

DOI: 10.20103/j.stxb.202310142229

张永霖, 王力, 董仁才, 付晓, 王辰星. 基于景感生态学的城市视觉感知量化研究——以北京市中心为例. 生态学报, 2024, 44(20): 9146-9158.

Zhang Y L, Wang L, Dong R C, Fu X, Wang C X. Quantitative study on urban visual perception based on landsenses ecology in Beijing city center. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9146-9158.

基于景感生态学的城市视觉感知量化研究 ——以北京市中心为例

张永霖¹, 王 力^{1,*}, 董仁才², 付 晓², 王辰星²

1 中国科学院空天信息创新研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 营造舒适、人性化的居住环境对于城市可持续发展十分重要。传统的城市感知研究主要采用现场调研、问卷调查、遥感反演等手段, 很难衡量并刻画居民对视觉环境的感知体验。鉴于此, 基于景感生态学理论构建了城市视觉感知(物理感知和心理感知)定量测度和耦合分析框架, 用于衡量人类视角下对城市建成环境的主观感受。该框架能够补充对城市微观空间格局的分析手段, 丰富对人类视角下物理和心理感知空间变化的认识、提升城市感知品质的空间格局识别和细节刻画能力、深入理解不同城市复合生态系统要素与居民感知的影响关联。以北京市中心为例, 构建了一套深度学习方法量化人类尺度的物理、心理感知测度方法。通过空间统计模型辨识物理感知以及城市复合生态系统要素对居民心理感知的作用强度。结果表明: 1) 树木可见度和归一化植被指数对于提升积极心理感知有帮助。2) 北京市中心的心理感知指数存在明显的空间聚集现象, 在“内-外”圈层和“南-北”城区上呈现明显差异。3) 深度学习和机器学习模型能够用于准确刻画城市物理和心理感知的空间格局。研究为城市街区尺度上的景感营造和生态规划提供了有价值的定量参考, 并且对可持续城市发展的智能管理具有积极意义, 为理解和塑造城市环境和人类福祉提供了新的视角。

关键词: 景感生态学; 街景图像; 人工智能; 城市可持续发展; 建成环境

Quantitative study on urban visual perception based on landsenses ecology in Beijing city center

ZHANG Yonglin¹, WANG Li^{1,*}, DONG Rencai², FU Xiao², WANG Chenxing²

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Space and Astronautical Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, China, Beijing 100101, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Ecological Environment Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Creating a living environment that is both comfortable and human-centric is of paramount importance for the sustainable development of cities. Traditional methods of studying urban perceptions, which typically involve field surveys, questionnaire surveys, and remote sensing inversion, often fall short when it comes to accurately measuring and portraying the perceptual experiences of residents in relation to their visual environment. To address this shortcoming, a new framework has been developed, grounded in the theory of Landsenses ecology. This framework provides a quantitative measurement and coupling analysis of urban visual perception, encompassing both physical and psychological aspects. The primary aim of this framework is to gauge the subjective feelings of individuals towards the built environment from a human perspective. This innovative framework offers several key advantages. Firstly, it supplements existing methods of analyzing urban micro-space

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3903702); 城市与区域生态国家重点实验室开放项目(SKLURE2022-2-5)

收稿日期: 2023-10-14; **网络出版日期:** 2024-07-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangli@radi.ac.cn

patterns, providing a more comprehensive understanding of the urban environment. Secondly, it enriches our understanding of changes in physical and psychological perceptual space from a human perspective. This is achieved by enhancing our ability to identify spatial patterns and detail depiction of urban perceptual quality. Lastly, it deepens our understanding of the complex relationships between different elements of urban composite ecosystems and residents' perceptions. The center of Beijing serves as a case study for the application of this framework. A set of deep learning approaches has been developed to quantify physical and psychological perception measurements at the human-scale. Following this, a spatial statistical model is employed to identify the intensity of the effects of physical perception and urban composite ecosystem elements on residents' psychological perception. The findings of this study are illuminating. Firstly, it was found that the visibility of trees (TREE) and the normalized difference vegetation index (NDVI) play a significant role in enhancing positive psychological perception. Secondly, a notable spatial clustering phenomenon was observed in the psychological perception index (PPI) in the center of Beijing. This phenomenon exhibited significant differences in the "inner-outer" layers and "south-north" urban areas. Lastly, it was demonstrated that deep and machine learning models can be effectively used to accurately depict the spatial patterns of urban physical and psychological perceptions. In conclusion, this study provides a valuable quantitative reference for the creation of landscapes creation and ecological planning at the urban block scale. It holds significant implications for the intelligent management of sustainable urban development, offering a novel perspective on how we understand and shape our urban environments and human well-beings.

Key Words: landscapes ecology; street view images; artificial intelligence; urban sustainability; built environment

作为城市复合生态系统中的重要组分,建成环境承载了美学欣赏、娱乐休憩和文化感知等服务,是保障居民生活和经济活动的重要基石。而快速城镇化和建成用地扩张对城市景观格局和居住品质产生巨大影响^[1-2]。房地产开发和建筑密集化挤压了自然生态和游憩空间,改变生态系统服务的空间格局、功能和动态^[3-4]。同时,居民的户外感知体验受到建成空间布局的影响。例如,钢筋混凝土建筑冲击着居民出行视觉观感,影响公共健康、社会活力和出行选择。因此,充分理解居民视角下的城市感知状况、准确识别空间规律、深入探讨城市感知与复合生态系统之间的影响关联,对于城市可持续发展具有重要意义。

城市感知是环境心理学的重要概念,其定义为:通过人类感知和认知系统对城市外部环境的物理配置、景观、形态和组分的主观感受。城市感知是人与城市环境之间交互过程的重要纽带,在人类改造生存环境、改善生活条件和享受精神生活方面有很大影响^[5]。通过定量手段刻画外部环境刺激和心理认知变化是环境心理学的重要研究内容。在城市工业化初期,关于人类感知的环境心理学研究更聚焦于个体层面。其中,心理物理学派通过统计实验证明了物理刺激与心理认知之间存在感知阈限和函数关系,并将人类感知划分为物理感知和心理感知,分别对应外界对人类感官的刺激以及心理认知反应。这对于在探讨人的物理和心理感知之间定量联系提供了重要基础。随着全球城市化发展,城市社会环境、自然环境与人类认知之间的客观联系和影响机制受到城市规划、生态学、社会学领域的共同关注^[6]。凯文·林奇的城市意象理论通过构建城市认知地图来刻画城市空间结构与居民认知体验之间的影响规律,并在此基础上引导规划目标向居民客观需求转变。然而,传统手段对城市感知的大规模定量评估仍存在一定困难,例如:城市环境的美与丑、安全与危险、活力与单调、开敞与压抑等二元心理状态很难被定量评价。因此,迫切地需要新的研究框架和定量手段对城市居民的物理和心理感知进行测度,以深入解释城市生态系统与居民心理感知之间的作用联系。

社会-经济-自然复合生态系统理论^[7]和景感生态学^[8]为我国城市可持续发展管理提供了重要途径。其中,城市复合生态系统是由人类社会、经济活动、自然条件共同组成形成的生态功能集合体。在复合生态系统理论的基础上,赵景柱先生提出了景感生态学的概念,其定义是:“以可持续发展为目标,基于生态学的基本原理,从自然要素、物理感知、心理感知、社会经济、过程与风险等相关方面,研究土地利用规划、建设和管理的科学^[8]”。在实践中,景感生态理论将景观的感知(物质空间)以及人类的心理认知有机结合起来^[9],借

由物质空间改造促进感知体验提升,激励居民产生积极决策和行为,形成城市复合生态系统(生态学)与人类共同利益的“趋善化”机制和管控路径^[10],使复合生态系统朝向可持续发展目标迈进。

景感生态学已在国内外生态规划、景观设计、生态系统服务和城市可持续发展评估等领域得到广泛应用和拓展^[11-12]。其中, Kim 等运用景感生态学原理分析了美国得克萨斯州奥斯丁市居住区蓝绿空间配置对热环境的影响^[13],旨在提升环境公平性。Zhu 等结合景感生态和经济学供需理论,量化评估了北京城市公园与当地居民的供需联系^[14]。进一步地, Zheng 等重点关注公园绿地 5 种关键物理感知的生态系统服务能力^[15]。在众多生态系统要素中,视觉感知环境因其对于人类发展的重要性在景感生态学研究中被较多讨论。Arslan 评估了土耳其国家公园中生态系统服务对游客视觉感知体验的影响,为当地旅游规划提供了指导^[16]。最新研究结合社交文本大数据和机器学习的语言模型分析了景观特征与居民视觉等不同感知维度之间的交互关系^[17]。一些国内实证研究将景感生态学应用于建成环境视域规划和设计并服务于公共健康评价^[18-19]。然而,城市物理感知、心理感知和复合生态系统之间作用关联和影响机制仍有待进一步明确。

随着人工智能技术的发展和大数据使用门槛降低,以人类视角展开城市大规模感知测度成为可能。街景大数据对于观察城市街道内物质空间和人类活动具有很大优势^[20]。相比传统高分遥感解译手段,街景视场角内物理信息更接近人类认知和体验^[21]。例如, Li 等通过街景大数据和深度学习对城市绿视率开展空间异质性研究^[22]。Lumer 等通过街景球面全景和几何投影计算,对行道树开展统计计数^[23]。这些定量研究为城市绿化评估和环境管理提供了决策参考。还有研究通过深度学习中目标监测和语义分割,对街景图像中交通工具和行人等移动目标进行计数并对各种景观要素比率进行测算^[24-25],为景感生态学中物理感知要素的智能识别提供了思路。然而,目前缺少面向特大城市建成环境的居民心理感知空间分布规律的研究。同时,关于物理感知、心理感知与城市复合生态系统要素之间的影响关联尚未充分讨论。为了解决这些问题,本研究提出人工智能和地理大数据的框架,为高空间分辨率和精细尺度下物理和心理感知定量测算和建模提供基础。

综上,本研究基于景感生态学理论,通过人工智能和街景大数据形成物理和心理感知测度手段,重点探究城市复合生态系统要素和物理感知对心理感知的影响。通过本文的研究框架,尝试对城市物理空间、复合生态系统要素和居民心理感知进行空间统计建模,旨在提升城市可持续发展的智能管理决策能力,并为城市物质空间和居民体验协同发展提供支撑。此外,本研究的技术手段有助与快速生成感知地图,为营造宜人舒适的街区环境提供景感生态规划路径。

1 研究方法

1.1 研究区概况

北京是我国重要的政治、经济、科教和文化中心,中心城区自内向外修建了 5 条环城快速路(二环至六环),表现出“同心圆+卫星城镇”的空间发展格局(图 1)。城市中心职住迁移和通勤效率受到空间结构限制,节假日和早晚高峰的拥堵现象非常严重。北京市中心的高水平教育资源和金融科技企业吸引了大量外来人口,为整个城市经济、社会和文化发展持续地注入活力,但资源分布的不均衡带来城市发展局限。

在改革开放后,北京市中心经历了快速城镇化和高强度房地产开发,人口密集、基础设施供给能力有限、居民生活环境品质的提升需求迫切。其中,视觉环境是居民感知城市物质空间的主要途径之一,对于公共健康和环境公平至关重要。因此,从居民角度出发,对整个北京市中心的视觉环境感知和空间格局进行客观评估,有利于居民健康生活和经济社会高质量发展。综上,北京市是我国重要的人口聚集地和经济增长引擎,对周边地区具有引领带动作用,并且该研究区对我国其他城市发展和规划具有借鉴价值。

1.2 研究框架

为了探究居民感知的空间分异和作用关系,提出了如下研究框架(图 2)。该框架共包括 4 个部分,包括理论基础、多源数据、方法测度、空间统计及分析。根据前文提到的景感生态和城市复合生态系统理论及技术

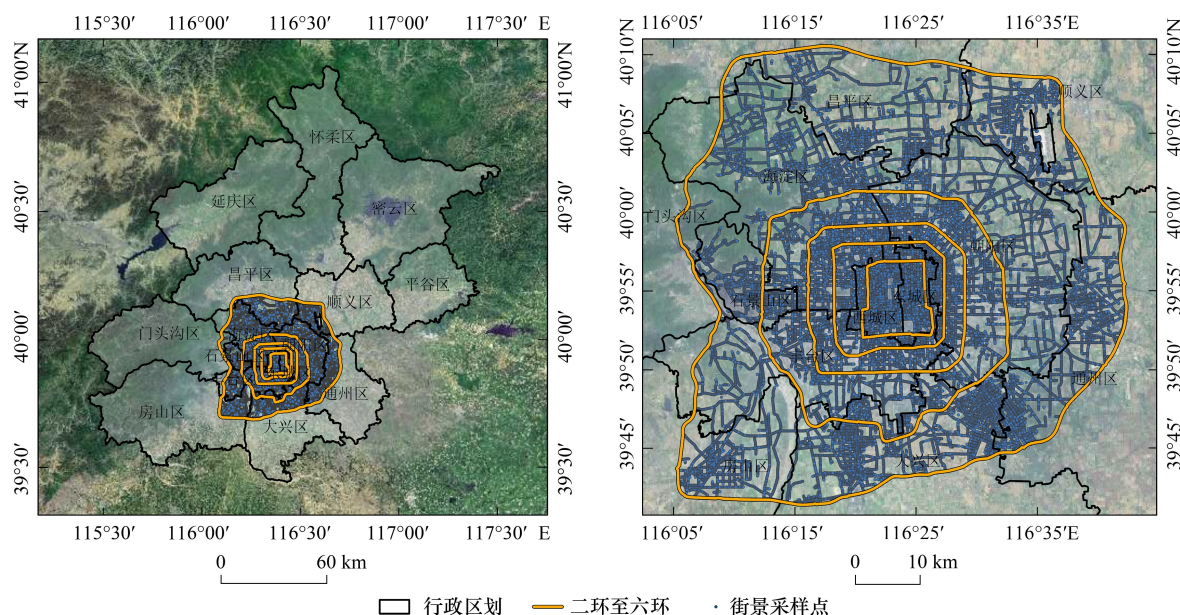


图1 研究区概况

Fig.1 Study area

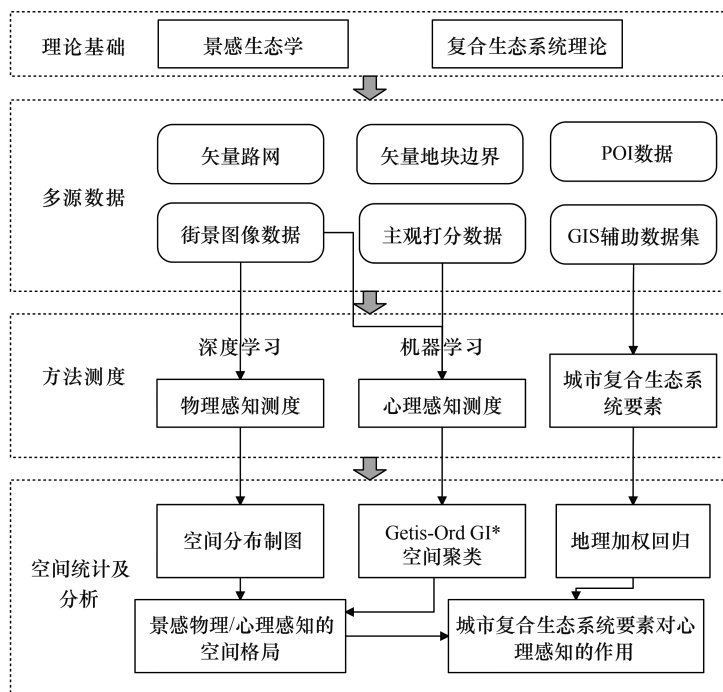


图2 研究框架

Fig.2 Research framework

POI: 兴趣点 Point of Interest; Getis-Ord G_i^* : 冷热值空间聚类分析 Getis-Ord

背景,本研究采用了多源数据融合、深度学习和机器学习对物理感知和心理感知进行大规模测度。然后,使用地理信息系统(Geographical Information System, GIS)和辅助数据集测算城市复合生态系统要素的指标。最后,通过地理映射、空间聚类和地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)空间统计模型,探究

物理和心理感知的空间分布格局,进而探索城市复合生态系统要素与物理感知、心理感知之间的影响关联。

1.3 基于人工智能的景感指数测算

1.3.1 街景图像数据和物理感知测度

研究采用百度开放位置服务平台 (<http://lbsyun.baidu.com>) 的街景静态图接口批量获取街景图像及其元数据信息。其中,图像以 jpg 文件存储,其元数据以数据字典形式存储。街景元数据包含图像标识、拍摄时间、方向角和经纬度坐标等字段。为了全面覆盖人类正常观察角度,对每一个地理样点采用多个水平视角的街景,即等间隔的水平视角街景(每个样点对应东、南、西、北正方向),进而表征城市居民在不同地理位置下的视觉环境(图 3)。

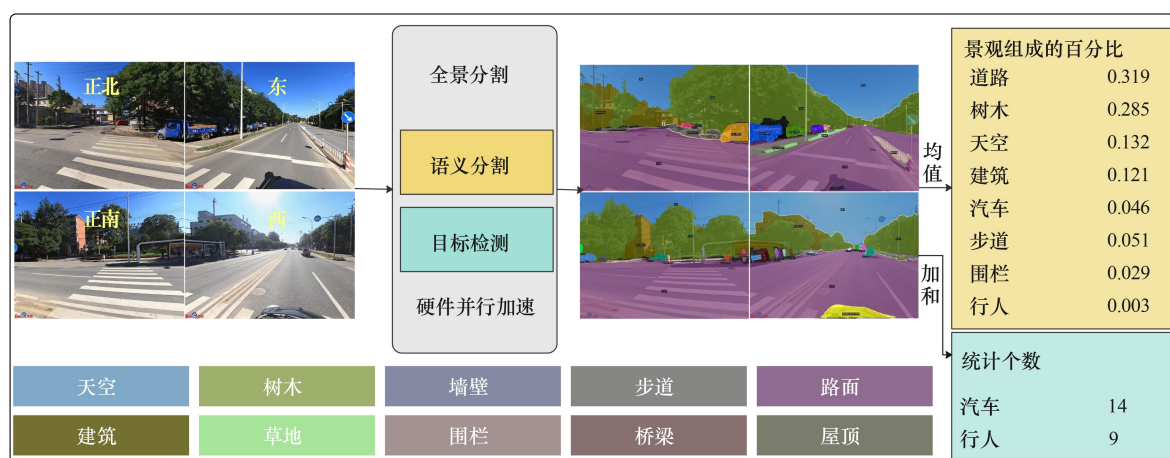


图 3 街景图像解译和指标量化

Fig.3 Street view interpretation and indicator quantification

首先利用 ArcGIS 10.8 进行路网简化及样点生成;然后根据目标街景的方向角俯仰角、视场角和样点坐标构建字符串请求列表;接着通过百度静态图接口获取街景图像;最后通过元数据中的经纬度坐标进行地理映射,形成城市街景数据库。其中,采用水平方向上等相邻间角的 4 张子图对每一个样点进行表达,并用来覆盖行人视域(图 3)。路网采样间隔被设定为 50m,共获取北京市共 326824 张沿路街景影像,所有视域空间街景共同构成了城市沿路物理空间的整体意象。

根据人类对客观景物语义理解的层次性,将景感物理感知划分为 3 个子类,包括:人工要素(建筑物、围墙、护栏等);自然要素(树木、草地、天空等);交通活动要素(行人、汽车、公交等)。基于全景分割框架^[26],通过测度不同物理感知要素占比来刻画街区内精细尺度的感受强度变化,进而对城市感知的空间信息进行表征和解释。

1.3.2 基于人工智能的心理感知测度

为了建立图像与不同感知强度之间的联系,本研究构建了机器学习框架对心理感知强度进行训练和预测,具体方法流程如图 4 所示。建立了人工参与的打分网页程序,通过随机采样法从街景数据集抽取了 1000 张街景图像,然后每位专家在程序上对这些图像开展主观评价,其结果自动记录在服务器的数据库中。为了避免身心疲劳对评价结果产生影响,程序设置了中断保存功能,参加者可根据自身情况安排时间,并在开始实验后于 7 天内独立完成。实验过程中包含 20 名参加人员,男女比例为 1:1,其中硕士 6 人、博士 14 人。实验参加者均在北京生活居住超过 5 年,了解当地景观风貌特点和区位条件,包含生态学、环境管理、地理学等不同专业知识背景。受限于成本和条件,实验样本和受试者较少,未来可通过众包或公众参与式 GIS 来进一步扩增景感打分样本。

训练和量化方法分为 3 步:首先,将由 ImageNet-1k 数据集预训练的 ResNet101 深度卷积神经网络为图像

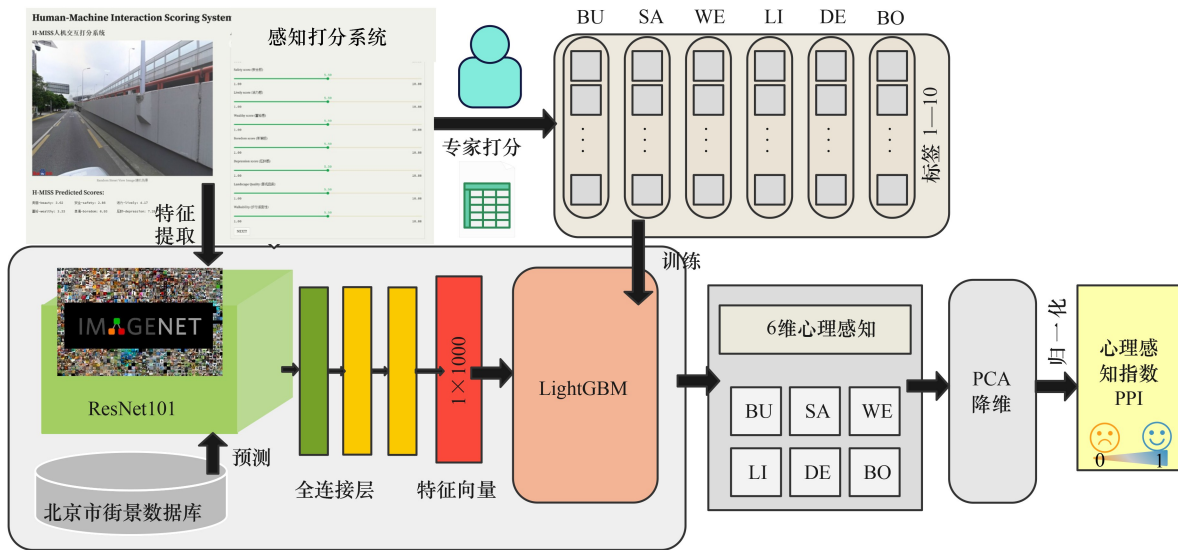


图4 基于机器学习的心理感知指数测算

Fig.4 Measurement of psychological perception indicator (PPI) based on machine learning

ResNet:残差深度卷积神经网络;LightGBM:轻量梯度提升机;PCA:主成分分析;BU:美丽;SA:安全;LI:活力;WE:富裕;BO:单调;DE:压抑;PPI:心理感知指数

特征提取器。每一张街景图像均经过特征提取器转换为 1×1000 维特征向量,将特征向量输入到 LightGBM 与心理感知打分的结果建立非线性拟合模型。其次,对每一个心理感知特征进行单独训练,得到 6 个参数不同的模型。利用贝叶斯超参数搜索和 3 折交叉验证进行模型训练。模型以 MSE 作为误差损失函数,最大训练轮数为 50 轮,当训练误差连续 10 轮没有明显改变时训练提前终止。最后,采用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 对 6 个模型输出的预测值进行降维,以第一载荷作为心理感知指数测度,用来代表每张街景对应的“消极-积极”心理感知强度,值域为 $[0, 1]$ (图 4)。实验采用常用的 R^2 和均方误差 (Mean squared error, MSE) 作为衡量模型拟合表现测度,其公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (2)$$

式中, $\hat{y}_i - y_i$ 表示感知分数的真实值与预测值之间的差值。机器学习模型使用 Python 语言并基于 Scikit-learn 和 Pytorch 模块实现,局部最优的超参数组合采用了贝叶斯梯度下降搜索策略。在 50 轮的超参数优化后,模型交叉验证的拟合优度 R^2 达到 89.13%、MSE 低于 0.52,能够满足后续的心理感知指数预测和制图的精度要求。

1.4 城市复合生态系统要素的测度

通过前文提出的城市物理和心理感知测算框架,计算了城市复合生态系统要素的具体指标。将心理感知测度 (psychological perception indicator, PPI) 作为模型的因变量,在物理感知变量的基础上引入社会-经济-自然复合生态系统要素测度作为协变量,然后通过 GWR 模型分析它们之间的空间作用关系。指标的统计信息、说明和数据来源如下表 1 所示:

其中,对偏态分布变量 平均房租 (LN_RP)、公交站数量 (LN_BUS)、商圈距离 (LN_DIS)、商业活力 (LN_CV) 和人口分布 (LN_POP) 采取了自然对数化处理。根据最小二乘法 (Ordinary least square, OLS) 回归模型原理,取对数后连续自变量与因变量的偏导数 (单变量 β 系数) 可解释为:其他自变量固定时,自变量百分比

变化带来的单位因变量变异,即经济学理论中的弹性系数。所有的变量通过 GIS 空间聚合到街区单元,将全部感知测度与城市复合生态特征变量进行整合。

表 1 城市复合生态系统要素的解释指标

Table 1 The explanatory indicators of the urban complex ecosystem features

变量 Variables	类型 Category	说明 Instructions	数据来源 Data source	均值 Mean	标准差 Standare deviation
平均房租 Average rental price	经济发展	通过反距离权重法得到的插值表面	链家 and 自如地产信息平台	4.34	0.49
公交站数量 Bus station number		街区周边公交站数量 (500m)	高德 POI	3.04	1.01
最近商圈距离 Distance to the nearest business center		街区距离最近商圈的路网距离	高德 POI	8.30	1.14
商业活力 Commercial vitality	社会活力	大众点评商业设施签到记录	大众点评 POI	4.41	1.32
人口分布 Population distribution	自然条件	北京市人口空间分布栅格	经过七普人口校正的 worldpop 数据	3.80	1.26
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index		归一化植被指数	高分 1 号遥感影像计算结果	0.32	0.068
海拔 Altitude		海拔高度	5m 高程数据	40.11	12.07
坡度 Slope		地面坡度	高程数据计算	0.24	0.35

1.5 空间统计模型

地理加权回归 (Geographically weighted regression, GWR) 是在传统 OLS 回归的基础上考虑空间异质性和自相关性的改进版本。GWR 采用了局部回归和可变参数的思路,将数据的空间位置信息 (空间权重矩阵) 嵌入到回归参数中,利用局部加权回归进行逐个样本的参数估计,最后得到不同区位最优回归模型组合。其享乐价格模型的表示形式为:

$$Y_j = \sum_j \beta_{ij}(u_i, v_i) X_{ij} + \varepsilon_i \tag{3}$$

式中, (u_i, v_i) 为第 i 个样本的坐标, β_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个特征的值, ε_i 为第 i 个样本的误差项。GWR 的最优邻居个数/带宽是通过校正赤池信息量准则 (corrected Akaike information criterion, AICc) 来确定的。

$$AICc = 2n \ln(\hat{\sigma}) + n \ln(2\pi) + n(n + tr(S)) / (n - 2 - tr(S)) \tag{4}$$

式中, $\hat{\sigma}$ 为误差项的标准差估计值, $tr(S)$ 为投影矩阵 S (直接映射真实值至拟合值) 的迹。此外,使用了常用的残差平方和 (Residual Sum of Squares, RSS) 作为模型迭代过程的误差判据。

2 结果与讨论

2.1 物理感知变量的空间格局

利用深度学习对北京市中心的街景图像进行解译,所得统计结果如下表 2 所示。对每一种物理感知类型,按照累计平均加和的降幂排序选择了贡献前 3 高的感知测度,并将其用于后续分析。通过 ArcGIS 10.8 对街景图像的物理感知特征进行地理映射,按照取值分段可视化并观察物理感知空间格局 (图 5)。

各物理感知变量按照 Jenks 自然分段法进行区间分段。从自然、人工、和交通活动特征三个层面分析主要结果 (图 5)。第一,城市中的自然景观提供了生命支撑和物质能量循环等重要服务。通过对自然景观感知制图 (图 5) 发现,树木 (TREE) 感知的分布表现为明显的“北高-南低”的空间布局。位于市中心老旧胡同、丰台区南部部分街区周围树木视觉感知偏弱。六环以外的城郊地区存在大量的自然保护地和耕地,因此草地 (GRASS) 和裸地 (DIRT) 在感受程度上明显强于市中心街区。可见,北京市自然要素的感知分布存在内外结构性差异。

表 2 物理感知变量统计
Table 2 Physical perception variable statistics

物理感知 Physical Perceptions	类型 Category	均值 Mean	标准差 Stdard deviation	最小值 Min	最大值 Max
树木 Tree	自然	0.21	0.09	0.00	0.75
草地 Grass		0.01	0.02	0.00	0.18
裸地 Dirt		0.01	0.03	0.00	0.52
道路 Road		0.24	0.06	0.00	0.44
建筑 Building	人工	0.12	0.09	0.00	0.45
围墙 Wall		0.04	0.03	0.00	0.34
汽车 Car		416	301	0	6770
行人 Person	交通	161	217	0	3246
自行车 Bike		30	48	0	765

第二,人工景观是城市生态系统中、在人类活动和满足自身生活便利的情况下,通过对物理空间进行改造、构筑、更新后的成果。金融中心、商业街、住宅楼等高强度建筑环境开发,使得居民出行视野容易受到遮挡。由图 5 可知,研究区物理感知的强度主要集中在五环以内的城市建成区。故宫外围的胡同居民区建筑视感较强,这是由狭窄的道路(ROAD)和围墙(WALL)带来了空间封闭感;相较之下,位于五环高速路外给人的建筑感(BUILD)整体偏弱,视觉感受更为开阔。类似的,位于胡同居民区、老旧封闭社区和工业用地的空间围合感更强。此外,对道路界面的感知存在明显的空间异质性,研究区西北部(海淀区)与东南部街区之间存在梯度差异。其中,朝阳区、丰台和石景山的道路配置相对更宽。这说明北京市道路宽度空间差异大,这可能影响交通通勤的流量。综上,以三种常见人工景观要素在研究区内存在明显空间分异,其主要受到城镇化开发格局和演化影响。

第三,交通活动刻画了城市人口通勤快照,具体包括了汽车(CAR)、自行车(BIKE)、行人(PERSON)等空间分布状况。汽车、自行车和步行是最常见的城市出行模式,其空间聚集一定程度反映城市经济社会活力。从感知地图(图 5)来看,汽车感知程度高的地区主要集中在五环路内的核心商圈、金融中心、教育设施、机场和火车站等街区。对于行人的感知分布高值区包括城市中心的金融商业设施(如金融街)、胡同区和历史文化街区(后海和南锣鼓巷等)。还可以从地图中发现,行人和自行车主要出现在火车站、地铁站和旅游景区附近。其中,自行车和行人的分布较为接近。一方面,自行车投放更集中于在人口活动更频繁的交通用地(地铁口、公交站、道路口等);另一方面,街景图像中捕捉到了部分骑行者信息,因而自行车与行人空间联系更为紧密。这侧面显示街景中物理感知能够一定程度揭示居民活动的空间分布模式。

综上,基于海量街景影像和人工智能,能够将景感生态学中物理感知按照人类语义理解进行分类、计算和可视化,借助 GIS 制图和统计分析工具刻画不同物理感知要素的空间异质性,进而为理解物理环境配置与居民感知之间联系打下基础。

2.2 心理感知变量的空间格局

通过前面提到的机器学习方法和街景图像的特征提取,将 6 维心理感知变量降维得到心理感知指数。心理感知变量的统计结果如下表 3 所示。然后,将街区尺度的心理感知变量进行可视化,其结果如下图 6 所示。从宏观来看,机器学习模型成功地区分出心理感知的空间变化,且结果非常接近标准正态分布,因此满足开展空间统计建模的前提假设。图 6 展示了北京工人体育场东路和双清路北段的原位街景图像序列,地块颜色的深浅反映了心理感知的相对强度,可以看到不同景观配置对于心理感知强度存在影响。例如,在学院路街道双清路段,西侧建筑较多的地块平均心理感知指数明显偏低。相比之下,工人体育场东路两侧绿化良好、道路开阔,左右两侧地块的心理感知指数很高。因此,人工智能模型能够有效地辨别人本尺度的心理感知差异,而心理感知的空间变化能通过空间制图来更宏观地呈现,这对于城市管理过程中准确地回溯原位场景状态、明确干预和优化目标具有一定帮助。

采用 ArcGIS 的 Getis-Ord GI* 空间聚类工具对 PPI 聚簇分布进行识别(图 7)。结果发现北京市的心理感

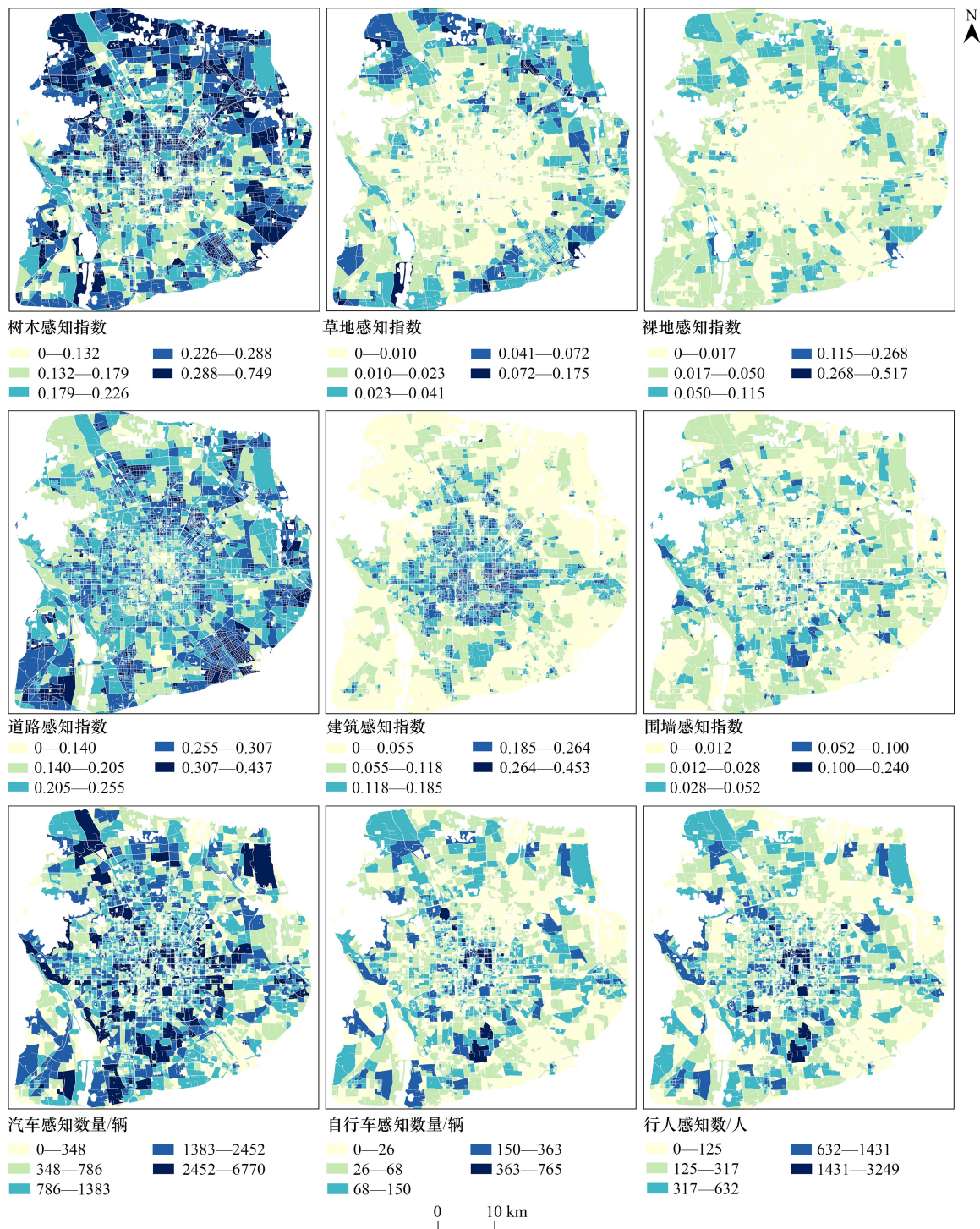


图5 物理感知的景感地图

Fig.5 Landsense maps of the physical perceptions

知指数呈现出“内-外”和“南-北”的双重差异。高值聚集区主要分布在西城区、东城区、朝阳区南部、海淀区上地周边以及北京首都机场周边。在北京城南存在两个明显的高值聚簇,分别是大兴东片区和亦庄经济开发区。它们是拉动城南经济产业发展的卫星城镇中心、增长极和居住区。相比之下,低值聚集区在北京市南城区域大面积覆盖,特别是丰台、通州和大兴区。此外,其他街区在统计学上的聚集效应并不显著。综上,聚类统计结果显示北京市居民心理感知空间分布不均衡,特别是北京城南区域感知品质整体偏低。

表 3 心理感知测度的统计信息

Table 3 Psychological perception variable statistics

感知测度 Perception Metrics	均值 Mean	标准差 Stdard deviation	最小值 Min	最大值 Max
美丽 Beauty	0.47	0.15	0.12	0.90
安全 Safety	0.53	0.11	0.13	0.93
活力 Lively	0.50	0.13	0.06	0.93
富裕 Wealthy	0.50	0.12	0.09	0.87
单调 Boredom	0.55	0.11	0.15	0.93
压抑 Depression	0.56	0.10	0.14	0.87
心理感知 Psychological perception index	0.47	0.14	0.00	1.00

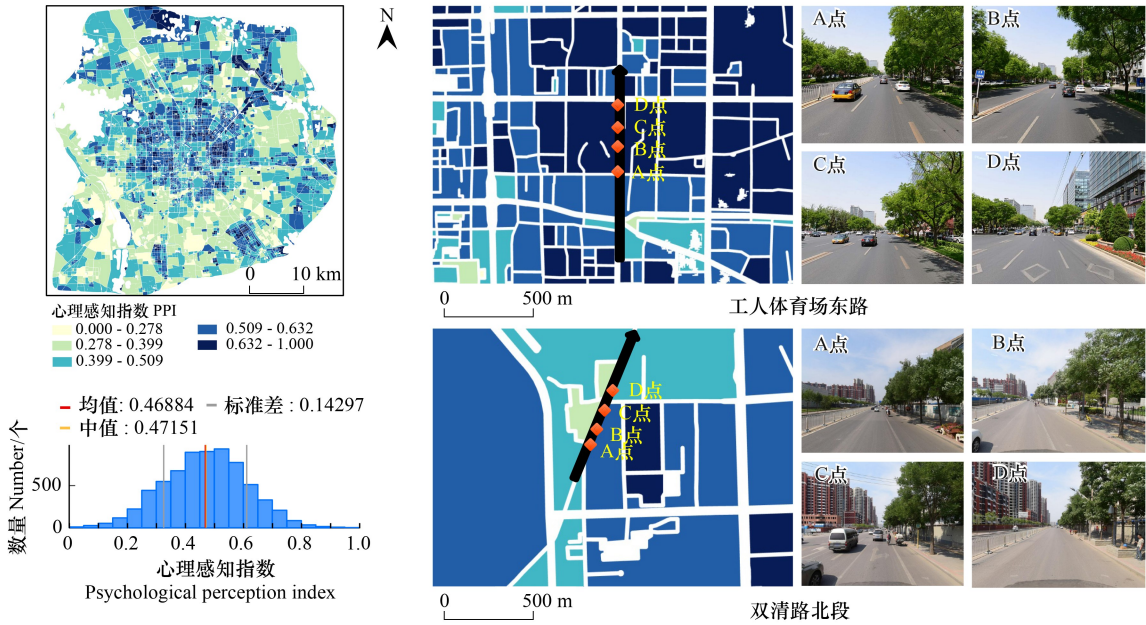


图 6 心理感知测算结果

Fig.6 Calculation results of the psychological perception indicator

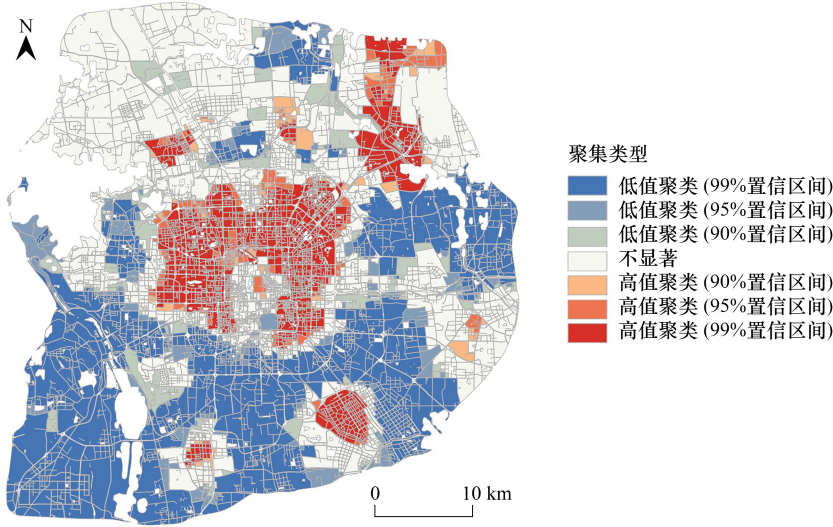


图 7 心理感知指数的 Getis-Ord GI* 空间聚类地图

Fig.7 Getis-Ord GI* spatial clustering maps for the psychological perception index

2.3 城市复合生态系统要素与心理感知

在前面定量测度基础之上,利用 GWR 分析物理感知、城市复合要素对心理感知的作用,该模型如下表 4 所示。可以发现 GWR 全局拟合优度超过了 92%,说明物理感知和城市复合生态系统要素的测度对 PPI 具有很强解释能力。表 4 中的黄色底纹表征了城市生态系统的关键特征变量。这些变量的模型参数存在明显的空间异质性,即在正负值区间范围浮动。不同特征要素的实际作用效果会随着空间位置改变。因此,在景感生态规划过程中,需要对不同区位的街区因地制宜地制定优化和管理方案。

表 4 社会-经济-自然要素与心理感知的 GWR 拟合模型($n=6809$)

Table 4 The GWR model between psychological perception and social-economic-natural features ($n=6809$)

自变量 Variables	模型 1:因变量 PPI-全部自变量 Model 1: PPI-All variables					模型 2:因变量 PPI-部分自变量 Model 2: PPI-Partial variables				
	均值	标准差	最小值	中值	最大值	均值	标准差	最小值	中值	最大值
树木 Tree	0.901	0.120	0.534	0.901	1.340	—	—	—	—	—
草地 Grass	0.017	0.139	-0.511	-0.035	0.637	—	—	—	—	—
裸地 Dirt	-0.254	0.337	-2.691	-0.195	1.194	—	—	—	—	—
道路 Road	0.174	0.132	-0.224	0.174	0.689	—	—	—	—	—
建筑 Building	0.413	0.152	-0.103	0.420	0.844	—	—	—	—	—
围墙 Wall	-0.081	0.093	-0.487	-0.073	0.221	—	—	—	—	—
汽车 Car	0.038	0.140	-0.425	-0.048	0.452	—	—	—	—	—
行人 Person	0.008	0.166	-0.550	0.003	0.785	—	—	—	—	—
自行车 Bike	-0.075	0.121	-0.432	-0.072	0.267	—	—	—	—	—
商业活力 Commercial vitality	0.025	0.072	-0.203	0.016	0.405	0.068	0.214	-0.992	0.051	1.040
平均房租 Average rental price	0.016	0.200	-1.503	0.009	1.030	-0.064	0.600	-3.696	-0.017	2.874
人口分布 Population distribution	-0.002	0.076	-0.347	0.007	0.309	-0.006	0.262	-1.979	0.013	1.142
公交站数量 Bus station number	0.036	0.134	-0.453	0.040	0.573	0.071	0.270	-0.833	0.063	1.319
商圈距离 Distance to the nearest business center	-0.004	0.703	-3.671	-0.050	3.509	-0.164	2.767	-19.400	-0.042	13.730
植被指数 Normalized differenced vegetation index	0.020	0.063	-0.177	0.020	0.343	0.098	0.195	-0.547	0.090	0.781
海拔 Altitude	0.010	0.571	-2.061	0.007	2.425	-0.013	2.412	-13.727	-0.010	10.118
坡度 Slope	-0.015	0.084	-0.315	-0.014	0.454	-0.145	0.292	-1.488	-0.127	1.496
决定系数 R^2	0.923					0.646				
修正赤池信息准则 AICc	-22128					-15592				
带宽 Bandwidth	194					196				
残差平方和 RSS	10.95					23.82				

表 4 中参数中位数用于反映其贡献强度和属性。模型 1 中物理感知特征对心理感知正向作用强度排序为: TREE(0.901)>BUILD(0.420)>ROAD(0.174)。说明在居民位于街道绿化水平高、周边建筑设施和道路宽阔的街区更倾向于获得良好心理感受。该结果与前人文献的结论一致。负贡献的因子分别为:裸地(-0.195)、围墙(-0.073)、汽车(-0.425)和自行车数量(-0.048 和-0.072)。居民社区的自行车和汽车经常会出现占用公共道路空间的现象,容易引起负面心理感受。此外,封闭的围墙和裸地可能会给人不安全或缺乏管控的感觉,因而更容易带来负面心理感受。综上,模型中物理感知特征对因变量的作用表现是符合常理的。

在城市复合生态系统要素中正向影响最大的是 NDVI(0.02),其次是 LN_BUS(0.04),然后是 LN_CV(0.016);而表现为负贡献的测度有 LN_DIS(-0.05)和 SLOPE(-0.014),说明地表植被指数(NDVI)和公交站配置(LN_BUS)对促进积极心理感知有明显作用。在控制物理感知的情况下,提升绿度并进一步增强公交服务可能有助于提升人居积极感知。前人文献已经指明提升自然景观的可视性有助于心理疗愈和压力纾解^[27-30],本研究结果显示自然景观的视觉暴露对于居民心理感知具有积极作用。通过增加绿化屏障^[31]可以

阻隔污染物和噪声,进而保障人居环境健康发展。在未来的街区规划过程中需要以绿色公共交通为重点方向,合理地配置服务资源,促进街区环境中物理和心理感知协调发展。

相反地,负贡献的两个主要因素为街区的坡度(SLOPE)和距离商圈最短距离(LN_DIS),即坡度更高、距离商圈远的街区其感知体验较差。这是因为北京市中心和商圈主要地处平原且地形起伏不大。另外,北京各商圈是居民生活、工作和休闲的聚集地,位于商圈越近的社区越容易获得良好心理感受。从变量系数来看,城市复合生态系统要素均表现出空间异质性和符号敏感性。而从系数大小来看,城市复合生态系统要素要整体弱于物理感知特征的贡献。这可能是因为以上要素测度为地面水平维度上观测得出的,心理感知测度能捕捉到的信息相对有限;而物理感知测度更接近人类感知视角,因而作用表现更强。总之,通过对比模型 1 和模型 2,引入城市复合生态系统要素测度显著提高了模型整体的拟合优度,从而更精确地估计不同区位的心理感知驱动因素。

基于本文研究框架,对城市物理和心理感知量化和空间格局识别,并进一步探究两者与城市复合生态系统之间的作用联系。城市感知地图(图 6 和图 7)显示研究区内的心理感知水平表现出明显的空间不均衡现象,特别是在“内-外”圈层和“南-北”城区之间 PPI 差距较大。此外,物理感知的空间分异对心理感知格局具有关键作用(图 5 和表 4)。因此,在景感生态规划的过程中,需要特别注意街道景观布局对人们心理感知的影响,尽可能改善感知指数“洼地”街区的整体风貌以提升北京心理感知空间结构的均衡性,并且还要重视社会-自然-经济要素对 PPI 不平衡性的潜在影响。

在过去一段时间,基于传统方法很难量化和评估城市居民感知的影响因素,其空间分布情况很难被规划和管理部门快速掌握,阻碍了景感营造与规划管理层面衔接。另外,既有研究侧重对宏观生态系统要素的识别^[32],缺乏对主观感知层面的分析讨论。景感生态学更侧重以人为本的生态规划和管理^[8],强调了公众视角上的定量信息对于未来规划决策的重要性,适用于提出以人为本城市空间优化策略。综上,本研究以景感生态理论为基础,构建了街景大数据和人工智能定量分析框架,为深入理解居民感知和城市复合生态系统要素之间的影响关联提供了新思路。

城市生态系统影响因素和作用机理比较复杂,不同城市之间可能存在差异。在未来的研究中,需要对社会-经济-自然要素的定量测度进行补充,例如:生态系统服务功能和价值等。此外,还需要更多城市的横向比较,通过多尺度空间模型进行深入探究,从而理解不同城市生态系统服务与景感生态学心理感知之间作用关系规律,更好地服务于城市景感营造和可持续发展管理。

3 结论

提出了基于人工智能技术和街景大数据的城市感知量化分析框架,为景感生态规划提供了新的技术手段。以北京市中心为例开展了实证研究,对于促进居民身心健康和环境公平具有积极意义。提出一种结合人工智能的专家打分手段测度大心理感知指数(PPI),量化了人类大规模的感知强度的空间变化。结果显示北京市中心区的心理感知表现出显著的空间不均衡性,未来北京的空间规划设计应当重视居民物理感知和心理感知体验的协调发展。GWR 模型结果表明街区尺度的物理感知要素对心理感知的影响显著。其中,街区尺度的物理感知——树木、建筑、道路和裸地分布是影响心理感知波动的重要因素。此外,城市复合生态系统要素的测度对心理感知变化存在显著影响,需要在景感营造和规划干预过程中关注街区尺度的绿色覆盖、公交站配置、地形坡度和商圈中心的可达性。

综上,研究聚焦于街区水平居民物理感知和城市复合生态系统要素对心理感知强度分异的影响,为超大城市可持续发展提供客观参考。政府可以从自然要素、物理感知、心理感知和社会经济等方面出发,对城市空间格局和土地利用进行规划和管控,从而实现居住体验与城市环境的协调发展。后续研究需要进一步提升训练样本容量,并探索不同社会群体(年龄、教育、性别和收入等)的感知偏好和影响因素差别。

参考文献 (References):

- [1] 王效科, 苏跃波, 任玉芬, 张红星, 孙旭, 欧阳志云. 城市生态系统: 高度空间异质性. 生态学报, 2020, 40(15): 5103-5112.
- [2] 王海芹, 高世梅. 我国绿色发展萌芽、起步与政策演进: 若干阶段性特征观察. 改革, 2016(3): 6-26.
- [3] Althoff T, Sosič R, Hicks J L, King A C, Delp S L, Leskovec J. Large-scale physical activity data reveal worldwide activity inequality. *Nature*, 2017, 547: 336-339.
- [4] Balland P A, Jara-Figueroa C, Petralia S G, Steijn M P A, Rigby D L, Hidalgo C A. Complex economic activities concentrate in large cities. *Nature Human Behaviour*, 2020, 4(3): 248-254.
- [5] Salesses P, Schechtner K, Hidalgo C A. The collaborative image of the city: mapping the inequality of urban perception. *PLoS One*, 2013, 8(7): e68400.
- [6] Dubey A, Naik N, Parikh D, Raskar R, Hidalgo C A. Deep learning the city: quantifying urban perception at a global scale. *European Conference on Computer Vision*. Cham: Springer, 2016: 196-212.
- [7] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.
- [8] Zhao J Z, Liu X, Dong R C, Shao G F. Landsenses ecology and ecological planning toward sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2016, 23(4): 293-297.
- [9] 董仁才, 吕晨璐, 翁辰, 张永霖. 景感生态学原理及应用. 生态学报, 2022, 42(10): 4236-4244.
- [10] Zhao J Z, Su X D, Zhang Y L, Dong R C, Yan Y, Wang H W. Hyperfeedback: meliorization regulation mechanism towards sustainable development based on landsenses ecology. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2021, 28(7): 588-592.
- [11] Yan Y, Tang L N. Extended applications of landsenses ecology: an introduction. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2021, 28(7): 585-587.
- [12] Shao G, Wu G. Progress in landsenses ecology research and applications: an introduction. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(3): 193-195.
- [13] Kim S W, Brown R D, Winslow J F. Urban green and blue infrastructure effect on the micro-scale thermal environment in a residential neighborhood; Mueller, Austin, TX. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2023, 30(8): 910-924.
- [14] Zhu J Y, Lu H T, Zheng T C, Rong Y J, Wang C X, Zhang W, Yan Y, Tang L N. Vitality of urban parks and its influencing factors from the perspective of recreational service supply, demand, and spatial links. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1615.
- [15] Zheng T, Yan Y, Lu H, Pan Q, Zhu J, Wang C, Zhang W, Rong Y, Zhan Y. Visitors' perception based on five physical senses on ecosystem services of urban parks from the perspective of landsenses ecology. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(3): 214-223.
- [16] Arslan E S, Kaymaz I. Visitor perception of recreational ecosystem services and their role in landscape management of Gölcük Nature Park, Turkey. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(3): 202-213.
- [17] Zheng T C, Pan Q, Zhang X C, Wang C X, Yan Y, Van De Voorde T. Research Note: linking sensory perceptions with landscape elements through a combined approach based on prior knowledge and machine learning. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 242: 104928.
- [18] Zheng S, Cui K, Sun S, Wu J, Qiu Q, Tian Y. Planning and design based on landsenses ecology: the case study of Chongming Island Landsenses Ecol-industrial Park. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(5): 435-442.
- [19] 刘江, 唐新蔚. 基于景感生态理念的恢复性景观设计思考. 风景园林, 2021, 28(3): 107-112.
- [20] 张帆, 刘瑜. 街景影像——基于人工智能的方法与应用. 遥感学报, 2021, 25(5): 1043-1054.
- [21] Biljecki F, Ito K. Street view imagery in urban analytics and GIS: a review. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 215: 104217.
- [22] Li X J, Zhang C R, Li W D, Ricard R, Meng Q Y, Zhang W X. Assessing street-level urban greenery using Google Street View and a modified green view index. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(3): 675-685.
- [23] Laumer D, Lang N, van Doorn N, Mac Aodha O, Perona P, Wegner J D. Geocoding of trees from street addresses and street-level images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 162: 125-136.
- [24] Zhang F, Hu M Y, Che W T, Lin H, Fang C Y. Framework for virtual cognitive experiment in virtual geographic environments. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(1): 36.
- [25] Zhang F, Wegner JD, Yang B, Liu Y. Street-level imagery analytics and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 199: 195-196.
- [26] 张永霖, 付晓. 基于深度学习街景影像解译和景感生态学的视域环境定量解读. 生态学报, 2020, 40(22): 8191-8198.
- [27] Ulrich R S, Simons R F, Losito B D, Fiorito E, Miles M A, Zelson M. Stress recovery during exposure to natural and urban environments. *Journal of Environmental Psychology*, 1991, 11(3): 201-230.
- [28] Sutin A R, Costa P T Jr, Wethington E, Eaton W. Perceptions of stressful life events as turning points are associated with self-rated health and psychological distress. *Anxiety, Stress, and Coping*, 2010, 23(5): 479-492.
- [29] Asgarzadeh M, Koga T, Hirate K, Farvid M, Lusk A. Investigating oppressiveness and spaciousness in relation to building, trees, sky and ground surface: a study in Tokyo. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 131: 36-41.
- [30] Asgarzadeh M, Koga T, Yoshizawa N, Munakata J, Hirate K. Investigating green urbanism; building oppressiveness. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2010, 9(2): 555-562.
- [31] Zhang H, Chen B, Sun Z, Bao Z Y. Landscape perception and recreation needs in urban green space in Fuyang, Hangzhou, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(1): 44-52.
- [32] Botequilha Leitão A, Ahern J. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 59(2): 65-93.