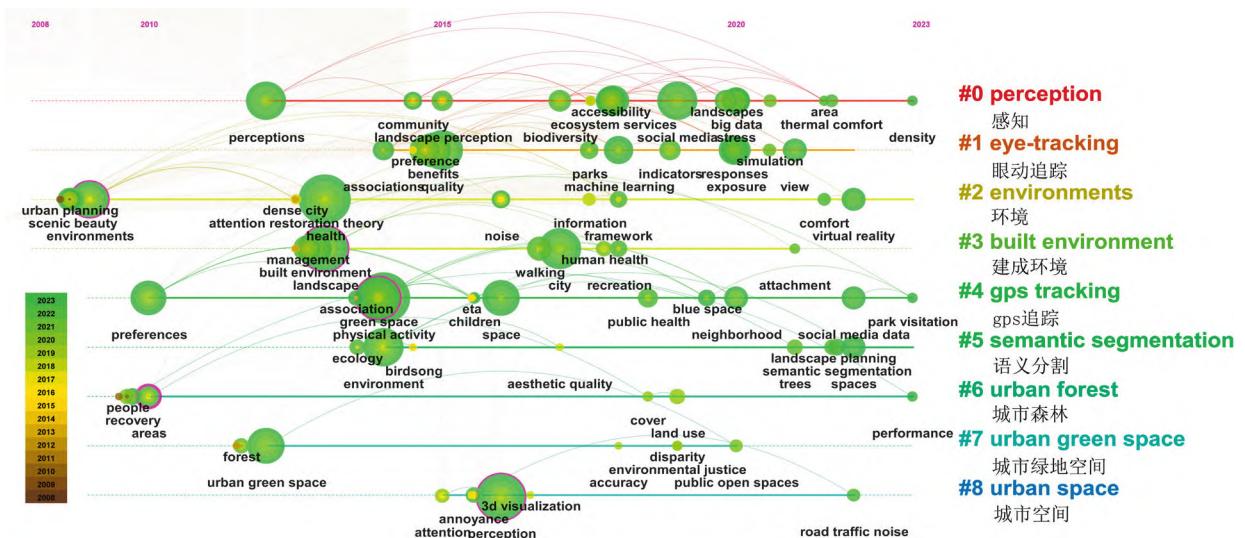
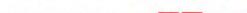


图 6 国外文献关键词聚类时间线图

表 1 国内文献关键词突现词谱

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2008~2023
复杂系统	2013	0.69	2013	2013	
街区空间	2013	0.69	2013	2013	
游客行为	2014	0.68	2014	2014	
景区	2014	0.68	2014	2014	
客流管理	2014	0.68	2014	2014	
仿真建模	2014	0.68	2014	2014	
情感地图	2016	0.66	2016	2016	
机器学习	2019	1.71	2019	2019	
混合现实	2019	1.14	2019	2019	
无人机	2019	1.14	2019	2019	
增强现实	2019	0.94	2019	2020	
社交媒体	2020	1.17	2020	2021	
深度学习	2021	1.47	2021	2021	
城市公园	2016	1.05	2021	2021	
眼动	2021	0.97	2021	2021	
注意力	2021	0.97	2021	2021	
虚拟现实	2016	0.95	2021	2023	
风景园林	2016	0.67	2021	2021	
眼动实验	2020	1.92	2022	2023	
景观感知	2022	1.09	2022	2023	

高的关键词可为识别研究前沿提供参考。

根据时间线图(图6),从技术应用脉络来看,2010年起,空间体验研究中, GPS工具首先被用于行为分析。2013年左右,数字技术逐步介入感知体验研究,其中眼动仪是视觉体验描述的重要工具,并于2021左右应用于景观的视觉模拟预测;2014年左右语义分割等机器学习技术开始得以应用;2019年左右,公共空间尺度下的社交媒体数据和虚拟现实技术应用尤为突出。从体

验的研究内容来看，2010 年开始关注行为和空间认知体验；2015 年感觉体验维度日益多元化，更加关注视听交互以及人本尺度的热感觉研究；近 10 年来，基于深度学习支持空间特征的知觉体验研究也逐渐展开。

结合突现词谱（表1）和国内关键词共现图（图5），2014~2019年，国内的数字化技术同样首先应用于行为体验研究，具体包括仿真建模、机器学习、混合现实和无人机等技术。2017年至今，感知相关研究快速增加，

国内研究主题热点的时间间隔较短，眼动实验、虚拟现实、社交媒体和深度学习是近3年爆发强度较高的4个技术关键词。

### 3 数字技术辅助的公共空间体验研究进展

#### 3.1 认识感觉体验过程，提供感官刺激的表征途径

感觉是空间体验的第一阶段，传统的感觉研究通过自我报告或问卷调查的方法，聚焦于感受的元素类型“是什么”<sup>[10, 11]</sup>，如树木、建筑等视觉元素或及鸟声、音乐声等声音类型，感觉的体验过程难以通过可视化或量化形式呈现。其次，传统研究通常将感觉的产物等同于空间事物的存在本身，忽视了客观事物与人体刺激反应后的感觉差异。

在视觉方面，数字技术为体验过程呈现提供了支持，包括空间结构体验和空间元素体验两个方面。Depthmap空间句法的等视域分析(IsoVist analysis)实现了基于感知点位置的可见区域分析，可根据视域面积(IsoVist area)、视线径深(IsoVist diameter)和视域游离度(Drift-magnitude)等各参数确定个体沿路径移动时所经历的空间结构视觉属性变化<sup>[12, 13]</sup>，计算机辅助制造(CAM)则可通过模拟呈现视觉高度和视角变化的三维动态视觉感知过程<sup>[14]</sup>，突破以往景观漫步后自我报告的描述性局限，更科学、立体地呈现体验过程，量化分析动态视觉下的天际线曲率、天空广幅度、景观广幅度等指标。空间元素体验方面，眼动仪技术通过记录人们无意识的眼球运动，使元素的感知测量成为可能，感官体验中最常采用的是结合热点图和轨迹图的可视化，明晰人对空间元素的注视位置、注视时间和观看顺序<sup>[15, 16]</sup>，相关研究主要聚焦于元素类型、颜色、新旧等方面<sup>[17, 18]</sup>，并可比较不同群体的观看方式差异<sup>[15]</sup>。针对眼动样本收集的数量限制，基于Matlab的GBVS算法生成的人类视觉观察分布的显著性图(Saliency maps)可模拟显示潜在的焦点区域，有助于综合专家和公众意见，选择实现最佳视觉整体效果的设计方案<sup>[19]</sup>。

听觉和热感觉方面，技术的介入可分析客观指标与个体感受差异。听觉体验方面，研究证明人耳听到的声音和客观声强有异，双耳录音技术的发展结合MATLAB Audio Toolbox、Psysound3等软件实现响度、锐度和粗糙度等心理声学指标的提取，表征个体的实际听觉体验<sup>[20]</sup>；公众参与平台(Public Participation Geographic Information System, PPGIS)则为声音感知提供了个体参与路径，已有学者基于智能手机开发城市声景观参与式感知系统<sup>[21, 22]</sup>，通过个体参与的主观声压级等声要素评价获得声景感知空间分布，进而探讨影响声景感知的

景观物理特征和空间模式。热感觉方面则体现在监测对象粒度精细化和监测指标生理化上，相比通过场地固定监测点的测度方式，可穿戴便携式传感设备可实现行人层面精细度的环境热变量评估<sup>[23]</sup>，监测人体生理参数和主观热感觉<sup>[24, 25]</sup>，另外，动态热感觉研究也开始受到关注，已有学者发现城市密度、空间多样性等环境要素在热觉体验变化中的作用<sup>[25]</sup>。

总体而言，借助数字化技术，分析不同空间类型乃至不同元素的感觉体验差异，可为设计决策提供更精准的支持。技术的发展进一步推动了基于定点和运动状态下视觉感知的空间结构设计的支持研究。此外，可量化的指标和可视化的体验模式，允许与场所的空间属性建立联系，并为后续的体验分析奠定了基础。

#### 3.2 实现知觉体验智能规模测度，探索城市环境驱动因素

与知觉体验相关的“开敞性”、“围合性”、“秩序性”等空间特质属性作为设计学科的基本词汇<sup>[26]</sup>，是对空间元素组织结构的直接阐述，不同的结构安排知觉体验不同，其常用的分析方法为语义差异量表的定性描述。其主要研究问题一是空间的特征性质是什么？二是空间景观元素或者建成环境如何影响了空间体验？相对于词汇简单的定义描述，人们往往基于个人的不同体验做出选择，需要大量样本开展关联分析。

基于知觉体验研究的指标体系，机器学习结合主观评分可实现智能化、大规模、高效率的空间知觉测度评价。麻省理工学院媒体实验室(MIT Media Lab)的“城市脉冲”(Place Pulse)项目基于网站访问者两两评价谷歌街景图片品质差异实现了大规模测度。但该研究利用了像素分类的低、中级图像特征，难以提取图像的高级信息。深度学习算法提供了图像中元素的比例和组成的高级概念，无需捕获有关轮廓或元素数量细节<sup>[27]</sup>。许多学者基于此邀请专家对部分样本图片的各知觉维度进行评分，通过深度卷积神经网络(DCNN)训练得到大规模的样本评价<sup>[28, 29]</sup>。

近年来，深度学习算法广泛应用于空间特质属性的量化评价。研究者基于图像分割的景观要素空间组构比例建立公式，形成知觉测度的多维分析框架，已有学者从绿色性(Greenness)、开放性(Openness)、围合度(Enclosure)、可步行性(Walkability)和可意象性(Imageability)等维度建立感知指数公式，通过框架衍生分数与主观评分数的对比证实了模型合理性<sup>[27]</sup>，并进一步拓展至研究线性景观上的景观序列分析<sup>[30, 31]</sup>。随着感知感官维度(Perceived Sensory Dimensions, PSD)框架的提出，深度学习也被应用于空间的庇护性、前景性、自然性等空间特征计算<sup>[32]</sup>。

基于机器学习的大规模知觉测度突破了以往实地调

研的小规模情境限制, 可满足回归分析的高样本量需求, 进而探索与知觉品质相关的环境驱动因素。对此, 有学者基于语义分割模型和回归分析识别影响不同知觉指标的视觉敏感元素<sup>[28]</sup>; 也有学者基于随机森林模型探讨周边POI设施分布的影响作用<sup>[33]</sup>。此外, 基于深度学习预测的空间知觉品质评价可基于不同类型空间的指标波动, 帮助设计者明确优先改造对象并选择差异化策略。

### 3.3 支持认知情感和偏好研究, 实现原位即时评估和特征提取

空间认知体验研究于1960年代城市意象理论提出后得到关注。20世纪80、90年代, 随着环境偏好、注意力恢复及压力缓解等理论提出, 为从心理学角度进行场所景观的认知评价提供了支持。相关研究通常借助实地或图片观看的形式, 采用排序或感知量表进行感知评价。但单一基于心理学指标的研究往往难以落地, 如何在空间规模内探析多数人群的偏好分布? 影响认知体验的空间元素是什么? 随着地方依恋研究由地理学应用于场所尺度, 场所依恋也逐渐成为认知领域的重要研究议题, 但传统量表方式存在情感数据与空间数据的脱节问题。

#### 3.3.1 直观测度公众偏好感知, 提取空间偏好特征

情绪识别技术和眼动仪可解决“如何测度”偏好感知的问题。面部表情结合神经网络模型可通过识别情绪效价和唤醒程度以反映偏好感知, 也有研究直接基于Face++、FaceReader等人工智能开放平台进行分析<sup>[34]</sup>。数字技术还可将人们对环境的偏好体验从心理学层面直观呈现为空间分布, 为建立感知体验与场所内部特征及周边建成环境的联系奠定了基础<sup>[35]</sup>。情绪分析拓宽了横截面时间下的偏好研究规模<sup>[36]</sup>, 更有助于帮助监测和识别儿童等弱势群体的环境偏好<sup>[37]</sup>。已有多项研究分析眼动仪的眼动指标与认知偏好之间的相关性, 发现被试者较小的平均横向视觉跨度、平均纵向视觉跨度和平均瞳孔直径等眼球运动指标与较高的心理认知评价显著相关<sup>[38]</sup>。也有研究指出平均注视时长和平均注视次数与景观偏好的关系<sup>[39]</sup>, 部分学者则认为二者并不存在相关性<sup>[18, 40]</sup>。

机器学习通过偏好元素聚类为“如何提取”偏好特征提供了有效途径。通过谷歌云视觉、Clarifai和Azure等计算机视觉软件平台, 基于人工智能对社交媒体图片进行图像编码和聚类分析获得用户偏好的空间元素模式分类<sup>[41]</sup>, 也有学者基于多层级聚类分类器进一步对具有相似特点的均质化景观实现更为细致的元素分类<sup>[42]</sup>; 文本信息挖掘也是偏好提取途径之一, 通过提取社交媒体中与正面感知对应的高频词, 使用机器学习将非结构化词转化为结构化的环境特征集群<sup>[43]</sup>。偏好特征的提取有

助于快速分析某一场地的主要偏好因素, 为场地设计或改造提供有效信息。

#### 3.3.2 支持环境恢复性研究, 提供恢复环境和指标测度

虚拟技术提供了具有逃离性、魅力性、延展性和兼容性的环境实验条件。与图片相比, VR体验可实现与自然高度相似的空间体验<sup>[44]</sup>, 有效改善心理健康、减轻疼痛和缓解压力。与现场实验相比, 一是可通过控制其他感官特征实现更高的内部有效性; 二是可基于关注的空间特征组合进行混合因子设计, 对空间要素进行排列组合并生成场景模型, 减少无关因素干扰, 获得最佳组合场景模式, 如街道不同绿视率与界面的组合研究<sup>[45]</sup>, 以及广场植物围护的不同排列方式和渗透率的组合研究<sup>[46]</sup>。

可穿戴设备相比感知恢复量表调查, 其测度即时、精准、动态, 避免了受试者的回忆扭曲。环境恢复性效益主要表现在注意力恢复测度和压力缓解测度两个方面。注意力恢复理论(Attention Restoration Theory, ART)指出, 注意力分为自愿和非自愿, 前者基于兴趣, 后者则基于努力。眼球运动和脑电波可反映观看时注意力的情况, 眼动研究发现低魅力空间的注视次数和扫视距离明显高于高魅力空间<sup>[47]</sup>; 脑电研究中观察图片相比于真实环境会导致更大的 $\alpha$ 脑波活动(表明低觉醒和放松状态), 而 $\gamma$ 则与低恢复环境中较大费力注意力需求有关<sup>[48]</sup>,  $(\alpha + \theta)/\beta$ 组合的疲劳因子测度也可以反映注意力恢复情况<sup>[49, 50]</sup>。压力缓解理论(Stress Reduction Theory, SRT)指出自然环境对于改善个体压力或应激状态具有积极作用, 可穿戴生理监测设备保证了体验的连续性和真实性。通常利用皮肤电传感器(皮电活动EDA)<sup>[51]</sup>、肌电传感器(肌电反馈EMG)<sup>[44]</sup>和心电传感器(心率HR、心率变异性HRV和血容量脉搏BVP)<sup>[52]</sup>, 通过单一或组合的方式实时反映空间元素引起的个体压力变化。

#### 3.3.3 连接空间点位置与场所情感, 实现原位情感评估

有学者指出“对特定场所的依恋”和“对场所内部特殊地点的依恋”的研究至关重要<sup>[53]</sup>。基于社交媒体数据和机器学习的文本语义分析实现了特定场所的情感空间分布研究<sup>[54]</sup>, 并明晰了与情感相关的空间特征或社会因素, 但在更细粒度上仍受限于定位精度和评论数量。

公众参与地理信息系统技术(Public Participation Geographic Information System, PPGIS)的快速发展为缝合情感与场所特殊地点提供了技术支撑, 荷兰VU大学开发PPGIS移动应用程序Mijn Park(My Park)并被用于多个实践调研<sup>[55, 56]</sup>, 可获得更细微的偏好感知反映。已有学者利用PPGIS将场所依恋量表与空间地点链接, 引入情感记忆衰减曲线模拟场所依恋强度在空间感知范

围内的衰减过程<sup>[57]</sup>，通过可视化制图展现场所依恋强度在特定空间范围内的动态变化过程，并比较了场所不同地点的依恋程度差异与原因。

### 3.4 实现行为的时空监测分析，拓展模拟仿真的行为最优化研究

多年来，行为分析及其与场所的关联研究始终是研究热点之一，主要涵盖运动轨迹和活动类型。扬·盖尔( Jan Gehl )于1970年代提出“公共空间 – 公共生活调研法”( Public Space & Public Life Survey )，其中行为映射法和动线观察法成为行为研究的主要方法，易受限于调研规模和人力物力，大数据虽然可扩展到城市尺度开展时空行为分析，在中微观空间上却难以实现精度要求。

#### 3.4.1 行为特征描述与解析

在运动轨迹和活动动作方面，运动轨迹代表了人们在运动中受到空间环境和感知影响下的决策行为，基于动线观察法可分为轨迹路线、行走速度、停留时间、人流计数4个方面。Wi-Fi探针和GPS的技术主要用于运动轨迹提取，通过轨迹聚类算法获取代表性的人流路线<sup>[58]</sup>。摄影视频结合深度学习则可细微观察行为决策与空间特征之间的关系，如丁绍刚探讨了游客的驻点时间规律<sup>[59]</sup>，发现路径可达性和景观丰富度高则是高等级驻点的必备条件；Xu等分析了环境因素（空间边界、障碍物、吸引物和道路中线）对行人轨迹的影响机制，通过感知环境场计算实现精确的行人运动线控制<sup>[60]</sup>；Kang等基于无人机摄影揭示了声音和食物气味对行走速度的影响<sup>[61]</sup>。基于摄影和机器学习可进行动态人流量计数和时空立体可视化<sup>[62]</sup>，近年来也有学者提出利用街景图像和机器学习替代实测步行流量，使人流计数异地研究成为可能<sup>[63]</sup>。

在活动分布上，Wi-Fi探针和实时腾讯用户密度数据(RTUD)为整体空间尺度下连续的时空分布特征研究提供了有效途径<sup>[64]</sup>，不仅是对定性研究的拓展，密度的动态变化也可完善开放空间活力稳定性的计量模型。在活动类型上，无人机拍摄结合GIS可形成大尺度空间活动数字编码地图<sup>[65]</sup>，有效扩充了行为映射调研法的位置准确度和标记便捷性<sup>[66]</sup>。实地摄像更适用于特定人群或模式的行为研究<sup>[67]</sup>，如校园绿化前后儿童游戏与非游戏行为的比较<sup>[68]</sup>、旧城空间老年人日常行为频率分析等研究<sup>[69]</sup>，打破了行为研究的时间横截面限制，聚焦固定情境下环境因素时间变化对行为的影响，并为时间维度下的纵向追踪研究提供支撑。

#### 3.4.2 行为仿真模拟分析

最初的元胞自动机模型和社会力量模型主要通过

与环境边界和其他行人的力学作用再现行人的自组织运动模式<sup>[70, 71]</sup>。空间句法的可视图分析(Visibility graph)基于“外体视觉体系架构”开始将视觉感知引入行为模拟中，但是模型环境中的所有其他物体都会被视为障碍物<sup>[72]</sup>。

对此，有学者基于主体模型( Agent-based Modeling, ABM )模拟行人和环境刺激因素之间的作用关系模拟行为轨迹<sup>[73]</sup>。主体建模通过概念认知框架融入人类的感知偏好，不仅可以引入视觉感知，还可加入个体可达感知<sup>[74]</sup>、偏好因素<sup>[75]</sup>和热舒适因素<sup>[76]</sup>，利用算法迭代使智能体在空间和时间上自适应地做出行为决策，为最优空间策略选择提供支持。Berfin Yıldız基于模糊逻辑的模拟系统，通过定义个人特征模拟城市空间中的不同用户移动路径，为老年人与年轻人、当地人与游客的运动流管理提供了实用解决方案<sup>[77]</sup>；Jonatan Almagor基于社会生态模型框架模拟儿童在城市环境中的日常活动，探索在个人、社会环境、城市环境和政策层面如何进行干预以提高儿童的中高强度体力活动水平<sup>[75]</sup>；朱顺杰基于“信念 – 愿望 – 意图”( BDI, Rao and Georgeff, 1991 )框架，从空间布局、环境设施、使用功能三个角度探寻住区户外公共空间的活力最优解<sup>[74]</sup>。

## 4 数字技术辅助的空间体验研究趋势

### 4.1 空间体验耦合研究逐步系统化

如今，环境感知对行为的影响及行为对空间的影响已日益受到学者关注。以往研究主要聚焦于单一空间中的行为分析或感知分析，通过问卷或实地观察获得行为和感知体验特征，以定性的感知体验作为中介变量进行探讨，难以把感知要素落地到实体空间中。

数字化技术通过行为与感知测度和空间可视分析，为“空间 – 感知 – 行为”三者的系统耦合研究提供了可能性。可穿戴式相机可用于获取用户轨迹行为<sup>[78]</sup>，并通过对图像的机器学习分析感知对象、视线、意象结构等视觉感知。多技术组合方式也已用于感知与行为的交互研究，如眼动仪结合手持GPS工具，对行进、停留等轨迹行为或转头、抬头等肢体行为进行编码与空间标记；手机GPS结合公众参与PPGIS的情绪量表或生理传感器也是常用的测度方法。通过可视化工具可实现感知与行为体验的空间叠合分析，如 WebGL 等 3D 数字化展示平台可实现空间轨迹上更动态立体的感知体验展示。同时，基于ABM等工具的行为仿真及基于深度学习的感知预测方法，为感知、行为与空间的双维互动提供了基础，完善了空间体验的闭环研究。

数字技术介入下, 感知体验内部系统之间的逻辑关系更加明晰, 基于空间特征的影响解析也更深入。已有研究探讨感官体验如何引导人们对空间的认知和判断, 如基于等视域分析和可穿戴设备探索街道视觉目标距离、视觉体积等与行人情绪的关系<sup>[12]</sup>, 基于眼动仪和生理设备测度视觉要素感知对恢复性效益的影响。也有学者基于双耳录音和情绪识别技术进行听觉偏好研究<sup>[34]</sup>; 目前感觉-知觉研究通常将知觉与认知指标结合在一起, 通过机器学习进行相关分析<sup>[10]</sup>; 虚拟现实技术是知觉-认知研究的主要方式, 可通过控制变量的环境减少其他因素干扰。

#### 4.2 技术测度方法趋向精细化

数字化技术的快速发展, 带来了测度方式的日益精细化。机器学习工具可细分为图像分类(卷积神经网络)、轨迹跟踪(Yolo-v3 算法、ViBe 算法)、动作识别(深度卷积神经网络)、预测(深度卷积神经网络、人工神经网络)、聚类、自然语言处理(支持向量机、随机森林、深度学习)几类功能指标, 眼动仪细分包括注视类、扫视类和瞳孔类三类眼动数据, 可穿戴生理设备中, 脑电工具的单一  $\alpha$ 、 $\gamma$  和因子组合也分别表示不同的感知体验。复杂细致的指标测度为精准研究提供了保证, 但这也是对研究人员的挑战, 需明晰各类技术操作和指标应用条件进行合理选择。

另一方面, 技术与空间体验因子之间存在多重映射关系, 每个体验因子与多个技术相对应, 未来可根据因

子的测度需要, 匹配最合适的技术(图 7)。每个技术本身可测度的内容维度也在增加, 已有学者利用眼动仪、虚拟现实、可穿戴相机等单个技术实现感觉到认知乃至行为的整套交互研究流程, 为低成本、高效率的实验研究提供了有力支持。

#### 4.3 空间特征分析趋向多元化

空间尺度方面, 传统研究主要聚焦建成环境密度、质量等易调研和量化的数据, 数字技术助力实现了更微观和更宏观的空间特征分析。眼动技术、摄影分析、虚拟现实等技术可聚焦空间要素的类型、色彩、形态及不同要素的组合形式, 深入探讨其与行为感知的关系; 无人机、Wi-Fi 探针等则通过勾勒空间行为分布全貌, 实现整体空间形态、空间类型分布和设施位置分布的相关研究。

空间维度方面, 由注重单一视觉特征扩展到多维度体验城市空间。虚拟现实和深度学习为多感官交互设计提供了便捷条件, 已有学者开展视听结合的城市空间体验研究, 发现声音强度的听觉特征、动态视觉特征和静态视觉特征会对活力、美丽、烦恼等不同感知指标产生不同影响; 部分学者在 VR 实验中加入嗅觉要素, 如采用计算机控制气味显示器或在头戴显示器上附着气味棉垫的方式。结合声光热等物理环境的体验研究也得以开展, 如声景-光景<sup>[79]</sup>、视景-微气候<sup>[80]</sup>、视景-声景-微气候<sup>[81]</sup>等感知效应叠加分析。

#### 4.4 体验研究方式逐步动态化

数字化技术提供了“不在场”的研究环境支持, 由静态图片的体验条件转向支持动态连续视觉感知的体验条件, 如以 3D 建模或步行速度拍摄的 360° 视频结合 VR 虚拟进行动态实验, 从而实现不同运动速度<sup>[14]</sup>、光影变化、动态声音下的空间感知体验研究。也有学者通过计算机模拟捕捉既定路线上连续视点的实时图像<sup>[14]</sup>, 描述运动速度、视觉高度和视角变化引起的空间体验差异, 从而量化步行、骑行、划船等不同运动类型下的动态视觉感知, 并综合考虑了视野的连续性和运动系统的完整性。

除塑造动态的体验氛围, 时间的动态变化也逐渐被纳入研究范围内。有学者基于人工神经网络, 结合城市声景认知可持续性的最佳时间长度, 长时模拟城市动态声景并预测其对居民感知的影响<sup>[79]</sup>。虚拟现实可以实现声音的可控性, 明晰不同时长对感知带来的不同影响<sup>[34]</sup>。也有研究结合数学算法和全景模拟, 发现体验时间对绿视体验具有重要影响, 提出了加入体验时间权重系数的动态绿视率模型<sup>[82]</sup>。

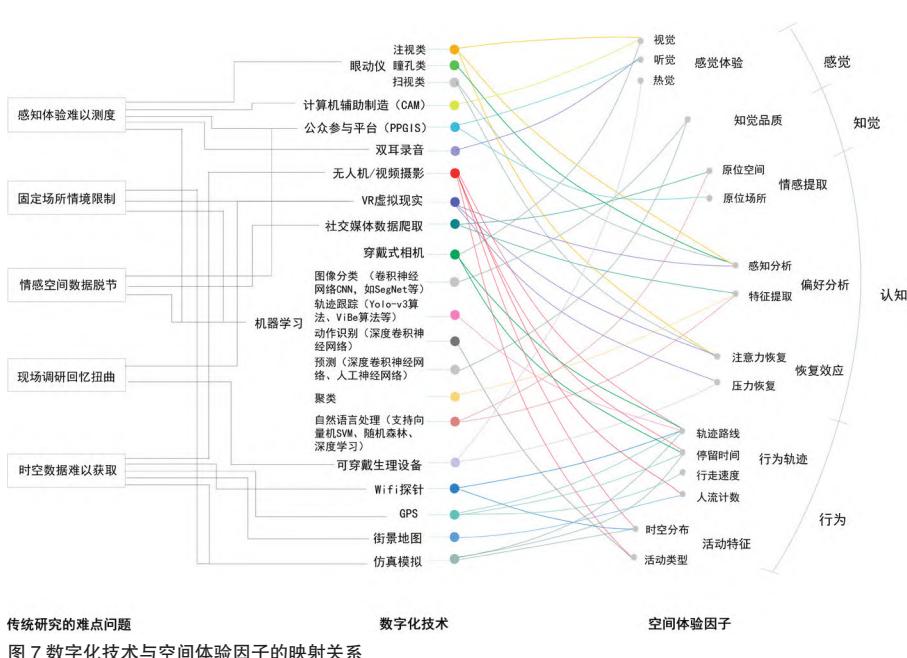


图 7 数字化技术与空间体验因子的映射关系

## 总结与展望

21世纪以来涌现的新兴工具为城市公共空间体验研究提供了新的视角和途径，本研究从传统研究遇到的难点问题出发，数字化技术从体验特征描述、空间关联解析和体验预测模拟3个层次提供支持路径。通过梳理相关研究的发展脉络可见，国内外的数字化技术均首先应用于行为体验研究，渐而介入感知体验领域，并于2018年左右进得以广泛应用。面对现今纷繁涌现的技术工具，研究者应避免陷入技术至上的误区，基于该领域的研究本质和理论体系选择合适工具进行突破创新。此外，技术工具如何与传统研究方法结合仍然是研究者需要思考的问题，依赖单一技术工具仍需谨慎，如有学者指出社交媒体的图片偏好提取和实地偏好调查仍存在差异<sup>[83]</sup>。结合数字化技术在空间体验方面的研究进展，未来可进一步关注3个方面的研究：一是研究对象上，关注诸如视觉退化的老年人、听觉与语言障碍者等特殊感应群体，模拟环境、可穿戴生理设备、面部表情识别等工具为探讨对其感知体验最佳的物理环境条件提供了独特优势；二是研究内容上，目前空间的关联解析仍主要集中于变量间的数理统计分析，可结合场所的长时监测技术和人工智能等工具，探讨空间要素及布局对人的感知体验和行为轨迹的实时动态变化影响，并结合社交活动等日常生活元素展开多层次的场所要素讨论；三是内在机理上，目前的研究仍以“空间—感知—行为”的单向逻辑链条为主，可更深入地探索基于空间特征影响下的行为与感知的双向交互体验，借助新兴工具实现最终的空间体验研究闭环。■

## 图、表来源

文中所有图片均由作者绘制。

## 参考文献

- [1] 王一睿, 周庆华, 杨晓丹, 等. 城市公共空间感知的过程框架与评价体系研究 [J]. 国际城市规划, 2022, 37 (5) : 80-89.
- WANG Yirui, ZHOU Qinghua, YANG Xiaodan, et al. Research on Process Framework and Evaluation System of Urban Public Spatial Perception [J]. Urban Planning International, 2022, 37(5): 80-89.
- [2] Carlos Smaniotto Costa, Joana Solipa Batista, Inês Almeida, et al. Exploring teenagers' spatial practices and needs in light of new communication technologies [J]. Cities, 2020, 98: 102574.
- [3] Ayat Abdel-Aziz, Hassan Abdel-Salam, Zeyad El-Sayad. The role of ICTs in creating the new social public place of the digital era [J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55(1): 487-493.
- [4] C Certomà, Dyer M, Pocatilu L, et al. Digital Tools for Capturing User's Needs on Urban Open Spaces: Drawing Lessons from Cyberparks Project [M]// Certomà C, Dyer M, Pocatilu L, Rizzi F: Citizen Empowerment and Innovation in the Data-Rich City, 2017:177-193.
- [5] 陈志敏, 黄铭, 黄莹, 等. 街道空间宜步行性的精细化测度与导控——基于虚拟现实与可穿戴生理传感器的循证分析 [J]. 中国园林, 2022, 38 (1) : 70-75.
- CHEN Zhimin, HUANG Rong, HUANG Ying, et al. The Measurements of Fine-scale Street Walkability and Precise Design Control: An Evidence-based Approach Based on Virtual Reality and Wearable Bio-sensors [J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38(1): 70-75.
- [6] 刘为力. 试论空间体验的内涵 [J]. 建筑与文化, 2012 (2) : 104-106.
- LIU Weili. On the Connotation of Space Experience [J]. Architecture & Culture, 2012(2): 104-106.
- [7] 莫里斯·梅洛-庞蒂. 知觉现象学 [M]. 姜志辉, 译. 北京: 商务印书馆, 2001: 138.
- MAURICE Merleau-Ponty. Phénoménologie de la perception [M]. Translated by JIANG Zhihui. Beijing: The Commercial Press, 2001:138.
- [8] 张利, 谢祺旭, 邓慧姝, 等. 空间体验实证的人因分析技术路径 [J]. 世界建筑, 2022 (9) : 42-47.
- ZHANG Li, XIE Qixu, DENG Huishu, et al. An Ergonomic Analysis Approach for Spatial Experience Proof [J]. World Architecture, 2022(9): 42-47.
- [9] 周庆华, 王一睿. 基于感知维度的城市设计思考 [J]. 规划师, 2021, 37 (16) : 73-77.
- ZHOU Qinghua, WANG Yirui. Perception Oriented Urban Design [J]. Planners, 2021, 37(16): 73-77.
- [10] Deepank Verma, Arnab Jana, Krithi Ramamritham. Predicting human perception of the urban environment in a spatiotemporal urban setting using locally acquired street view images and audio clips [J]. Building and Environment, 2020, 186: 107340.
- [11] Hyun In Jo, Jin Yong Jeon. The influence of human behavioral characteristics on soundscape perception in urban parks: Subjective and observational approaches [J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 203: 103890.
- [12] XIANG Luyao, CAI Meng, REN Chao, et al. Modeling pedestrian emotion in high-density cities using visual exposure and machine learning: Tracking real-time physiology and psychology in Hong Kong [J]. Building and Environment, 2021, 205: 108273.
- [13] Rongrong Yu, Michael J. Ostwald. Spatio-visual experience of movement through the Yuyuan Garden: A computational analysis based on isovists and visibility graphs [J]. Frontiers of Architectural Research, 2018, 7(4): 497-509.
- [14] JIN Xin, WANG Jianguo. Assessing Linear Urban Landscape from dynamic visual perception based on urban morphology [J]. Frontiers of Architectural Research, 2021, 10(1): 202-219.
- [15] Marco Amati, Ebadat Ghanbari Parmehr, Chris McCarthy, et al. How eye-catching are natural features when walking through a park? Eye-tracking responses to videos of walks [J]. Urban Forestry &

- Urban Greening, 2018, 31: 67-78.
- [16] Ruoshi Z. Integrating ergonomics data and emotional scale to analyze people's emotional attachment to different landscape features in the Wudaokou Urban Park[J]. Frontiers of Architectural Research, 2023, 12(1): 175-187.
- [17] LI Jie, ZHANG Zhonghao, Ma Jianyu, et al. An evaluation of urban green space in Shanghai, China, using eye tracking[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 56: 126903.
- [18] YU Gao, TONG Zhang, Weikang Zhang, et al. Research on visual behavior characteristics and cognitive evaluation of different types of forest landscape spaces[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 54: 126788.
- [19] Lien Dupont, Kristien Ooms, Marc Antrop, et al. Comparing saliency maps and eye-tracking focus maps: The potential use in visual impact assessment based on landscape photographs[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 148: 17-26.
- [20] Tan Johann Kay Ann, Hasegawa Yoshimi, Lau Siu-Kit, et al. The effects of visual landscape and traffic type on soundscape perception in high-rise residential estates of an urban city[J]. Applied Acoustics, 2022, 189: 108580.
- [21] 李春明, 张会. 城市声景观参与式感知客户端软件研制 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40 (S2) : 264-268.
- LI Chunming, ZHANG Hui. Development of Mobile Application for Urban Participatory Soundscape Sensing[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40 (S2) : 264-268.
- [22] Silviya Korpilo, Elina Nyberg, Kati Vierikko, et al. Developing a Multi-sensory Public Participation GIS (MSPPGIS) method for integrating landscape values and soundscapes of urban green infrastructure[J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 230: 104617.
- [23] Ilaria Pigliautile, Samuele D' Eramo, Anna Laura Pisello. Intra-urban microclimate mapping for citizens' wellbeing: Novel wearable sensing techniques and automatized data-processing[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123748.
- [24] Nakayoshi Makoto, Kanda Manabu, Shi Rui, et al. Outdoor thermal physiology along human pathways: a study using a wearable measurement system[J]. International journal of biometeorology, 2015, 59(5): 503-515.
- [25] Peng Zhikai, Bardhan Ronita, Ellard Colin, et al. Urban climate walk: A stop-and-go assessment of the dynamic thermal sensation and perception in two waterfront districts in Rome, Italy[J]. Building and Environment, 2022, 221: 109267.
- [26] Liu M, Nijhuis S. Mapping landscape spaces: Methods for understanding spatial-visual characteristics in landscape design[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2020, 82: 106376.
- [27] Ma Xiangyuan, Ma Chenyan, Wu Chao, et al. Measuring human perceptions of streetscapes to better inform urban renewal: A perspective of scene semantic parsing[J]. Cities, 2021, 110: 103086.
- [28] Fan Zhang, Bolei Zhou, Liu Liu, et al. Measuring human perceptions of a large-scale urban region using machine learning[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 180: 148-160.
- [29] Ramírez Tomás, Hurtubia Ricardo, Lobel Hans, et al. Measuring heterogeneous perception of urban space with massive data and machine learning: An application to safety[J]. Landscape and Urban Planning, 2021, 208: 104002.
- [30] Wenping Li, Xuyu Hu, Ziliang Sun, et al. Identifying the integrated visual characteristics of greenway landscape: A focus on human perception[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 99: 104937.
- [31] Xiaochun Q, Mengjie F, Dongxiao Y, et al. Quantitative evaluation of attraction intensity of highway landscape visual elements based on dynamic perception[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 100: 107081.
- [32] Xudong Z, Shengwei E, Yok P T, et al. Assessment of visual landscape quality of urban green spaces using image-based metrics derived from perceived sensory dimensions[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 102: 107200.
- [33] Yao Yao, Liang Zhaotang, Yuan Zehao, et al. A human-machine adversarial scoring framework for urban perception assessment using street-view images[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019, 33(12): 2363-2384.
- [34] Qi Meng, Xuejun Hu, Jian Kang, et al. On the effectiveness of facial expression recognition for evaluation of urban sound perception[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 135484.
- [35] 陈崇贤, 李海薇, 林晓玲, 等. 基于计算机视觉的夜间户外环境情绪感知特征研究 [J]. 中国园林, 2023, 39 (2) : 20-25.
- CHEN Chongxian, LI Haiwei, LIN Xiaoling, et al. Measuring the effect of nightscapes on emotion perceptions based on computer vision[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(2): 20-25.
- [36] 朱逊, 张冉, 赵晓龙. 影响公众情绪偏好的城市蓝色空间特征识别研究——以松花江流域为例 [J]. 中国园林, 2021, 37 (8) : 50-55.
- ZHU Xun, ZHANG Ran, ZHAO Xiaolong. Blue Space Characteristics Recognition Based on Public Emotion: A Case Study of Songhua River Basin[J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(8): 50-55.
- [37] Abusaada Hisham, Elshater Abeer, Abd Elrahman Ahmed S. Articulating assemblage theory for salient urban atmospheres in children's environments[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2020, 12(2): 2331-2343.
- [38] LIU Qunyue, ZHU Zhipeng, ZENG Xianjun, et al. The impact of landscape complexity on preference ratings and eye fixation of various urban green space settings[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 66: 127411.
- [39] Zheng Junming, Tarin M W K, Jiang Denghui, et al. Which ornamental features of bamboo plants will attract the people most?[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 61: 127101.
- [40] Wang Ying, Sparks, Beverley A. An Eye-Tracking Study of Tourism

- Photo Stimuli: Image Characteristics and Ethnicity[J]. Journal of travel research: The International Association of Travel Research and Marketing Professionals, 2016, 55(5): 588–602.
- [41] Ghermandi Andrea, Depietri Yaella, Sinclair Michael. In the AI of the beholder: A comparative analysis of computer vision-assisted characterizations of human–nature interactions in urban green spaces[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 217: 104261.
- [42] 施佳颖, 本條毅, 矢泽优里子, 等. 利用游客受雇拍摄法和云图标注应用程序接口探究均质化景观的识别与分类——以日本东京桥区河流景观为例 [J]. 景观设计学 (中英文), 2021, 9 (5) : 12–31.
- SHI Jiaying, HONJO Tsuyoshi, YAZAWA Yuriko, et al. Recognition and Classification of Homogeneous Landscape With Visitor-Employed Photography and Cloud Image Annotation API: An Example of the Riverscape in Nihonbashi, Tokyo, Japan[J]. Landscape Architecture Frontiers, 2021, 9(5): 12–31.
- [43] Huai Songyao, Van de Voorde Tim. Which environmental features contribute to positive and negative perceptions of urban parks? A cross-cultural comparison using online reviews and Natural Language Processing methods[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 218: 104307.
- [44] Chunyen Chang, Pingkun Chen, William E, et al. Psychophysiological responses and restorative values of natural environments in Taiwan[J]. Landscape and Urban Planning, 2008, 85(2): 79–84.
- [45] 徐磊青, 孟若希, 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 Leiqing, MENG Ruoxi, HUANG Shuqing, et al. Healing Oriented Street Design: Experimental Explorations via Virtual Reality[J]. Urban Planning International[J]. 2019, 34(1): 38–45.
- [46] Payam Tabrizian, Perver K Baran, William R, et al. Exploring perceived restoration potential of urban green enclosure through immersive virtual environments[J]. Journal of Environmental Psychology, 2018, 55: 99–109.
- [47] Rita Berto, Stefano Massaccesi, Margherita Pasini. Do eye movements measured across high and low fascination photographs differ? Addressing Kaplan's fascination hypothesis[J]. Journal of Environmental Psychology, 2007, 28(2): 185–191.
- [48] Wei Lin, Qibing Chen, Mingyan Jiang, et al. The effect of green space behaviour and per capita area in small urban green spaces on psychophysiological responses[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 192: 103637.
- [49] 薛馨. 基于单极脑电技术的游客森林景观审美疲劳分析 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- XUE Xin. A Study on aesthetic fatigue of Forest Landscapes of tourists based on EEG[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [50] 李哲, 陈菲菲, 韩笑, 等. 基于脑电分析技术的景观关注度主成分量化解析——以南京市玄武湖公园为例 [J]. 中国园林, 2021, 37 (7) : 60–65.
- LI Zhe, CHEN Feifei, HAN Xiao, et al. The Principal Component Quantitative Analysis of Landscape Attraction Based on the EEG Technology—Taking Xuanwu Lake Park of Nanjing as the Example[J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(7): 60–65.
- [51] Liu Linghan, Qu Haiyan, Ma Yimeng, et al. Restorative benefits of urban green space: Physiological, psychological restoration and eye movement analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113930.
- [52] Daniel Paül i Agustí, Jaume Rutllant, José Lasala Fortea. Differences in the perception of urban space via mental maps and Heart Rate Variation (HRV) [J]. Applied Geography, 2019, 112: 102084.
- [53] 林广思, 吴安格, 蔡珂依. 场所依恋研究: 概念、进展和趋势 [J]. 中国园林, 2019, 35 (10) : 63–66.
- LIN Guangsi, WU Ange, CAI Keyi. Research on Place Attachment: Concept, Progress and Trend[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(10): 63–66.
- [54] Kong Lingqiang, Liu Zhifeng, Pan Xinhao, et al. How do different types and landscape attributes of urban parks affect visitors' positive emotions? [J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 226: 104482.
- [55] Schrammeijer Elizabeth A, van Zanten Boris T, Davis Jac, et al. The advantage of mobile technologies in crowdsourcing landscape preferences: Testing a mobile app to inform planning decisions[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 73: 127610.
- [56] E A Schrammeijer, B T van Zanten, P H Verburg. Whose park? Crowdsourcing citizen's urban green space preferences to inform needs-based management decisions[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103249.
- [57] 姜宏, 邵龙. 基于PPGIS的场所依恋综合测量方法探索——以长春水文化生态园为例 [J]. 中国园林, 2021, 37 (12) : 64–69.
- JIANG Hong, SHAO Long. Mapping and Measuring Place Attachment Based on Public Participation GIS: A Case Study of Changchun Culture of Water Ecology Park[J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(12): 64–69.
- [58] Salazar Miranda Arianna, Fan Zhuangyuan, Duarte Fabio, et al. Desirable streets: Using deviations in pedestrian trajectories to measure the value of the built environment[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 86: 101563.
- [59] 丁绍刚, 杨赟, 刘璎瑛, 等. 基于游人游赏行为的留园驻点分布规律研究 [J]. 中国园林, 2018, 34 (7) : 116–122.
- DING Shaogang, YANG Yun, LIU Yingying, et al. Study on Regularities of Stationary Points Distribution in Liu Garden Based on Visitors' Tour Behaviors[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(7): 116–122.
- [60] Wei Wenhan, Deng Yuqiao, Huang Liyun, et al. Environment-deterministic pedestrian behavior? New insights from surveillance video evidence[J]. Cities, 2022, 125: 103638.
- [61] Meihui Ba, Jian Kang, Zhongzhe Li. The effects of sounds and

- food odour on crowd behaviours in urban public open spaces[J]. Building and Environment, 2020, 182: 107104.
- [62]Dobler Gregory, Vani Jordan, Dam Trang Tran Linh. Patterns of urban foot traffic dynamics[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 89: 101674.
- [63]Chen Long, Lu Yi, Ye Yu, et al. Examining the association between the built environment and pedestrian volume using street view images[J]. Cities, 2022, 127: 103734.
- [64]Xinyu Hu, Peiyu Shen, Yi Shi, et al. Using Wi-Fi probe and location data to analyze the human distribution characteristics of green spaces: A case study of the Yanfu Greenland Park, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 54: 126733.
- [65]Park Keunhyun, Christensen Keith, Lee Doohong. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Behavior Mapping: A Case Study of Neighborhood Parks[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 52: 126693.
- [66]赵晓龙,徐靖然,刘笑冰,等.基于无人机(UAV)观测的寒地城市公园冬季体力活动及空间分布研究——以哈尔滨四个公园为例[J].中国园林,2019,35(12):40-45.
- ZHAO Xiaolong, XU Jingran, LIU Xiaobing, et al. Observations of Winter Physical Activities in Urban Parks Using UAVs: A Case Study of Four City Parks in Harbin[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(12): 40-45.
- [67]黄子洛,傅伟聪,赵誉洁,等.全景相机观测公众绿地游憩行为的应用分析[J].中国园林,2023,39(7):83-88.
- HUANG Ziluo, FU Weicong, ZHAO Yujie, et al. The Application of Panoramic Technology for Measuring Park-based Recreational Behavior[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(7): 83-88.
- [68]van Dijk Wesselius Janke E, Maas Jolanda, van Vugt Mark, et al. A comparison of children's play and non-play behavior before and after schoolyard greening monitored by video observations[J]. Journal of Environmental Psychology, 2022, 80: 101760.
- [69]Xuyang Sun, Lijun Wang, Fei Wang, et al. Behaviors of seniors and impact of spatial form in small-scale public spaces in Chinese old city zones[J]. Cities, 2020, 107: 102894.
- [70]Min Zhou, Hairong Dong, Fei Yue Wang, et al. Modeling and simulation of pedestrian dynamical behavior based on a fuzzy logic approach[J]. Information Sciences, 2016, 360: 112-130.
- [71]Keke Huang, Xiaoping Zheng, Yuan Cheng, et al. Behavior-based cellular automaton model for pedestrian dynamics[J]. Applied Mathematics and Computation, 2017, 292: 417-424.
- [72]Turner Alasdair, Doxa Maria, O'Sullivan David, et al. From Isovists to Visibility Graphs: A Methodology for the Analysis of Architectural Space[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001, 28(1): 103-121.
- [73]W L Wang, S M Lo, S B Liu, et al. Microscopic modeling of pedestrian movement behavior: Interacting with visual attractors in the environment[J]. Transportation Research Part C, 2014, 44: 21-33.
- [74]朱顺杰. 基于主体建模方法的住区户外公共空间活力模拟研究:以宁波市新建住区为例[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHU Shunjie. Research on the vitality simulation of outdoor public space in residential areas based on agent based modeling: Cases study of new residential areas in ningbo[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [75]Jonatan Almagor, Martin Anne, McCrorie Paul, et al. How can an agent-based model explore the impact of interventions on children's physical activity in an urban environment? [J]. Health and Place, 2021, 72: 102688.
- [76]Tingting Xu, Ziyu Tong, Sha Xu. Integration of Microclimate into the Multi-Agent System Simulation in Urban Public Space[J]. Smart Cities, 2019, 2(3): 421-432.
- [77]Berfin Yıldız A B, Ga A. Fuzzy logic in agent-based modeling of user movement in urban space: Definition and application to a case study of a square[J]. Building and Environment, 2020, 169: 106597.
- [78]张昭希, 龙瀛. 穿戴式相机在研究个体行为与建成环境关系中的应用[J]. 景观设计学, 2019, 7(2): 22-37.
- ZHANG Zhaoxi, LONG Ying. Application of wearable cameras in studying individual behaviors in built environments[J]. Landscape Architecture Frontiers[J]. 2019, 7(2): 22-37.
- [79]洪昕晨, 黄圳, 王光玉, 等. 城市公园声景长时感知模型研究——以加拿大温哥华3个城市公园为例[J]. 风景园林, 2022, 29(3): 86-91.
- HONG Xinchen, HUANG Zhen, WANG Guangyu, et al. Modeling Long-Term Perceived Soundscape in Urban Parks: A Case Study of Three Urban Parks in Vancouver, Canada[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(3): 86-91.
- [80]韩贵锋, 王运鑫, 程晓雪. 城市公园景观感知效应动态评价方法——基于景观视觉与热舒适性的叠加研究[J]. 中国园林, 2021, 37(5): 38-43.
- HAN Guifeng, WANG Yunxin, CHENG Xiaoxue. A Dynamic Evaluation Method of Landscape Perception in Urban Park: Based on Combining Landscape Vision and Thermal Comfort[J]. Chinese Landscape Architecture[J]. 2021, 37(5): 38-43.
- [81]Lyu Kun, de Dear Richard, Brambilla Arianna, et al. Restorative benefits of semi-outdoor environments at the workplace: Does the thermal realm matter? [J]. Building and Environment, 2022, 222: 109355.
- [82]徐跃家, 齐超杰, 冯昊, 等. 动态绿视率模型的探索与算法研究[J]. 城市发展研究, 2022, 29(1): 22-28.
- XU Yuejia, QI Chaojie, FENG Hao, et al. Exploration and algorithm research of dynamic green vision rate model[J]. Urban Development Research, 2022, 29(1): 22-28.
- [83]Wilkins Emily J, Van Berkel Derek, Zhang Hongchao, et al. Promises and pitfalls of using computer vision to make inferences about landscape preferences: Evidence from an urban-proximate park system[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 219: 104315.