

DOI: 10.20103/j.stxb.202408312086

李芝也, 王学润, 许烁钰. 视觉感知对热舒适判断的影响机制——以城市口袋公园为切入点. 生态学报, 2025, 45(12): 5660-5673.

Li Z Y, Wang X R, Xu S Y. Effects of visual perception on thermal comfort judgement and relative mechanisms by using urban pocket parks as a key entry point. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5660-5673.

视觉感知对热舒适判断的影响机制 ——以城市口袋公园为切入点

李芝也^{1,2,3,*}, 王学润¹, 许烁钰¹

1 厦门大学建筑与土木工程学院, 厦门 360005

2 厦门大学智慧低碳建筑技术福建省高校重点实验室, 厦门 360005

3 厦门大学厦门市建筑遗产保护智能技术集成应用重点实验室, 厦门 360005

摘要: 口袋公园作为城市开放空间的重要组成部分, 常呈斑块状散布于城市结构中, 承担着市民户外活动的重要功能。在全球高温热浪频发的背景下, 改善口袋公园热环境, 是优化城市环境、降低市民健康风险、提升市民生活福祉的有效途径。传统热舒适研究主要是在物理热环境基础上, 引入人体代谢率、皮肤温度、服装热阻等指标, 结合问卷进行舒适度评价。在景感生态学理论支撑下, 热舒适研究进一步拓展至热感知研究。以厦门老城区口袋公园为例, 选取典型景观实景照片, 在实验室环境中进行视觉刺激实验。研究突破了传统热舒适指标体系, 从心理、行为、生理三个维度展开互证, 具体为: 在主观的心理数据(问卷)基础上增加客观的行为数据(眼动)与生理数据(皮电 EDA)的比较研究, 揭示了主、客观指标在热舒适判断中的表征特点与差异, 并从“感觉-认知-决策”的心理路径解析差异存在的原因。实验数据客观描述了个体在视觉感知中的身心状态, 充分解释了视觉行为特征、心理认知、情绪压力之间的关联, 揭示了视觉感知对热舒适判断的影响机制。研究结果表明: (1) 对公园景观的视觉关注行为主要遵循个体的兴趣爱好、需求意愿; (2) 人们更多地通过快速扫视的方式对与热环境相关的景观要素进行信息捕获; (3) 视觉感知信息结合个体的热联想经验, 最终转换为对热舒适体验的判断; (4) 视觉刺激引发的皮电变化率和阴影、植物总体占比呈现显著的正相关, 说明阴影、植物总体占比率可能是影响公园热舒适体验的关键因素。总之, 研究以可持续发展为目标, 关注人地关系, 研究结论突破了城市设计中追求绿视率、景观趣味性等的传统思路, 在热环境优化目标下提出了绿植、阴影结合设计的新视角, 为建设低碳节能、宜居亲人的未来城市提供了更加精细化、科学化的思路。

关键词: 景感生态学; 视觉感知; 个体热舒适; 人因实验; 口袋公园

Effects of visual perception on thermal comfort judgement and relative mechanisms by using urban pocket parks as a key entry point

LI Zhiye^{1,2,3,*}, WANG Xuerun¹, XU Shuoyu¹

1 School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 360005, China

2 Fujian Province University Key Laboratory of Intelligent and Low-carbon Building Technology, Xiamen University, Xiamen 360005, China

3 Xiamen Key Laboratory of Integrated Application of Intelligent Technology for Architectural Heritage Protection, Xiamen University, Xiamen 360005, China

Abstract: Pocket parks, as essential components of urban open spaces, are small-scale green areas dispersed in patchy formations within dense city structures. These micro-spaces serve crucial roles in facilitating outdoor activities for city dwellers. In the context of increasingly frequent global heatwaves, enhancing the thermal environment of pocket parks has emerged as a vital strategy to optimize urban settings, mitigate health risks associated with extreme heat, and elevate

基金项目: 国家重点研发计划专项(2022YFF1301304); 国家自然科学基金青年项目(52008360); 厦门市建筑遗产保护智能技术集成应用重点实验室开放基金(IATAHP2023004)

收稿日期: 2024-08-31; 采用日期: 2025-04-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lzy099566@xmu.edu.cn

residents' overall well-being. Traditional studies on thermal comfort primarily focus on physical thermal conditions, integrating quantitative metrics such as metabolic rates, skin temperatures, and clothing resistance, supplemented by questionnaires for comfort assessments. With the support of the principles of landscape ecology, this study extends into thermal perception using pocket parks in Xiamen's historic district as a case study, employing authentic landscape photography in controlled laboratory visual stimulation experiments, allowing for a more nuanced understanding of how individuals interact with and perceive these spaces. Departing from conventional thermal comfort indices, the mutual verification was carried out from the three key dimensions of psychology, behavior and physiology. Specifically, the comparative study of objective behavioral data (eye movement) and physiological data (EDA) were added on the basis of subjective psychological data (questionnaire) to reveal the characterization features and differences between subjective and objective indexes in thermal comfort judgment, and the reasons for the differences are analyzed from the psychological path of "sensation-cognition-decision". The experimental data objectively delineate individuals' physiological and psychological states during visual perception, elucidating connections between visual behavior, cognitive processes, and emotional responses, these findings help uncover the mechanisms that influence thermal comfort judgments in pocket parks. Key findings indicate: (1) People's visual attention towards park landscapes aligns closely with individual interests and needs; (2) Thermal environment-related landscape elements are predominantly perceived through rapid scanning or peripheral vision; (3) Visual perceptions, coupled with individual thermal associations, converted into the judgments of thermal comfort; (4) Changes in EDA responses triggered by visual stimuli correlate significantly with overall proportions of greenery and shade, underscoring their pivotal roles in shaping park thermal comfort experiences. In conclusion, this research advocates for sustainable urban development by emphasizing the importance of human-environment interactions in design practices. It challenges traditional paradigms in urban design which focused solely on green visibility and introduces a novel perspective advocating for integrated designs of greenery and shade to optimize thermal environments. The study offers a refined and scientifically grounded approach to constructing future cities that are low-carbon, energy-efficient, and livable.

Key Words: landscape ecology; visual perception; personal thermal comfort; human factor experiment; pocket parks

城市口袋公园是指提供人们日常户外活动的小微绿化场所,常呈斑块状散布于城市结构中,具有尺度灵活、分布广泛、与居民生活密不可分的特点。口袋公园作为城市公共空间的重要组成部分,是城市建设的热点之一^[1]。截至目前,全国已建设口袋公园4万余个。2024年6月,住建部办公厅发布《口袋公园建设指南(试行)》,明确指出科学推进口袋公园建设,优化城市绿色空间布局,满足人民群众就近亲近自然、休闲游憩、运动健身等需求的目标。文件将口袋公园与城市发展、人民生活福祉紧密联系在一起。由于口袋公园属于户外场所,常受天气影响出现使用率低下问题。以南方湿热地区为例,户外场所的夏季高温暴晒是影响人群热舒适体验的主要因素。因此,减轻高温暴晒影响、优化口袋公园热环境,将有助于提升口袋公园活力、实现微公园服务绩效最优的规划目标^[2];同时降低高温带来的健康风险^[3],营造市民生活幸福感,也是改善城市环境、提升人类福祉的有效途径。

建筑学科对热环境的研究在不同尺度的侧重点不同。城市、区域等宏观尺度,主要是基于气象数据、遥感技术等物理热环境研究,通常利用气象卫星^[4]、无人机热红外遥感等技术^[5],结合实时图像与空间信息建立区域热环境模型^[6-7]等。社区、组团等中微观尺度,主要结合物理环境与人本因素的综合考量。依托大数据技术、问卷调研等,在热环境物理模型基础上引入人本指标(人体代谢率、皮肤温度、服装热阻等)的评价。研究多聚焦于热舒适评价的指标体系(生理等效温度 PET、通用热气候指数 UTCI、标准有效温度 SET、预测平均投票数 PMV 等)及模型构建^[8],热环境与人群行为、心理活动、情绪变化之间的作用关系^[9-10]等。值得注意的是,传统热舒适研究多采用主观评价(如美国暖通空调工程师协会的“七格标尺热感觉投票”)来表达对热环境满意的心理状态^[11]。然而,这种主观评价较易受到个体经验、认知水平等的影响,无法准确表征身体

的客观热感觉状态。因此,在研究中微观尺度的热环境时,如能加入表征热感觉的生理数据,就能从心理、生理两个维度反映热环境对个体的影响,使研究结论更具解释度与科学性。

对“环境-感知”交互作用的研究,涉及景感生态学(Landsenses Ecology)、环境行为学、心理学、脑科学等学科。其中,景感生态学在传统生态学基础上,进一步探究景观环境与个体感知之间的互动关系,其理论深度融合了建筑学、城乡规划学、心理学等交叉学科内容,是以可持续发展为总体目标,从自然要素、物理感知、心理反应、社会经济、过程与风险等相关方面,研究土地利用规划、建设与管理的科学^[12]。从研究内容上看,开展了环境偏好研究^[13]、声景感知对人体健康和情绪恢复的作用研究^[14-15]、环境气味与情绪愉悦度的相关性研究^[16]等。从研究方法上看,多聚焦于构建视觉、听觉景感特征的指标体系与测量评价方法^[17]。测量方法主要采用图像与文本分析结合问卷访谈的方法,引入了眼动实验作为客观生理数据补充。景感生态学着重研究人群如何通过视觉、听觉、触觉、嗅觉等感官,从城市生态系统中的景感场景获取服务惠益,其关注的科学问题是城市景感要素(景、声、光、热、嗅)多维交互作用对人居环境的影响机制,其构建的多维表征指标体系、评价方法等^[18]为本研究提供了思路借鉴。环境行为学研究人类行为与自然环境、建成环境及社会文化环境之间的相互关系^[19],旨在提升环境质量与人类生活品质。从研究内容上看,热点集中于城市各尺度公共空间的使用评价与行为偏好研究^[20]、建筑室内环境满意度研究等^[21]。从技术方法上看,在传统的问卷访谈等方法基础上,开展了虚拟现实、GIS、大数据、人工智能等新技术的应用^[22-25],实现了更精准的环境评估与行为模拟。其研究目的最终导向空间如何优化提升的应用问题。心理学与脑科学则为“环境-感知”研究提供了个体感知过程的机制解释,个体感知过程是一个复杂的生理和心理过程,通过人类感知系统接收外部环境信息,将这些信息转化为感官刺激,并处理和解释这些刺激以产生感知^[26]。这为完善“环境-感知”过程中的生理解释提供了重要科学依据。

综上,景感生态学为“环境-感知”研究提供了自然科学层面的研究思路;心理学、脑科学等关于感知、认知、人脑、生物体的论述,则为“环境-感知”研究提供了人本层面的理论依据,并提供了数据测量的前沿技术方法;环境行为学则为“环境-感知”研究指明了实践应用方向,形成了涵盖科学问题、关键方法与技术示范的完整框架(图1)。

景观感知的视觉研究层面,由于视觉为多种感官之首,约85%的外界信息通过视觉获得并内化为不同心理认知^[27],且在其他领域已有案例证实视觉会影响个体认知与决策,如色彩影响情绪^[28]等。研究表明,生物视觉过程具有顺序性、互动性和动态性特点,其中顺序性表现为通过“视网膜-丘脑外侧膝状体-视皮层”的途径处理和传递信息^[29]。互动性则涉及个人与环境之间的动态关系^[30]。人们在场景中的活动会形成认知和记忆,以至于仅从视觉接触相关图像刺激时便能迅速形成体感记忆与情绪反馈,最终影响感知判断。在热环境研究中该影响路径可被称作“热联想”(Heat Association)(图2)。这是在人的热历史、热记忆、热期望等综合作用下产生的联觉作用^[31-32]。因此,视觉感知可以作为研究环境影响热舒适判断的重要途径及突破点。

技术方法层面,随着人因工程(Human Factors Engineering)的蓬勃发展,人们开始深入研究人类在特定环境中如何与技术、设备或系统进行交互^[33],目的是了解人们在使用这些工具时的行为、感知与认知过程^[34]。人因工程最早运用于军事,二战后用于医疗、航空、工业领域^[35],近年来逐渐与心理学、社会学、工程学等社科类学科融合,从人们对环境、场景、机器的情感与认知角度探索人性化设计^[36-37]。其中,眼动追踪技术可以捕捉眼球运动轨迹、停留时长、瞳孔直径等信息^[38],能够辅助判断人们对所视物体的注意力水平,从而获得情绪状态及心理偏好^[39],常用于研究空间风貌或景观特征体验^[40-42]。生理指标应用较广泛的是脑电(Electroencephalogram, EEG)与外周神经系统指标。不同频率的脑电波能够较为精细的解释个体的情绪水平^[43-44],但脑电设备灵敏易受干扰,实验过程复杂^[45],因此在解释个体情绪水平时,可尝试采用外周神经系统^[46]的生理指标作为替代。其中,皮电(Electrodermal Activity, EDA)是较为可靠的选择。皮电是指皮肤表面的汗腺由于应激或其他刺激引起的激活而导致的电传导能力变化^[47]。研究表明,皮电与情绪唤醒度水平呈正相关,可反映个体在受到刺激后的情绪变化^[48],近年来结合机器学习在个体热舒适预测及解释中已有初步

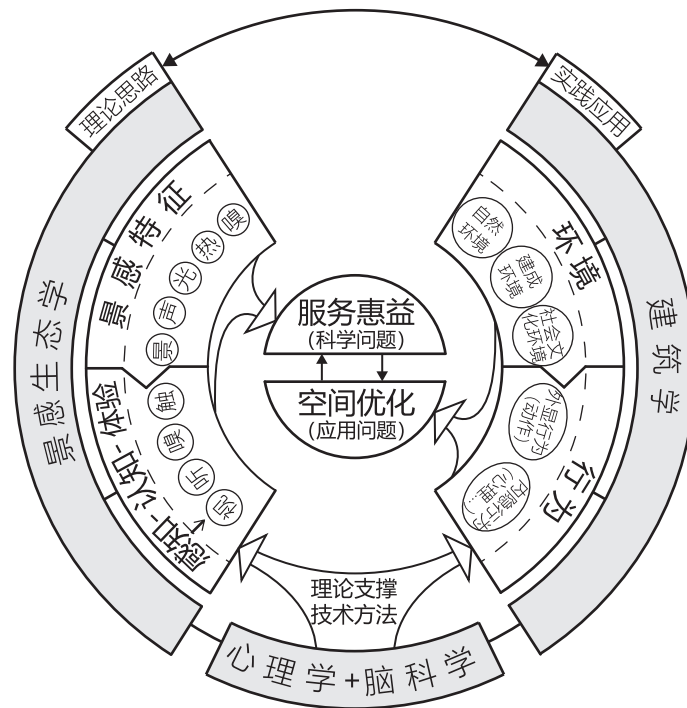


图1 “环境-感知”相互作用的跨学科支撑

Fig.1 Interdisciplinary support for “environment-perception” interactions

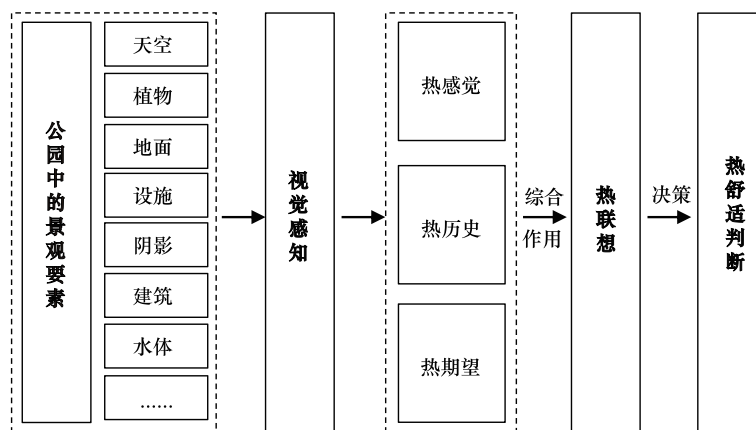


图2 热舒适判断的形成

Fig.2 Formation of thermal comfort judgment

应用^[49],为皮电的适用性增加了重要的佐证。因此,在视觉感知研究中,选择眼动(行为指标)和皮电(生理指标)作为内外结合的个体感知数据测量,能够在传统问卷基础上,提供客观的定量数据支撑与互证。

综上,依托景感生态学、环境行为学、心理学、脑科学等相关理论,在传统城市设计基础上,借鉴人因技术,在热环境感知中引入眼动、外周神经生理指标(皮电)的测度方法。实验发现,眼动与皮电是一组较理想的人因指标选项,采集设备之间干扰小,数据有效率高,且能从行为、生理两个维度进行互证,能充分解释视觉感知特征与情绪压力之间的关联,从而实现对传统单一心理数据的补充,使研究结论更为立体全面。研究将探索景观要素通过视觉感知影响个体热舒适判断的过程,揭示个体在环境信息处理过程中是一种怎样的认知状态,进而从心理学视角揭示感知过程的模式与内在规律,识别从景感场景到人群非物质惠益的有效路径。研究关注人地关系,旨在打破传统城市设计的固有思维,从设计层面提出了科学的热环境优化方法,为建设低碳节能、宜居亲人的未来城市提供更精细化、科学化的思路。

1 研究方法

1.1 研究对象

凤凰园位于福建省厦门市思明区深田社区(图3),是典型的老城区口袋公园。厦门地处亚热带海洋性季风气候分区,年平均气温 21°C ,相对湿度78%。全年温差较小,变化范围为 $12.7\text{—}28.0^{\circ}\text{C}$,月平均相对湿度超过65%。凤凰园占地约 0.7hm^2 ,周边有丰富的学校、医疗、市场等资源,公园西、北侧为中、高密度多层住宅,周边道路为人车混行双车道,人群活动密集。公园中部为大片硬质活动场地,配置景观小品及运动游乐设施,未设置遮荫设施,场地周围种植常绿乔木,主要为榕树、凤凰木、蓝花楹树等,高度5—10m不等,树冠饱满程度参差不齐,在不同太阳高度角影响下对中部广场形成不同的阴影投射效果,乔木下方多种植低矮灌木及草坪,人群活动主要集中于中部广场。

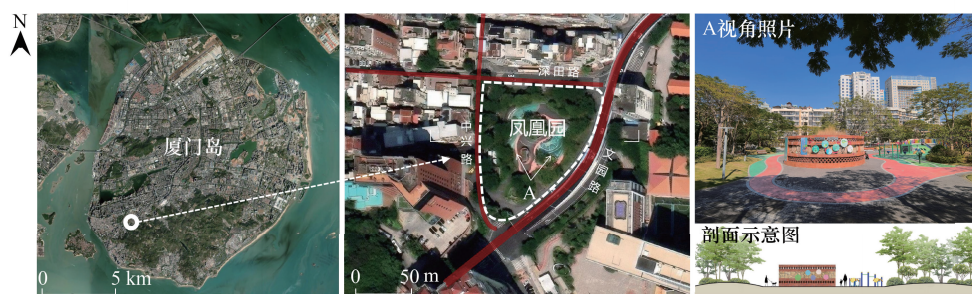


图3 凤凰园区位,实景照片与景观配置

Fig.3 Location of Phoenix Park, photo and landscape arrangements

1.2 研究框架

在景感生态学框架下,以凤凰园为例,选取多角度实景照片,利用图像语义分割、识别与量化,提炼出5个景观要素:天空、植物、地面、设施、建筑。在团队已开展的凤凰园热舒适研究中发现^[50],居民在春夏两季都存在热接受度较低的情况。具体为,春季有12%的居民认为公园热环境不舒适,夏季则高达45%;决定春季热环境是否舒适的最重要因素分别为气温与风速,而夏季则为太阳辐射与气温。而从人群活动来看,春季多数人群分布于阳光与阴影的交错区,夏季则多分布于阴影区。从热舒适投票可知,居民对夏季是否存在阴影区有较高的关注度,并普遍认为阴影是影响热舒适的重要因素。因此,在常规景观要素基础上,增加阴影作为研究夏季公园热环境的景观要素。

在脑科学、神经生物学等技术突破下,行为指标与生理指标开始能够被仪器测量,并在计算机技术与人工智能的支持下得到更准确的数据分析^[51—52]。行为指标应用较广泛的是眼动^[53]、面部表情^[54]、体态^[55]等。其中,视觉感知与眼动指标密切相关。在实验室环境中进行视觉刺激实验,测量行为数据(眼动)、生理数据(皮电)与心理数据(问卷),将景观要素特征与上述数据进行相关性分析,获得视觉行为特征、视觉心理认知规律,继而探索视觉感知对个体热舒适判断的影响机制(图4)。

1.3 实验设计

1.3.1 视觉刺激材料的准备

在真实公园场景中,人们通过视觉、触觉、听觉、嗅觉等接收复杂环境信息,最终形成热舒适判断。本研究尝试剔除或减弱其他感官影响,将视觉感知通道分离出来。具体做法:在实验室中开展测试,控制影响其他感官的环境变量。将温度恒定在 25°C 、湿度 $(50\pm3)\%$ 、照度 $(105\pm5)\text{Lux}$,并播放从目标公园采集的日常白噪音 $(40\text{dB}\pm10\text{dB})$ 。

视觉感知过程也被称为生物视觉过程,从光信号的接收、转换,到神经信号的传递加工,最终形成感知并用于指导行为^[56]。目前,已有学者建立了包含“色彩特征、景观要素、空间形式、景观意象”4个层次的景观视

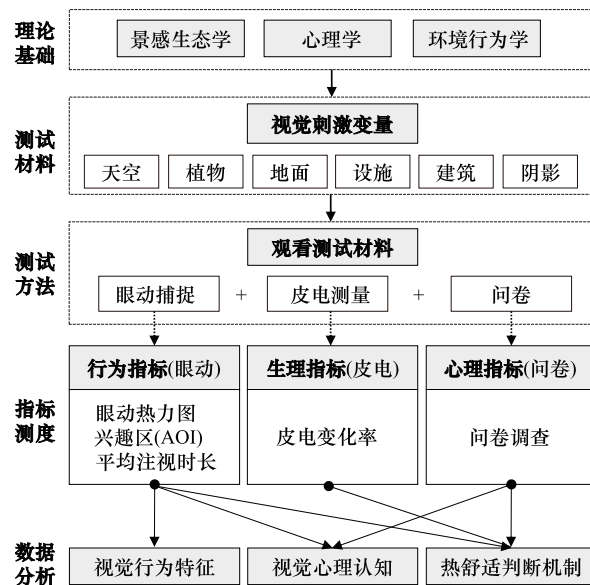


图4 研究框架图

Fig.4 Research framework

觉感知指标系统^[57]。其中,色彩特征产生于初级感觉阶段,景观要素及空间形式则形成于初级认知阶段,并在高级认知阶段形成最终的景观意向。本实验的视觉刺激材料采用公园实景照片,以人视(1.7m)高度平视视角进行采集,围绕中部活动场地一周向公园内侧拍摄,采集36张照片。采集时间为晴朗的初夏上午9:00,避开人、车等干扰因素。剔除角度、画面接近的照片,最终选取具有典型特征的10组样本(图5)。对样本中出现的6种景观要素(天空、植物、地面、设施、建筑、阴影)进行图像语义分割、识别与量化,计算各要素在景观场景中所占的比例(表1)。

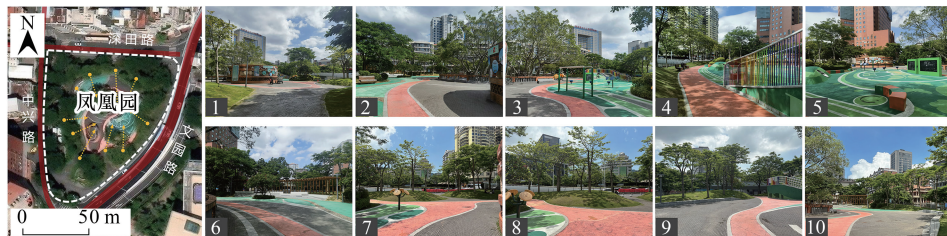


图5 拍摄点位及拍摄角度,十组样本照片

Fig.5 Shooting positions and angles, Ten sample photos

表1 十组样本中各景观要素占比/%

Table 1 The proportion of each element in each sample

样本 Sample	天空 Sky	植物 Plant	地面 Ground	设施 Facility	建筑 Building	阴影 Shade
1	23.89	55.86	19.47	6.05	9.27	18.00
2	14.66	43.61	29.00	7.57	14.14	9.00
3	16.07	41.44	26.04	11.15	10.00	20.44
4	5.71	34.23	17.11	20.14	14.95	30.12
5	12.12	29.97	35.03	13.18	14.13	28.00
6	16.62	27.78	32.33	9.12	5.70	26.15
7	13.92	34.36	30.81	2.26	11.58	12.89
8	15.01	31.26	28.00	3.31	6.66	7.71
9	20.46	19.58	31.66	5.19	12.94	4.78
10	19.83	12.27	21.06	5.90	11.13	1.93

部分要素有重合部分,因此各占比之和 $\neq 100\%$

1.3.2 实验过程

考虑到眼动及皮电测试的复杂性及接受度,减少个体地域差异和文化背景影响,增加样本丰富度和可靠性,本实验招募了在校大学生若干名,剔除有慢性病史(如内分泌、心血管、精神疾病等)、实验前 24 小时内睡眠不足或吸烟饮酒的个体,获得有效被试 40 名,男女比例 22:18,文科学生与理工科学生比例 12:28,年龄在 20—28 岁之间,在厦门稳定生活 2—5 年不等,以确保近几年内有较为一致的热经验与热历史。实验使用 Gazepoint GP3 眼动仪,采样速率为 60Hz,凝视精确度为 0.5°。使用 Physio.Lab 多通道生理记录仪的皮电传感器模块,分辨率 16bit,采样率 4000Hz(每通道)(图 6)。

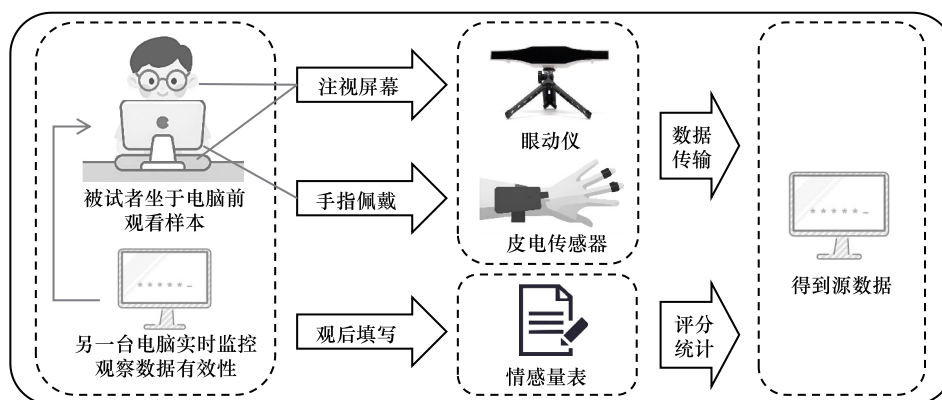


图 6 实验场景图示

Fig.6 Experimental scene

实验流程分为 3 阶段(图 7),全程用时 25min。实验开始前,安排被试提前 15 min 进入准备室调整身心状态,了解实验流程和注意事项,填写基础信息问卷,包括年龄、性别、身高、体重、睡眠质量、当前压力水平和健康状况等。准备阶段,被试在眼动仪和显示屏前就坐。左手佩戴皮电记录仪后,实验人员进行设备校准、基线测量(由于眼动仪限制,需全程保持同样坐姿,因此需提醒被试保持舒适坐姿),以确保设备运行正常。准备结束后开始实验,流程为“TSST 压力测试-观看样本照片-填写问卷”,按此流程重复 10 组。实验结束,移除设备,被试离场。特里尔社会压力测试(Trier social stress test, TSST),能够有效激发人的应激反应,如主观紧张度、汗腺分泌、皮质醇和促肾上腺皮质激素分泌量等^[58]。在 TSST 压力测试时可以获取加压状态下的皮电值,压力测试结束后,观看样本照片,获取非加压状态下的皮电值,两者前后变化比率即为皮电变化率,从变化率可以看出被试在前后不同压力水平下的生理应激状态。

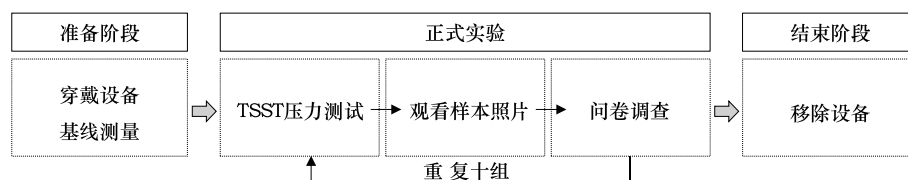


图 7 实验流程图

Fig.7 Experimental process

TSST:特里尔社会压力测试 Trier social stress test

2 结果与讨论

2.1 行为、生理、心理指标测算与分析

2.1.1 行为指标测度与眼动数据分析

依照正式实验顺序,分别收集行为、生理、心理三种数据。其中,行为数据来自眼动捕捉,记录被试通过视

觉接收景观信息的情况,反映视觉行为中的眼动规律;生理数据来自皮电测量,捕捉在视觉感知发生时个体的生理状态,反映当时的情绪变化情况;心理数据来自问卷调查,内容包括景观与热环境两方面,用于反映心理认知状态。

40 位被试分别注视每组样本照片 15s,共获取眼动数据 400 份。使用 Gazepoint GP3 配套软件,按照去除无效注视点、去除无效扫视、校准数据纠正、数据平滑的步骤进行数据预处理与清洗^[59]。剔除由于眨眼、头动超过眼动仪采集范围、注视时间过短或过长、扫视幅度异常、瞳孔大小变化异常等原因造成的无效数据 28 份,获得有效数据 372 份,有效采样率达 93%。分别导出十组样本的眼动热力图,并划分兴趣区 (Area of Interest, AOI),导出各兴趣区平均注视时长。

2.1.2 生理指标测度与皮电数据分析

皮肤电活动理论认为,交感神经系统受到压力时会激发汗腺活动,进而增加皮肤电导。皮电数据测量的是小电流下皮肤电阻的变化或皮肤不同部分的电位差,已被证实能有效地反映身心紧张程度及情绪压力水平^[60]。不同于脑电的是,皮电受眼动影响较小,且皮电测试设备较脑电设备具有功耗低、设备抗干扰性强、电路简单、使用便捷等优势。因此,在考虑与眼动测量结合时,皮电是最合适的选择。实验中,被试左手佩戴生理记录仪的皮电传感器,测量实验中不同阶段的皮电数据。

原始数据经人因研究多模态数据同步分析平台 HRT 导出至 MATLAB 软件,分析数据波动情况,剔除因设备接触不良等导致的无规律波动数据 48 份,获得有效数据 352 份,有效采样率达 88%。将皮电数据按不同样本分组,分别计算 TSST 压力测试阶段的皮电均值 EDA_a 与观看样本阶段的皮电均值 EDA_b ,计算获得皮电变化率 R_{EDA} 。计算公式如下:

$$R_{EDA} = \frac{(EDA_a - EDA_b)}{EDA_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_{EDA} :皮电变化率; EDA_a :加压状态下的皮电均值; EDA_b :观看样本时的皮电均值。

由于个体的汗腺分布、皮肤特点、情绪基线、交感神经系统反应能力、心血管系统协同能力、应激经历和适应性等差异较大,导致个体的皮电基值差异较大。但是,选用皮电变化率表征生理应激变化,可以有效减少除了影响瞬时皮电变化的因素以外的其他因素的影响,在心理研究中有广泛的应用^[61]。皮电变化率越高,说明该样本对被试的生理应激恢复效果越好;反之效果越差(表 2)。

表 2 十组样本的平均皮电变化率

Table 2 Average R_{EDA} of ten groups of samples

样本 Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
平均皮电变化率 Average $R_{EDA}/\%$	15.01	10.49	11.02	11.23	11.33	11.34	9.11	4.78	2.62	0.95

R_{EDA} :皮电变化率; EDA :皮电 Electrodermal Activity

2.1.3 心理指标测度与问卷设计

被试观看每组样本照片后,需填写问卷(表 3),目的有二:一是记录被试对该场景中印象深刻的景观要素,主要用于和眼动数据进行比对,结合心理、生理数据解释眼动规律;二是用于记录被试在通过视觉捕捉景观要素后,根据自身经验进行信息处理,并做出对该场景热舒适判断的经验依据。实验共收到 400 份问卷(十组样本,每组 40 份问卷),剔除无效问卷 12 份,获得有效问卷 388 份。

2.2 视觉行为特征与视觉心理认知

视觉感知规律可以从视觉行为特征与视觉心理认知两方面论述。

视觉行为特征,是符合眼球生理结构的视物特征。一般是指人们在观看、感知和处理视觉信息时所呈现出的固有行为模式或习惯。在目前国内外研究中,眼动追踪技术可以捕捉人们视觉行为特征,常利用眼动热力图、平均注视时长、瞳孔直径加情感恢复量表来呈现视觉行为,并且常与心率、皮电和脑电等指标协同分析。

表 3 实验中的问卷调查

Table 3 Thermal sensation questionnaire

景观要素:1.天空 2.植物 3.地面 4.设施(座椅、器械、景观小品等)5.阴影 6.建筑
Landscape Elements: 1. Sky 2. Plant 3. Ground 4. Facilities (seating, equipment, landscaping vignettes, etc.) 5. Shade 6. Architecture
1. 该场景中,您对上述哪些“景观要素”印象深刻?
由高到低排序: ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
2. 该场景中,您认为哪些“景观要素”更能影响公园的“热舒适体验”?
由高到低排序: ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
由高到低排序得分依次为:6、5、4、3、2、1

在心理学领域,凝视行为是一种视觉注意行为,凝视过程主要是注意力分配的问题^[62]。在凝视初期,主要遵循目标导向分配、显著性引导分配原则,注意力首先会根据个体的目标或意图进行分配;凝视中期,则进行细节聚焦与周边感知,个体在凝视主要目标时也会分配一部分注意力到周边环境,这是为了对环境进行整体把控;凝视后期,则开始信息整合,并出现转移倾向。通过眼动热力图(图 8)可以发现,人在正坐向前视物时,眼球活动以左右方向为主,因此水平向的信息可能比垂直向的信息更容易获得关注。通过分析 AOI 平均注视时长,可获得各景观要素受关注度排序,由高到低依次为:设施、植物、建筑、天空、地面(含阴影)(图 9)。需要说明的是,由于阴影与地面几乎重合,因此在注视时长统计中,将两者合并表示。其中,凝视的热点主要是设施(座椅、器械、景观小品等),这表明在公园场景中,人们更愿意以游乐、休憩为潜在目的进行视觉信息的捕捉,且对色彩丰富的人造构筑物更感兴趣,这与公园使用功能定位一致;而人们对其他要素如更贴近自然的植物、天空、地面等,则是采用快速扫视的方法获取所需信息,结论符合凝视心理特征(图 10)。

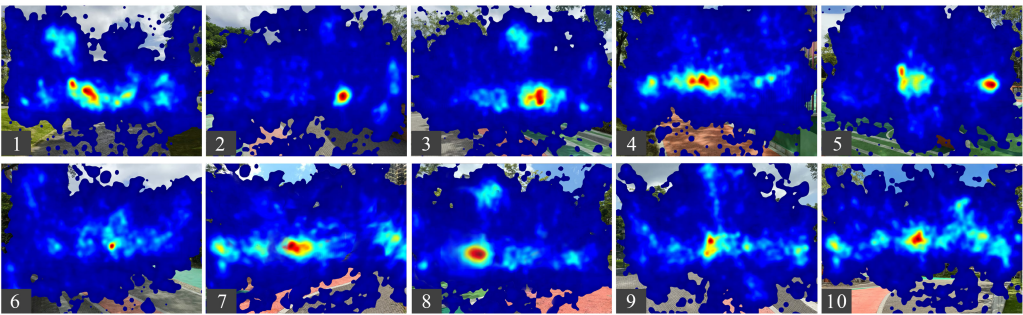


图 8 十组样本的眼动热力图

Fig.8 Eye movement thermogram of ten groups of samples

越偏红色代表注视越多,越偏蓝色代表注视越少

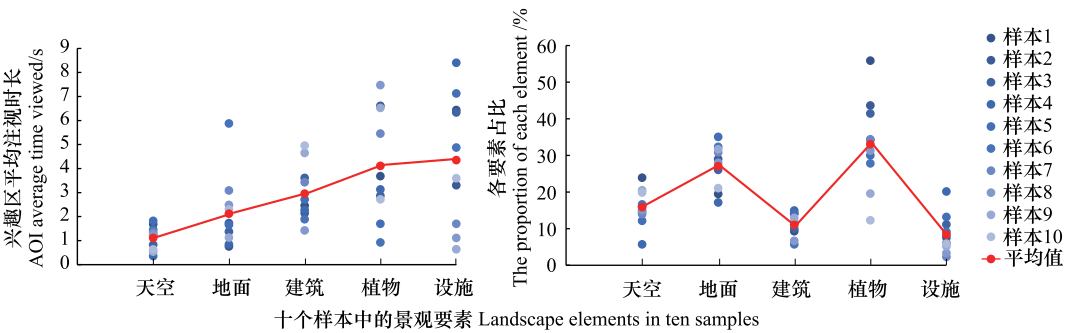


图 9 十个样本中各要素的平均注视时长及各要素占比的平均值对比

Fig.9 Comparison of the ave time viewed of each element and the proportion of each element in samples 1—10

AOI:兴趣区 Area of interest

在此基础上,由问卷获得的景观要素重要性排序也从一定程度上补充了诱发这种视觉行为特征的心理认

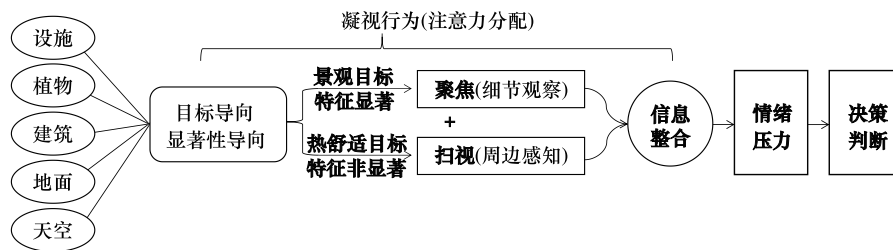


图 10 视觉感知的心理路径

Fig.10 The psychological path of visual perception

知原因。问卷统计结果发现(图 11),最令人印象深刻的景观要素(以下简称“景观印象”)排序由高到低依次为:设施、地面、植物、天空、建筑、阴影;影响公园热舒适体验的景观要素重要性(以下简称“热舒适印象”)排序由高到低依次为:阴影、植物、建筑、地面、设施、天空。对比各要素在两种排序中的差异发现:阴影的重要性排序呈现两级分化,这表示阴影给人留下的景观印象不深,但却被认为是影响热舒适判断的最重要因素;设施的重要性差异为第二,表示其作为景观印象最为突出,而对热舒适判断影响较小;其余要素的重要性差异均较为接近,说明景观印象与热舒适判断影响的重要性较一致。值得注意的是,不管从眼动热力图还是 AOI 平均注视时长,又或者在景观印象排序问卷中,都不难发现人们对阴影的关注度始终最低,这说明无论从视觉行为还是心理认知上,阴影都不是公园景观要素的重要部分。

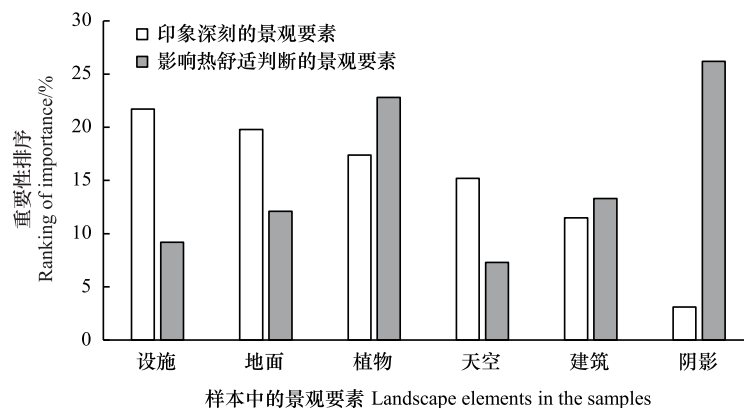


图 11 问卷数据统计

Fig.11 Questionnaire data statistics

综上,视觉感知过程中,公园的休闲娱乐功能是凝视行为发生的主要动因,与此目的相关的景观要素会受到更长时间的注视;而对热环境的判断则是通过快速扫视全域,在极短的时间内捕捉与热环境相关的要素信息,并根据自身经验(热感觉、热历史、热期望)形成对热环境的判断。

2.3 景观要素与皮电变化率的关联性分析

在明晰视觉感知规律后,需进一步分析景观要素对个体生理的影响,特别是如何影响个体做出相应的热舒适判断。

将样本中各景观要素占比率作为自变量、平均皮电变化率作为因变量,进行线性回归分析,运用 SPSS 软件进行斯皮尔曼相关性分析,计算 P 值(表 4)。

由表 4 可知,考虑单一要素的影响时,平均皮电变化率与阴影占比率相关性比较显著(图 12),与其余要素占比率相关性不显著,这表明被试的情绪压力是否放松可能还受到了其他潜在因素的影响。如观看到色彩明艳的游乐设施时,可能自然流露出愉悦的情绪,类似的还有景观要素的形状、纹理、位置等^[63]。结合团队已

开展的热舒适投票研究,可以表明:在湿热地区的室外公园,较好的遮阴能给人带来舒适的体感,这种热经历直接影响了人脑的认知判断,从而改变了生理状态,表明阴影可能从热舒适的层面为个体情绪压力恢复提供了积极的作用。

表 4 斯皮尔曼相关性分析

Table 4 Spearman correlation analysis

自变量 Argument	因变量 Dependent	相关系数 Correlation coefficient	显著性 <i>P</i> Significance	样本数量 Number	总结 Conclusion
地面 Ground	平均皮电变化率	0.018	0.960	10	不显著
天空 Sky		-0.091	0.803	10	不显著
建筑 Building		-0.139	0.701	10	不显著
植物 Plant		0.479	0.162	10	不显著
设施 Facility		0.612	0.060	10	不显著
阴影 Shade		0.818	0.004	10	较显著
阴影与植物 Shade and plant		0.964	<0.01	10	显著

$P<0.01$,表示两者相关性显著; $0.01<P<0.05$,表示相关性较显著; $P>0.05$,表示相关性不显著

值得注意的是,热舒适问卷显示,阴影是经验认知中影响公园热舒适的最重要因素,这和相关性分析一致。然而,问卷显示植物是影响热舒适的第二重要的因素,但相关性却不显著。这需要再次结合前述研究进行解释。热舒适投票研究认为,植物是能够提供阴影的潜在要素,因此人们常将植物与热期望进行关联,这就解释了为何在样本测试时植物对皮电变化率影响不显著,而在问卷中却又排序重要了。

鉴于植物与阴影潜在的因果关系,本研究尝试将平均皮电变化率与阴影、植物的总占比率进行线性回归分析。结果显示,平均皮电变化率与两者总占比率的 $P<0.01$,表示两者相关性非常显著(图 13)。表明当阴影、植物总占比率越高时,人们的情绪压力恢复水平越好。结合前期研究,人群在夏季户外活动时偏向选择阴影区,这种较常规的热经历,能够通过潜意识影响情绪与决策判断。当人们看到画面中的绿植与阴影占比较高时,就能快速联想起舒适的避暑状态,从而影响生理状态。

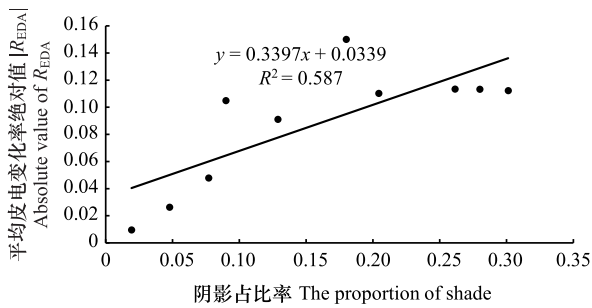


图 12 平均皮电变化率与阴影占比率的线性回归分析

Fig.12 Linear regression analysis of the $|R_{EDA}|$ and the proportion of shade

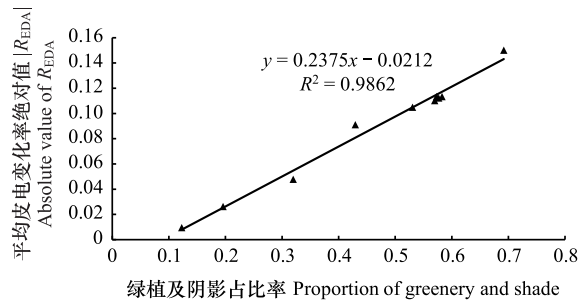


图 13 平均皮电变化率与阴影、植物总占比率的线性回归分析

Fig.13 Linear regression analysis of the $|R_{EDA}|$ and the proportion of shade and plant

由此可见,虽然被试没有身处真实环境,但公园景观要素仍然可以通过视觉感知的方式被捕捉。其中与热舒适相关的信息,则是通过无意识的快速扫视,经由大脑进行认知加工。被试可以搜索、提炼、加工由视觉捕捉到的与热环境相关的各项信息,结合自身的热感觉、热历史、热期望等经验,最终形成基于视觉信息与经验的热舒适判断结论。

研究揭示了景观要素通过视觉感知影响个体热舒适判断的过程,即“环境-(视)感知-体验-决策”过程,反映了个体在环境信息处理过程中的认知状态,揭示了心理学视角下凝视行为的普遍模式与内在规律,识别了

从景感场景到人群非物质惠益的有效路径。

3 结论

(1)对公园景观的视觉关注行为主要遵循个体的兴趣爱好、需求意愿;(2)人们更多地通过快速扫视的方式对与热环境相关的景观要素进行信息捕获;(3)视觉感知信息结合个体的热联想经验,最终转换为对热舒适体验的判断;(4)视觉刺激引发的皮电变化率和阴影、植物总体占比率呈现显著的正相关,说明阴影、植物总体占比率可能是影响公园热舒适体验的关键因素。本研究构建了基于行为指标(眼动)、生理指标(皮电)、心理指标(问卷)的三元互证框架,揭示了景观要素视觉感知的特征规律,揭示了视觉感知在热舒适判断中的作用机制。其中,包含三个关键环节:一是视觉信息的获取意愿及获取方式;二是视觉信息按照不同目的进行筛选提炼的过程;三是在目标(此研究中为判断热环境是否舒适)导向下结合经验进行认知、决策的过程,表达了“环境-感知-体验-决策”的映射路径。

研究以可持续发展为目标,突破了城市设计中追求绿视率、景观趣味性等的传统思路,在热环境优化目标下提出了绿植、阴影结合设计的新视角:(1)根据不同种类的绿植生长特点进行季节性遮荫设计,以应对不同地区、不同季节的遮荫需求。(2)根据太阳高度角变化规律合理布置绿植方位,测算乔木、灌木等形成的不同的阴影区域,合理布置活动场地与设施。(3)根据不同人群的日晒需求,在阴影区域设置相应的活动场地与设施。

研究过程还存在一些未尽之处,例如如何进一步减少个体差异对皮电数据准确性的影响,如何进一步优化被试的筛选标准以保证实验数据的科学性等,都对未来的实验设计提出了更高的要求。同时,景观要素是否通过其他潜在路径对热舒适判断发生影响,也是未来需要深入探究的问题。

参考文献(References):

- [1] 宋秋明,武晓勇,肖阳,李佩玲,石渝丰.绿色触媒:口袋公园建设驱动城市更新.中国园林,2022,38(S2):31-34.
- [2] 周聪惠,张彧.高密度城区小微型公园绿地布局调控方法.中国园林,2021,37(10):60-65.
- [3] Zhang H Y, Sun M P, Yao X J, Xie Z Y, Zhang M J. Increasing probability of record-population exposure to high temperature and related health-risks in China. *Environmental Research*, 2023, 231: 116176.
- [4] 李俊,郑婧,闵敏,李博,薛允恒,马亚宇,林瀚,任素玲,牛宁,高玲,刘延安,王立志,李泽椿.风云气象卫星观测在短时临近天气预报中的定量应用进展.光学学报,2024,44(18):24-36.
- [5] 金蓉,赵立华,郑林涛,钟雪,任鹏.无人机低空热红外遥感观测高度对地表温度反演的影响.建筑科学,2022,38(2):89-98.
- [6] Li Y, Yang M S, Bai H X, Li R, Liang J Q, Huang J X, Du Y N. A novel outdoor thermal comfort simulation model for heritage environments (OTC-SM-HE): Verify the effectiveness in Gulangyu, China. *Building and Environment*, 2023, 242: 110568.
- [7] Zhong X, Zhao L H, Wu R Z, Zhao H H, Zhang X, Ren P, Zhang Y. How to rapidly map outdoor mean radiation temperatures with high-spatial-resolution from UAV-derived multimodal images; a case study in Guangzhou. *Building and Environment*, 2024, 255: 111389.
- [8] Li J W, Liu N Y. The perception, optimization strategies and prospects of outdoor thermal comfort in China: a review. *Building and Environment*, 2020, 170: 106614.
- [9] Wang W Q, Li Y H, Li L, Wang R S, Wang Y Q. Study on thermal comfort of elderly in community parks: an exploration from the perspectives of different activities and ages. *Building and Environment*, 2023, 246: 111001.
- [10] 铨井修一,李永辉.建筑热环境对人体热生理反应的影响与实验模拟研究.新建筑,2019(5):18-22.
- [11] Ashrae S. Thermal environmental conditions for human occupancy. *Ansi/Ashrae 55—2013*. Atlanta: Ashrae, 2013.
- [12] 唐立娜,李竞,邱全毅,石龙宇,王豪伟,郑拴宁.景感生态学方法与实践综述.生态学报,2020,40(22):8015-8021.
- [13] Yan T K, Jin H, Jin Y M. The mediating role of emotion in the effects of landscape elements on thermal comfort: a laboratory study. *Building and Environment*, 2023, 233: 110130.
- [14] 康健,马蕙,谢辉,张圆,李忠哲.健康建筑声环境研究进展.科学通报,2020,65(4):288-299.
- [15] 刘江,米思乐,张雪薇,洪昕晨.城市公园植物景观空间声景感知特征及影响因素研究.中国园林,2023,39(2):43-49.
- [16] Tong Z, Liu X R, Song Y L, Guan H Y. The influence of odors on cognitive performance based on different olfactory preferences. *Building and Environment*, 2025, 271: 112603.

- [17] 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.
- [18] Wu Y S, Tang L N, Huang C B, Shao G F, Hou J D, Sabel C E. Enhancing human well-being through cognitive and affective pathways linking landscape sensation to cultural ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2024, 39(9): 175.
- [19] 王澜, 张霞, 谢澳林. 环境行为学视角下城市涂鸦的空间建构机制研究——以文创产业区为例. *城市发展研究*, 2024, 31(4): 125-134.
- [20] Chen J P, Zhao W J, Yuan G P, Wang L T, Zhou Y, Xiao X Y, Geng L N. Solastalgia and public environment-friendly behaviors in the urbanization context. *Environmental Impact Assessment Review*, 2025, 110: 107714.
- [21] Hou H Y, Lan H F, Lin M Q, Xu P P. Investigating library users' perceived indoor environmental quality: SEM-Logit analysis study in a university library. *Journal of Building Engineering*, 2024, 93: 109805.
- [22] Yeom S, An J, Hong T, Koo C, Jeong K, Lee J. Managing energy consumption and indoor environment quality using augmented reality based on the occupants' satisfaction and characteristics. *Energy and Buildings*, 2024, 311: 114165.
- [23] Ki D, Park K, Chen Z H. Bridging the gap between pedestrian and street views for human-centric environment measurement: a GIS-based 3D virtual environment. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 240: 104873.
- [24] He X, He S Y. Using mobile phone big data and street view images to explore the mismatch between walkability and walking behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, 180: 103946.
- [25] Yang S Q, Dane G, Arentze T A. Modeling pedestrians' activity time-use choices in a virtual urban public space: The influences of the environment and affective experience. *Cities*, 2024, 154: 105399.
- [26] Kartheek Medathati N V, Neumann H, Masson G S, Kornprobst P. Bio-inspired computer vision: towards a synergistic approach of artificial and biological vision. *Computer Vision and Image Understanding*, 2016, 150: 1-30.
- [27] Mayes H S, Navarro M, Satchell L P, Tipton M J, Ando S, Costello J T. The effects of manipulating the visual environment on thermal perception: a structured narrative review. *Journal of Thermal Biology*, 2023, 112: 103488.
- [28] Zhang D X, Jin X H, Wang L N, Jin Y H. Form and color visual perception in green exercise: Positive effects on attention, mood, and self-esteem. *Journal of Environmental Psychology*, 2023, 88: 102028.
- [29] Purves D, Monson B B, Sundararajan J, Wojtach W T. How biological vision succeeds in the physical world. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(13): 4750-4755.
- [30] Bohg J, Hausman K, Sankaran B, Brock O, Kragic D, Schaal S, Sukhatme G S. Interactive perception: leveraging action in perception and perception in action. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(6): 1273-1291.
- [31] Rose E A, Parfitt G. Pleasant for some and unpleasant for others: a protocol analysis of the cognitive factors that influence affective responses to exercise. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 2010, 7: 15.
- [32] Hassani A, Jancewicz B, Wrotek M, Chwałczyk F, Castell N. Understanding thermal comfort expectations in older adults: The role of long-term thermal history. *Building and Environment*, 2024, 263: 111900.
- [33] 许为, 高在峰, 葛列众. 智能时代人因科学研究的新范式取向及重点. *心理学报*, 2024, 56(3): 363-382.
- [34] Zhang F, Li X C, Lim C P, Hua Q, Dong C R, Zhai J H. Deep emotional arousal network for multimodal sentiment analysis and emotion recognition. *Information Fusion*, 2022, 88: 296-304.
- [35] 陈善广, 李志忠, 葛列众, 张宜静, 王春慧. 人因工程研究进展及发展建议. *中国科学基金*, 2021, 35(2): 203-212.
- [36] 张利. 城市人因工程学: 以人中心、以高品质空间为导向的设计干预新路径. *科学通报*, 2022, 67(16): 1727-1728.
- [37] 解雨歌, 洪婉婷, 马特奥·波利, 李方正. 人因视角融入的景观认知研究进展及展望. *风景园林*, 2022, 29(6): 63-69.
- [38] 刘凌汉, 吴美阳, 马艺萌, 屈海燕. 眼动追踪应用于景观领域的研究综述. *西部人居环境学刊*, 2021, 36(4): 125-133.
- [39] 李欣, 李渊, 任亚鹏, 拉斯克·安妮. 融合主观评价与眼动分析的城市空间视觉质量研究. *建筑学报*, 2020, (S2): 190-196.
- [40] Ye F, Yin M, Cao L L, Sun S Q, Wang X Z. Predicting emotional experiences through eye-tracking: a study of tourists' responses to traditional village landscapes. *Sensors*, 2024, 24(14): 4459.
- [41] 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. *中国园林*, 2021, 37(5): 38-43.
- [42] Amati M, Ghanbari Parmehr E, McCarthy C, Sita J. How eye-catching are natural features when walking through a park? Eye-tracking responses to videos of walks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 31: 67-78.
- [43] Yang K, Tong L, Shu J, Zhuang N, Yan B, Zeng Y. High gamma band EEG closely related to emotion: evidence from functional network. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2020, 14: 89.
- [44] Liu H R, Zhang Y, Li Y J, Kong X Y. Review on emotion recognition based on electroencephalography. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2021, 15: 758212.

- [45] 杨文阳, 徐可欣. 联合虚拟现实环境和脑电信号的情绪识别研究进展. 生物医学工程学杂志, 2024, 41(2): 389-97.
- [46] Murtazina A, Adameyko I. The peripheral nervous system. Development, 2023, 150(9): dev201164.
- [47] Shukla J, Barreda-Ángeles M, Oliver J, Nandi G C, Puig D. Feature extraction and selection for emotion recognition from electrodermal activity. IEEE Transactions on Affective Computing, 2021, 12(4): 857-869.
- [48] Lee G A, Choi B, Jebelli H, Ryan Ahn C, Lee S. Noise reference signal-based denoising method for EDA collected by multimodal biosensor wearable in the field. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020, 34(6): 04022004.
- [49] Kliangkhlao M, Haruehansapong K, Yeranee K, Tipsavak A, Sahoh B. Electrodermal activity and heart rate variability-driven personal thermal comfort prediction and explanation. Building and Environment, 2024, 265: 111921.
- [50] Li Z Y, Zhou L, Hong X Q, Qiu S H. Outdoor thermal comfort and activities in urban parks: an experiment study in humid subtropical climates. Building and Environment, 2024, 253: 111361.
- [51] Duan Y P, Li Z, Tao X M, Li Q, Hu S Z, Lu J H. EEG-based maritime object detection for IoT-driven surveillance systems in smart ocean. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 9678-9687.
- [52] Dehais F, Karwowski W, Ayaz H. Brain at work and in everyday life as the next frontier: grand field challenges for neuroergonomics. Frontiers in Neuroergonomics, 2020, 1: 583733.
- [53] Qin T, Fias W, van de Weghe, N, Huang, HS. Recognition of map activities using eye tracking and EEG data. International Journal of Geographical Information Science, 2024, 38(3): 550-576.
- [54] Sharafi M, Yazdchi M, Rasti R, Nasimi F. A novel spatio-temporal convolutional neural framework for multimodal emotion recognition. Biomedical Signal Processing and Control, 2022, 78: 103970.
- [55] Poyo Solanas M, Vaessen M, de Gelder B. Computation-based feature representation of body expressions in the human brain. Cerebral Cortex, 2020, 30(12): 6376-6390.
- [56] Yu R J, He L H, Gao C S, Zhang X H, Li E L, Guo T L, Li W W, Chen H P. Programmable ferroelectric bionic vision hardware with selective attention for high-precision image classification. Nature Communications, 2022, 13(1): 7019.
- [57] Cao Y H, Yang P F, Xu M, Li M M, Li Y, Guo R Z. A novel method of urban landscape perception based on biological vision process. Landscape and Urban Planning, 2025, 254: 105246.
- [58] 陈光辉, 孔艳红. 特里尔社会应激测验对儿童皮质醇分泌的影响. 心理发展与教育, 2016, 32(5): 532-538.
- [59] Vadillo M A, Street C N H, Beesley T, Shanks D R. A simple algorithm for the offline recalibration of eye-tracking data through best-fitting linear transformation. Behavior Research Methods, 2015, 47(4): 1365-1376.
- [60] Visnovcova Z, Mestanik M, Gala M, Mestanikova A, Tonhajzerova I. The complexity of electrodermal activity is altered in mental cognitive stressors. Computers in Biology and Medicine, 2016, 79: 123-129.
- [61] Sanches P, Höök K, Sas C, Ståhl A. Ambiguity as a resource to inform proto-practices. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2019, 26(4): 1-32.
- [62] 章琴, 王亚. 心智游移的眼动追踪研究进展. 心理科学, 2023, 46(3): 538-544.
- [63] 邱玲, 齐莹, 高天. 基于自然环境的视-听-嗅感知交互体验对居民福祉之研究综述. 中国园林, 2023, 39(11): 28-34.