

基于眼动追踪和主观评价的高层建筑空中花园疗愈效益测度与优化

李燕 杜宏武*

摘 要: 空中花园对公众身心健康的积极影响已得到初步证实, 但其在空间环境、生理反应、心理感受之间的系统机制仍需深入研究, 空间要素层面的导控支持亦显不足。以空中花园为对象开展疗愈效益测度与优化研究, 通过计算机视觉分析和文献荟萃明确空间构成要素及疗愈指标, 采用眼动追踪与注意力恢复量表刻画疗愈过程视觉生理反应与心理感知, 进而构建“空间-生理-心理”关联模型, 识别关键空间指标并提出针对性干预建议。结果表明: 1) 空中花园空间尺度、视觉进深是纾解视觉生理压力重要因素; 2) 具身尺度促进心理放松与沉浸体验; 3) 虚实度、天空开阔度、设施整洁度对疗愈效益具有积极影响, 而绿化景观作用呈双重性, 需灵活选择绿化品质表征指标。

关 键 词: 风景园林; 空中花园; 疗愈效益; 空间-生理-心理; 健康人居环境

文章编号: 1000-6664(2026)03-0068-08

DOI: 10.19775/j.cla.2026.03.0068

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-05-08

修回日期: 2024-09-13

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2025A1515011815)

高密度城市的高复杂性、异质性及变化性环境, 对人体健康具有显著的负面影响^[1], 继而凸显了与城市致密化进程相适应的空间紧凑型自然环境的必要性。空中花园以其空间灵活性、功能多样性、价值复合性, 逐步进入人们视野而大受青睐。作为应对城市问题的一种基于自然的解决方案^[2], 空中花园提升公众身心健康和福祉的疗愈作用已得到初步证实^[3-4]。

国内外研究学者针对公共空间行为活动和健康体验, 基于视觉观察的认知学分析, 开发了各种研究工具和分析量表, 通过行为观察、问卷调查、深度访谈、自我评估等方式获取数据以测度使用者健康促进活动及心理。其中, 包括PSPL调研法^[5]、SD语义分析法^[6]、注意力恢复量表^[7]、情绪状态量表^[8]以及基于扎根理论的影响要素研究^[9]等。随着神经科学与生理学研究的快速崛起, 基于生理反馈的感知体验捕捉^[10]和主观感受评价^[11]等方法在环境行为学领域得到广泛应用。尽管人们对空间的体验与感受在一定程度上得到进一步量化测度, 但对具体空间要素层面的导控支持仍旧不足。

视觉感知评价研究在“空间与心理”关联

及“生理与心理”关联2个方面均累积了一定成果。人们通过视觉感知获取空间环境信息直接诱发心理和情绪状态的变化^[12], 而探讨不同类型空间环境对于人们心理健康促进一直是疗愈环境领域所关注的重点之一。Kaplan提出了注意力恢复理论, Hartig进一步完善了注意力恢复量表, 在后续各种类型环境的疗愈性研究中不断被提及, 如城市公园、绿地、历史街区等^[13-15]。情绪分析是心理学研究的主要分支, 能够表征人对外部环境的心理感受和态度。拉塞尔指出复杂的情绪可以理解成代价和唤醒的二维情绪模型, 反映人们对特定事物积极或消极的反应以及情绪刺激程度^[16], 主流学术观点也认为自然环境对情绪的修复作用胜于建成环境^[17]。

从“生理与心理”方面来看, 已有不少学者从多个方面入手探讨人们眼动生理与其情绪、心理的关联关系。Carpenter在其“心-眼”假设中指出, 眼动是人类本能反应与意识反应相结合的产物, 也是人们视觉关注的外在表现^[18]。因此, 眼动分析常作为反映人们对于特定物质载体视觉关注度及审美偏好的重要手段, 通过直接反映并客观量化人的眼球运动^[19], 为研究者理解

人们从空间环境到行为决策的认知与心理提供可能。近年来, 注视次数、注视时长、瞳孔直径、扫视速度等眼动指标在解释个体感知恢复性的有效性得到验证^[20], 相关技术在人因测评、环境体验等领域得到了越来越多的应用。

综上, 不同类型的空间环境对于人们心理感知、情绪变化与视觉生理关联研究已有一定基础。然而, 较少有研究关注高层建筑空中花园这一高密度环境下涌现的补充性公共空间对公众身心健康促进的疗愈效益。现有城市绿色空间健康促进研究主要集中于公园绿地, 快节奏的城市生活使得公众难以实现120 min/周绿色空间暴露的健康促进建议^[21], 而高强度工作者更需要即时和反复的疗愈体验^[22]。与其他绿色公共空间相比, 空中花园尺度虽不大, 但与高层建筑内部空间联系更为紧密^[3], 利于增加人们社交、休憩等健康促进行为^[23]。因此, 本文以高层建筑空中花园作为研究对象, 融合主观评价和眼动追踪技术开展探索性的疗愈效益循证实验, 并对空中花园“空间-生理-心理”维度所涉及的多项影响因素逐级推演, 明确各项影响因子间的关联关系和影响作用。进而, 筛选出与空中花园疗

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: hongwudu@scut.edu.cn

愈效益紧密关联的主要空间指标,通过重要性-表现性分析确定其控制与发展建议。具体研究问题包括:1)不同类型空中花园生理、心理疗愈效益有何差别;2)哪些空间指标对空中花园疗愈效益的发挥影响较大;3)关键指标的干预策略和建议。

1 研究材料和方法

本研究主要包括5个主要步骤:研究问题提出、研究维度确定、数据收集、研究结果、分析及讨论(图1)。

1.1 疗愈效益指标筛选

为识别和量化空中花园疗愈效益发挥的潜在要素特征,本研究分3个阶段进行了探索性研究,具体如下。

1)刻画空中花园空间构成画像,初步掌握空中花园的基本空间结构。通过开放API的计算机视觉分析和人工识别,分别从空中花园网络图片提取26和15个空间变量。根据主成分分析方法,计算机视觉分析和人工识别的空中花园空间要素构成分别为7和5类,主要有城市景观、天空景观、高层建筑、公共设施、自然植被、水景景观和休闲活动^[24-25]。

2)系统梳理疗愈效益相关的典型空间要素。基于Web of Science、知网等数据库,以疗愈、健康促进等关键词进行检索,去除重复、关联不强及未开展要素量化分析的研究成果,最终获取53篇文献。其中,疗愈效益要素19种,频次449次。利用模糊统计中隶属度函数,筛选出隶属度高于频率均值的空间要素,即自然环境、水景、街道/道路、公共设施等。

3)空中花园疗愈效益指标筛选与量化。根据空中花园空间构成要素分析和疗愈效益量化指标梳理结果,确定空中花园发挥疗愈效益的潜在要素并进行量化。最终,确定7个维度共24项空间特征指标(表1)。

1.2 空中花园选取

本文是以往研究的延展,研究对象为选取的3类空中花园:“广场-公园”“休憩-停留”和“流动-通行”。广场-公园型空中花园主要是裙房花园、屋顶花园,空间尺度大、形态规整、景观丰富度高;休憩-停留型空中花园以空中庭院和空中露台为主,分布高度较高、空间尺度适中、形状相对规整、景观丰富度较高;流动-通

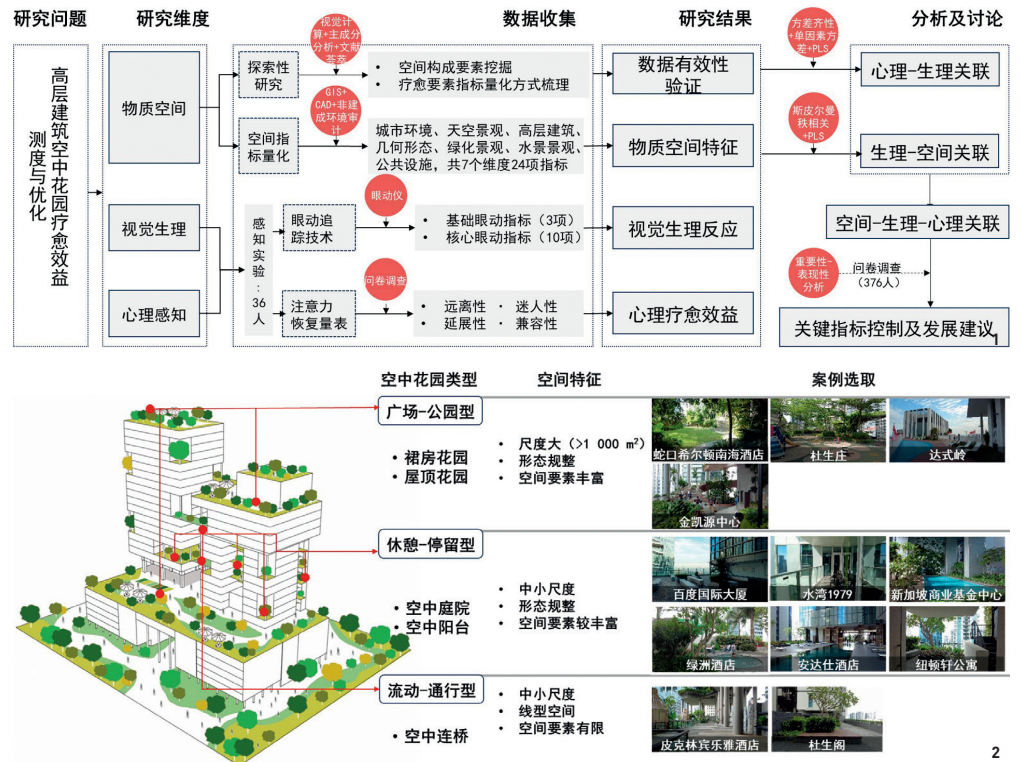


图1 研究框架

图2 空中花园类型特征及案例选取

行型空中花园则主要是空中连桥,形状指数高、呈线型形态,兼具交通功能。最终,共选取12例空中花园,其中,广场-公园型4例,休憩-停留型6例,流动通行型2例(图2),其典型性和类型差异性已得到初步验证^[26]。

1.3 场景采集及实验流程

实验场景影像样本主要利用大疆(Dji) Pocket 2手持云台相机,以距离镜头10~15 cm的人眼高度(约155 cm),对空中花园关键性场景进行图像采集,每个空中花园36张,共432张。选取36名受试者(男性、女性各18名)进行实验,采用Tobii F250遥测式眼动仪和注意力恢复量表(表2)记录受试者视觉刺激下的生理反应和心理变化。受试者被邀请到房间里完成实验,测试期间不允许其他人打扰,实验流程如图3所示。为避免连续作业引起的视觉疲劳对实验信度和效度的影响,同时收集更多实验数据并减少练习效应,每个受试者将进行2个实验单元,每个实验单元间隔5 min作为休息时间。

1.4 数据分析

1.4.1 实验数据有效性验证

对平均瞳孔直径、平均眨眼次数和平均眼跳次数3项基础眼动指标,采用配对T检验测试恢复阶段疗愈有效性。主观评价数据,采用SPSS

软件进行信度效度检验。结果表明,空中花园图像在视觉生理、心理感知方面均具有显著疗愈性(均小于0.05),其中远离性、迷人性、延展性和兼容性的克隆巴赫Alpha分别为0.91、0.94、0.92、0.89。

1.4.2 关联模型建构

基于空中花园“空间疗愈”影响要素的提取、量化及实证研究,逐级构建各类空中花园的“心理-生理”与“生理-空间”关联模型,从而明确各项指标间的相互影响关系。

1)“心理-生理”维度。首先,对心理疗愈感知4个维度数据进行标准化,依据标准化数值之和的正负,将心理疗愈类型分为2类。其次,以疗愈类型作为参考,分别对广场-公园型、休憩-停留型和流动-通行型空中花园中的10项核心眼动指标进行方差齐性检验和单因素方差分析:首次注视持续时间、总访问持续时间、平均访问时间、访问次数、注视总持续时间、平均注视持续时间、注视次数、平均瞳孔直径、平均眨眼次数和平均眼跳次数。当方差齐性检验需满足显著性大于0.05,单因素方差分析显著性小于0.05,则表示该指标在满足方差齐性的同时,对人们心理疗愈感知影响较大,以此筛选出影响疗愈感知心理反应的眼动生理指标。最后,采用

表1 高层建筑空中花园疗愈效益评价空间指标体系

维度	一级指标	二级指标	释义	指标算式
外部环境	城市环境	区位性	空中花园(X)距离城市中心(Heart)的直线距离。若空中花园所在城市为多中心城市，则选取与具体空中花园空间载体较近的城市中心	$Location = D(X - Heart)$
		功能混合度	空中花园所在建筑半径500 m范围内兴趣点类型(POI)的混合程度。 $i=1, \cdots, n$ ，为类别数量值； P_i 为某类兴趣点数量占兴趣点总数量的比值	$Diversity = - \sum_i^n (P_i \times \ln P_i)$
		路网密度	空中花园所在建筑半径500 m所有道路的总长度与区域总面积之比	$Network\ Density = L/Area$
		交通可达性	空中花园与最近地铁/公交站的直线距离	$Transportation = D(X - Subway\ Station)$
	天空景观	天空开阔度	空中花园中能够看到天空的比例，主要利用Photoshop软件的“直方图”功能，计算选取天空区域并计算像素数[PC(Sky)]与图片总像素数[PC(Picture)]的比值	$SO = \sum_i^{90} \frac{PC_i(Sky)}{PC_i(Picture)} / 90$
		天空曲折度	空中花园中看到天际轮廓线起伏错落程度。 ΔL 为天空轮廓线最低点到相应侧极高点的水平距离； ΔH 天空轮廓线最低点到相应侧极高点的高度差值	$Wave\ Range = \frac{(\Delta L_{\text{左}} + \Delta L_{\text{右}})}{(\Delta H_{\text{左}} + \Delta H_{\text{右}})}$
	高层建筑	容积率	空中花园所在高层建筑建设强度，为高层建筑总建筑面积与用地面积的比值	$FSI = \text{Gross Floor Area} / \text{Plan Area}$
		覆盖率	空中花园所在高层建筑建设紧凑度，为高层建筑占地面积与用地面积的比值	$GSI = \text{Built Area} / \text{Plan Area}$
		空地率	空中花园所在高层建筑非建设空间压力，为高层建筑用地面积与占地面积差值与建筑总面积的比值	$OSR = \frac{\text{Plan Area} - \text{Built Area}}{\text{Gross Floor Area}}$
		平均层数	所在高层建筑建设高度，为高层建筑总建筑面积与占地面积的比值	$LA = \text{Gross Floor Area} / \text{Built Area}$
内部环境	几何形态	空间面积	空中花园面积，通常空间活动范围与疗愈行为空间占比正相关	$SGA = \text{Sky Garden Area}$
		空间面积比	空中花园面积与所在楼层面积的比值	$SGSR = \text{Space Area} / \text{Floor Area}$
		虚实度	空中花园立面面积与所在楼层立面面积的比值，立面开口越明显，越容易被感知，从而提高人们交往行为发生的概率	$VSR = \text{Void} / \text{Solid}$
		位置高度	空中花园相对地面的高度	$LH = \text{Height}$
		位置高度比	空中花园相对地面高度与其所在建筑总高度的比值	$HSB = \text{Height} / \text{Height of Building}$
	绿化景观	绿视率	空中花园图像中绿色植被[PC _i (Green)]在人们视野[PC _i (Picture)]所占比率。 i 为空中花园空间图像样本数，共90张	$GVR = \sum_i^{90} \frac{PC_i(\text{Green})}{PC_i(\text{Picture})} / 90$
		植被丰富度	空中花园景观空间中植被的混合程度。根据植被结构层次度和植被自然性的低、中、高3个梯度界定了9种复合植被类型(TS，1~9分)，5位审计员(k)以非现场环境审计的方式进行测度并取其均值。 n 为空间节点数	$PSR = \sum_k^5 (\sum_i^n \frac{TS_i}{n}) / 5$
		植被垂直指数	计算植被轮廓线中最高点与视野高度的比值(H_i)，然后计算空中花园的植被群落均值。 m 为群落个数； n 为空中花园图像数	$VPI = \sum_1^n (\sum_i^m \frac{H_i}{m}) / n$
	水景景观	水域面积	空中花园内水景观观面积	$WA = \text{Water Area}$
		水域比	水景观观面积与空中花园面积的比值	$WSR = \text{Water Area} / \text{Sky Garden Area}$
		形状指数	空中花园水景观观形状复杂程度，水域形状特征主要取决于水域面积及形状特征点数量的影响，计算通过面积加权后的NSCP表征水域形状指数	$SI = NSCP \times \text{Water Area}$
	公共设施	设施多样性	归纳总结空中花园内的6项一级设施类型和23项二级设施类型的多样化程度、整洁程度和维护程度，5位审计员以非现场环境审计的方式进行测度并取其均值	$FD = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) / 5$
		设施整洁度		$FC = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5) / 5$
		设施维护度		$FM = (C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5) / 5$

PLS偏最小二乘估计法构建各类空中花园眼动生理与疗愈心理相关变量的关联模型。

2) “生理-空间” 维度。首先，依据各类空中花园筛选出的主要眼动指标，根据标准化指标数据的正负作用进行分类。其次，以眼动类型作为参考，采用斯皮尔曼(Spearman)秩相关系数对各类型空中花园空间指标进行检验并筛选。然后，采用PLS偏最小二乘估计法构建各类空中花园的物质空间与眼动生理相关变量间的关联模型。最后，分别讨论不同空中花园类型“空间-生理-心理” 疗愈效益关联路径中各项因素间的相互关系。

1.4.3 关键指标优化建议

根据“空间-生理-心理” 关联效益逐级构建的模型，筛选出影响各类空中花园疗愈性的关键空间指标，针对性地提出提升疗愈效益的干预措施及建议。重要性-表现性分析(importance-

performance analysis，IPA)是用于衡量服务、产品等质量满意度，并识别特征的相对重要性的分析方法^[27]，有助于判断研究对象的潜在缺陷并确定其发展的优先次序，现已广泛应用于各个领域^[28]。标准IPA图将重要性和表现性的度量融合至二维四象限图内，以表现性为横轴、重要性为纵轴，第一象限为优势竞争，第二象限为优先改进，第三象限为维持原状，第四象限为矫枉过正^[27]。而IPA图中分隔象限的垂直线和水平线的阈值设定，直接影响研究对象特征的象限分布^[29]，其位置可能导致现有的研究结果不一致^[30]。因此，一些学者提出基于实际数据均值、量表中心值(如7级李克特量表的4分值)、标准化数据原点(0，0)、对角线划分(向上45 ° 线)等方式构建象限解读研究对象特征。

本文选取专家、相关人员和大众共376人(分别为27、163、186人)，对空中花园各空间

要素疗愈效益的重要性进行1~10级打分，其中男性170人、女性206人。通过调查问卷结果来表征空中花园空间指标的重要性，而其表现性则通过量化指标结果加以体现。最后，综合原点法、均值法和对角线法来讨论影响各类空中花园疗愈效益的关键指标干预措施及建议。

2 结果与分析

2.1 空中花园空间特征

空中花园多分布于紧凑、密集的城市环境，致使其外部环境具有一定趋同性；而内部环境特征在各类空中花园差异性明显(图4)。广场-公园型和休憩-停留型空中花园，绿化景观、公共设施及空间尺度的品质较高，分别满足人们多样化及日常休憩的行为需求；流动-通行型空中花园空间面积比、虚实度指标表现突出，因线型、带状空间形态且纵向单边或两

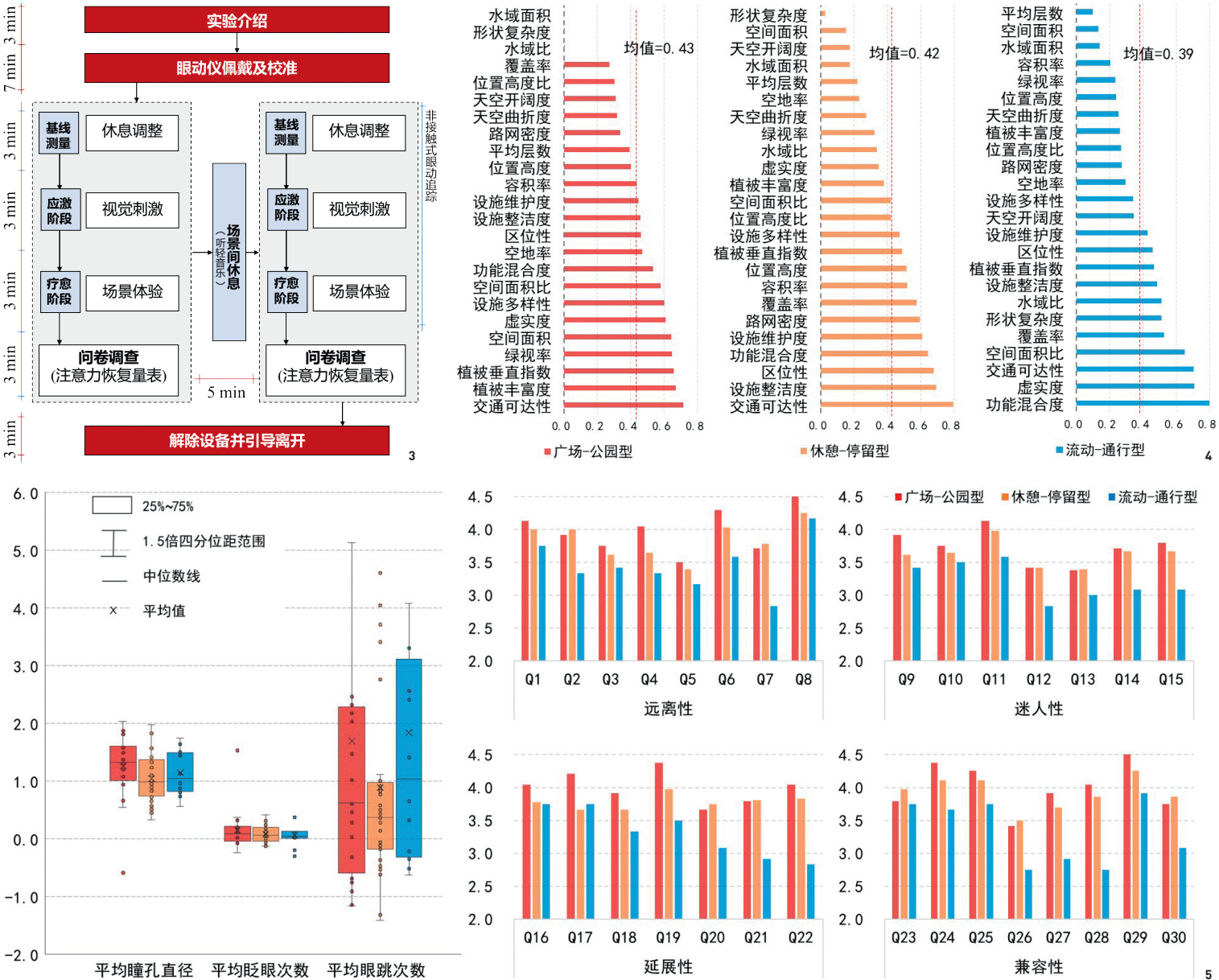


图3 实验流程

图4 各类空中花园7个维度24项空间特征归一化结果

图5 各类空中花园视觉生理和心理感知的疗愈效益表征结果

边开敞而空间醒目。天空景观在各类空中花园的品质均低于均值线，可能与周边高层建筑、内部植被、设施等遮挡天空景观有关。而水景景观仅在流动-通行型空中花园中品质较好，其中水域比得得益于此类空中花园尺度较小、形状复杂度得益于水景形态多样，而实际水域面积不大。

2.2 空中花园生理和心理疗愈效应

2.2.1 视觉生理反应

对受试者体验空中花园场景图像前后的视觉生理基础指标数据进行差值计算，当平均瞳孔直

表2 注意力恢复量表问卷题项

维度	序号及问题转述
远离性	Q1缓解焦虑；Q2缓解恐惧；Q3缓解愤怒；Q4缓解抑郁；Q5缓解孤独；Q6缓解压力；Q7暂时忘记所承担责任与义务；Q8暂时得到休息和放松心情
迷人性	Q9更多的探索与发现；Q10具有吸引力，产生好奇；Q11愿意花更多时间停留、观察；Q12流连忘返；Q13耳目一新的感觉；Q14有很多吸引人的要素；Q15有活力
延展性	Q16与周围环境连贯、协调；Q17要素间相互联系；Q18内容很丰富；Q19感到很舒服；Q20沉浸其中；Q21产生很多联想；Q22感到自由
兼容性	Q23从事我喜欢的活动；Q24很快适应环境；Q25找到自得其乐的方法；Q26是想象中空中花园的样子；Q27熟悉的感觉；Q28安全的感受；Q29可以畅快交谈；Q30得到尊重

表3 空中花园疗愈效益提升的空间指标建议

指标维度	指标名称	参考指标	空中花园类型	指标建议	释义
城市环境	功能混合度	区位性	广场-公园型	靠近城市中心区，优势竞争；远离城市中心区，优先改进	当功能混合度较大时，空中花园提供疗愈效益的潜力越大
			休憩-停留型		
			流动-通行型		
天空景观	天空开阔度	位置高度、空间围合度	广场-公园型	裙房类、庭院类，优先改进	天空开阔度较高时，人们接收视觉信息较少、视觉疲劳舒缓程度高、视觉松弛度高。该指标受到空中花园竖向高度、空间围合度影响，对流动-通行型空中花园疗愈效益影响较高
				屋顶类，优势竞争	
			流动-通行型	优势竞争	
	天空曲折度	—	休憩-停留型	优先改进	天空轮廓起伏变化较小时，视觉肌肉较松弛，人们的身心疗愈效益较高
高层建筑	覆盖率	—	广场-公园型	维持原状	高层建筑相关的密度指标对于人们的身心疗愈效益发挥重要性评价较低，其中覆盖率和平均层数对人们信息识别、眼部肌肉放松起到负向作用，空地率则相反
			休憩-停留型	矫正过正	
			流动-通行型	矫正过正	
	空地率	—	休憩-停留型	维持原状	
	平均层数	—	休憩-停留型	维持原状	
几何形态	空间面积比	空间面积	广场-公园型	优势竞争	空中花园空间面积比指标数值较高时，视觉信息识别接收信息较多，但眼部肌肉松弛程度高，表现出较好的疗愈效益
			休憩-停留型	露台式，优先改进	
				庭院式，优势竞争	
	虚实度	—	广场-公园型	优势竞争	空中花园虚实度较高时，人们接收到的信息多、视线活跃度高、肌肉松弛度高。该指标通过提升空间醒目程度，主要引起人们对空中花园在远离性和兼容性的疗愈感知
			休憩-停留型	优先改进	
			流动-通行型	优势竞争	
	位置高度比	—	广场-公园型	维持原状	位置高度比指标对疗愈效益影响较小
绿化景观	植被丰富度	绿视率	流动-通行型	优先改进	植被丰富度越高，视觉松弛度越高
	植被垂直指数	绿视率、植被丰富度	广场-公园型	优势竞争	植被垂直指数较大时，更能提升空间层次丰富程度，主要引起人们对空中花园在迷人性的疗愈感知
水景景观	水域比	—	休憩-停留型	优势竞争	水域比变化引起人们在延展性和迷人性的疗愈感知
公共设施	设施整洁度	—	广场-公园型	优先改进	设施整洁度较高表示空间品质较高，人们的愉悦度较高，能够引起人们在远离性、迷人性、延展性和兼容性的疗愈感知
			休憩-停留型	优势竞争	
			流动-通行型	优先改进	
	设施维护度	—	休憩-停留型	矫正过正	设施维护度高，人们接收到信息少、视觉松弛度高

径、平均眨眼次数和平均眼跳次数的应激-恢复差值大于0，则表示视觉相关的生理压力得到缓解。结果表明，3种空中花园的视觉生理反应均表现出疗愈作用：广场-公园型空中花园的平均瞳孔直径、平均眨眼次数和平均眼跳次数的压力缓解最高；流动-通行型空中花园的平均瞳孔直径和平均眼跳次数表现比较突出，而休憩-流动型空中花园仅在平均眨眼次数表征的视觉压力缓解方面比较突出。

2.2.2 心理疗愈效益

广场-公园型和休憩-停留型空中花园疗愈效益较高，流动-通行型空中花园各维度疗愈效益均较低：1)远离性，3类空中花园在Q8(暂时得到休息和放松心情)得分最高，广场-公园型空中花园缓解压力、焦虑等负面情绪的疗愈效益最好；休憩-停留型空中花园则在Q2(缓解恐惧)和Q7(暂时忘记责任与义务)的效益最好；2)迷人性，3类空中花园在Q11(愿意花更多时间停留、观察)得分最高，且广场-公园型最能吸引人们的

无意识注意，以提供身心状态恢复的机会；3)延展性，3类空中花园在Q19(感到很舒服)得分最高，广场-公园型空中花园空间层次丰富，且与周边环境具有较好的连贯性、协调感，而休憩-停留型空中花园在Q20(沉浸其中)和Q21(产生联想)的效益较高；4)兼容性，休憩-停留型更符合人们想象中空中花园的样子(Q26)，从事喜欢活动的程度更高(Q23)；而在环境适应(Q24)、找到自得其乐的方法(Q25)方面，广场-公园型空中花园疗愈效益更好(图5)。

2.3 “空间-生理-心理”疗愈关联分析

基于广场-公园型、休憩-停留型和流动-通行型空中花园“心理-生理”和“生理-空间”的关联效应的逐级分析，梳理了“心理疗愈”“视觉生理”及“物质空间”各个维度的影响作用，通过核心眼动指标、空间特征和感知疗愈数据，构建不同类型空中花园疗愈效益的量化关联(图6)。

根据空中花园“心理-生理”的模型路径来

看，广场-公园型、休憩-停留型和流动-通行型空中花园中，对心理疗愈影响效应最高的眼动指标分别为平均眨眼次数(视觉疲劳舒缓程度)、访问次数(视觉信息识别接收程度)和平均瞳孔直径(视觉松弛程度)。对比同类型空中花园不同维度心理疗愈影响，除了广场-公园型空中花园迷人性关联的访问次数和流动-通行型空中花园远离性关联的总访问持续时间和注视总持续时间，其他指标均为同向影响。表明在同类型空中花园景观空间，重要的眼动指标发生变化时，延展性和兼容性疗愈效益一般会同步变化，远离性和迷人性需要针对不同类型具体分析。

“生理-空间”疗愈关联路径分析发现，设施整洁度、天空开阔度、植被垂直指数、功能混合度、虚实度、水域比对视觉生理影响较大。但不同类型的空中花园，相同空间指标对疗愈感知影响也存在较大差异，甚至起到相反作用，如绿化相关指标。广场-公园型和流动-通行型空中花园植被垂直指数、植被丰富度越高，越能引起

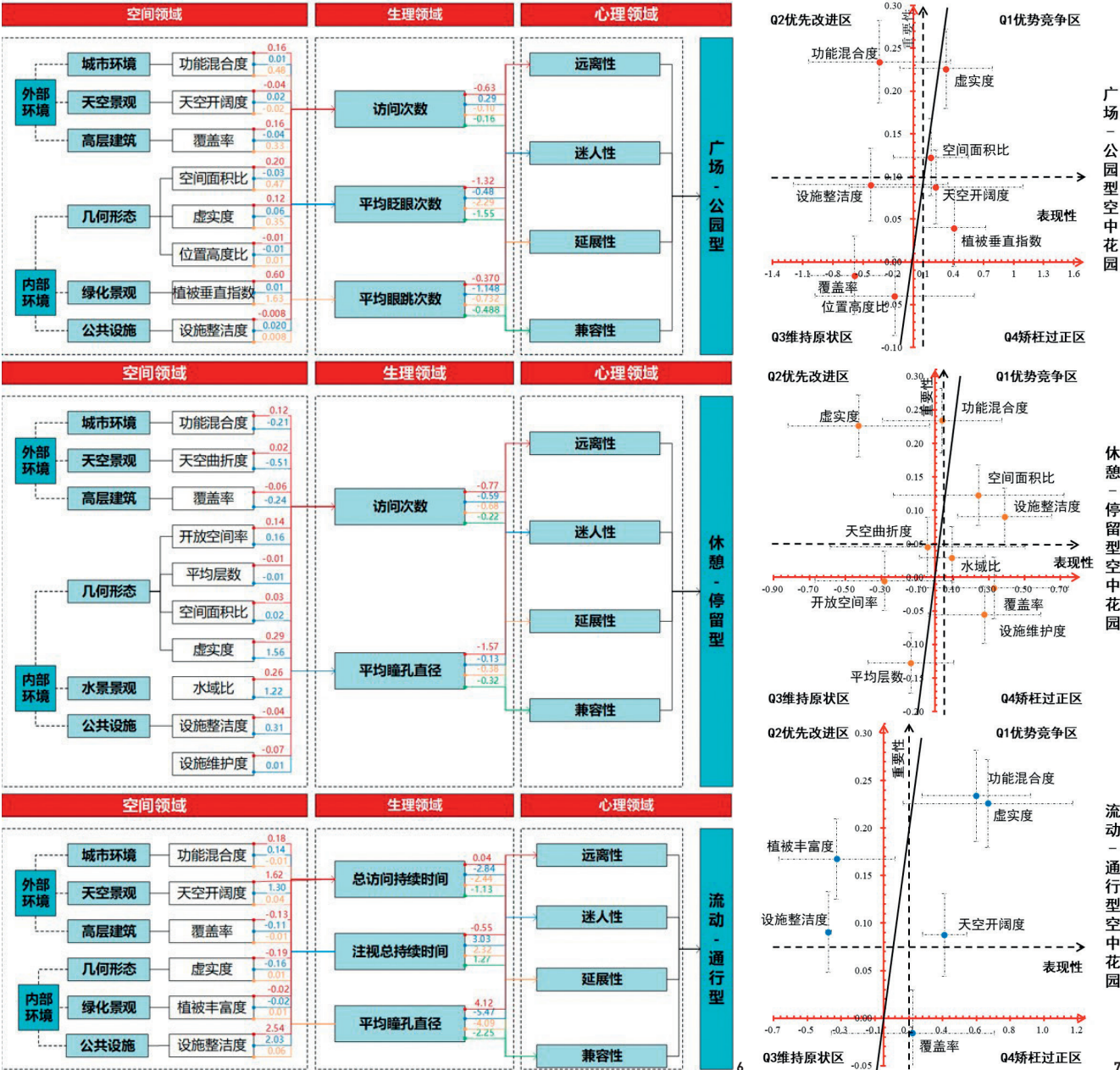


图6 各类空中花园“空间-生理-心理”关联效应路径
图7 各类空中花园重要性-表现性综合分析四分图

人们观景过程疗愈感知；但绿化景观品质较好的休憩-停留型空中花园，此维度的疗愈效益并不显著。因此，对于丰富的空间要素环境，可适当降低空中花园绿化景观要素的复杂性、改善空间通透性，避免资源的重复分配。

2.4 关键指标发展建议

根据“空间-生理-心理”逐级构建关联路径，将影响各类空中花园疗愈性IPA数据进行标准化处理。通过原点法、均值法、对角线法结合空中花园实际情况和各指标标准误差，并以优势竞争>优先改进>维持现状>矫枉过正的顺序，对

影响各类空中花园疗愈效益关键空间指标控制及发展进行分析(图7)。

整体而言，功能混合度、天空开敞度、虚实度、植被丰富度、公共设施整洁度等是影响各类空中花园疗愈效益的共性指标。但因各类空中花园发挥疗愈效益的指标属性存在一定异质性，进而针对性提出疗愈效益提升的发展建议(表3)。

3 结束语

本研究在3类空中花园中开展疗愈效益测度与优化研究。首先，通过计算机视觉分析和文献

荟萃明确空中花园空间构成要素及疗愈性空间指标；其次，采用眼动追踪技术探究人们状态恢复过程中视觉生理反应并通过注意力恢复量表了解心理疗愈感知情况；最后，逐级构建“空间-生理-心理”关联效益模型，筛选影响各类空中花园疗愈性关键空间指标，采用IPA针对性提出提升疗愈效益的干预措施及建议。结果表明：1)空中花园的空间尺度、视觉进深是缓解视觉生理压力重要因素；2)具身尺度的空中花园在对暂时忘记责任与义务、缓解恐惧、沉浸其中等心理疗愈具有显著影响；3)人们普遍接受了空中花园在高

密度城市的人居环境语境^[26, 31], 虚实度、天空开阔度、设施整洁度对疗愈效益发挥具有积极影响, 而绿化景观对疗愈效益的发挥存在积极与消极之分, 植被复杂程度、浓密程度、视线开敞度等也在一定程度上影响了其疗愈效益的发挥^[32]。由于样本数量及可获取数据的限制, 本研究在感知实验受试者类型、数量及指标选取和评估仍有一定局限性。未来将进一步细化空中花园类型、增加多样化受试者, 并针对不同需求增加相应指标, 以提高研究的深度和广度。

注: 文中图片均由作者绘制或拍摄。

参考文献:

- [1] VAN DER WAL J M, VAN BORKULO C D, DESERNO M K, et al. Advancing urban mental health research: from complexity science to actionable targets for intervention[J]. *The Lancet Psychiatry*, 2021, 8(11): 991-1000.
- [2] SEDDON N, CHAUSSON A, BERRY P, et al. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 375(1794): 20190120.
- [3] 林佳昕, 李燕, 杜宏武. 广州高密度住区空中花园的恢复性效益研究[J]. *中国园林*, 2023, 39(7): 59-64.
- LIN J X, LI Y, DU H W. Research on the Restorative Benefits of Sky Gardens in Guangzhou's High-density Residential Districts[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2023, 39(7): 59-64.
- [4] 王思远, 杜宏武. 珠三角高层办公建筑空中庭院的疗愈作用研究[J]. *南方建筑*, 2022(7): 29-35.
- WANG S Y, DU H W. The Healing Effects of Skycourts in High-rise Office Buildings in the Pearl River Delta[J]. *South Architecture*, 2022(7): 29-35.
- [5] GEHL J. *Life Between Buildings: Using Public Space*[M]. Washington, D.C.: Island Press, 1987: 128-143.
- [6] OSGOOD C E. The nature and measurement of meaning[J]. *Psychological Bulletin*, 1952, 49(3): 197.
- [7] HARTIG T, EVANS G W. Restorative effects of natural environment experiences[J]. *Environment and Behavior*, 1991, 23(1): 3-26.
- [8] BRADLEY M M, LANG P J. Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential[J]. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 1994, 25(1): 49-59.
- [9] GLASER B G, STRAUSS A L, STRUTZEL E. The discovery of grounded theory; strategies for qualitative research[J]. *Nursing Research*, 1968, 17(4): 364.
- [10] LAUMANN K, GÄRLING T, STORMARK K M. Selective attention and heart rate responses to natural and urban environments[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2003, 23(2): 125-134.
- [11] HAYWOOD K M. Visitor-employed photography: An urban visit assessment[J]. *Journal of Travel Research*, 1990, 29(1): 25-29.
- [12] 刘易斯, 哈维兰-琼斯, 巴雷特. 情绪心理学[M]. 3版. 南莎, 译. 北京: 电子工业出版社, 2015: 93-112.
- LEWIS M, HAVILAND-JONES J M, BARRETT L F. *Handbook of Emotions*[M]. 3rd edition. Translated by NAN S. Beijing: Electronics Industry Press, 2015: 93-112.
- [13] BORNIOLO A, PARKHURST G, MORGAN P L. Psychological Wellbeing Benefits of Simulated Exposure to Five Urban Settings: an Experimental Study From the Pedestrian's Perspective[J]. *Journal of Transport & Health*, 2018, 9: 105-116.
- [14] NORDH H, EVENSEN K H, SKÅR M. A peaceful place in the city: A qualitative study of restorative components of the cemetery[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167: 108-117.
- [15] 严晶, 张甜甜. 基于社会恢复性城市主义的苏州古城片区城市更新设计[J]. *中国名城*, 2025, 39(10): 16-25.
- YAN J, ZHANG T T. Urban Renewal Design of Suzhou Ancient City Area Based on Social Restorative Urbanism[J]. *China Ancient City*, 2025, 39(10): 16-25.
- [16] RUSSELL J A, SNODGRASS J. Emotion and the environment[M]//STOKOLS D, ALTMAN I. *Environmental Psychology*. New York: John Wiley & Sons, 1987: 245-281.
- [17] 陈箴, 翟雪倩, 叶诗韵, 等. 恢复性自然环境对城市居民心智健康影响的荟萃分析及规划启示[J]. *国际城市规划*, 2016, 31(4): 16-26.
- CHEN Z, ZHAI X Q, YE S Y, et al. A Meta-analysis of Restorative Nature Landscapes and Mental Health Benefits on Urban Residents and Its Planning Implication[J]. *Urban Planning International*, 2016, 31(4): 16-26.
- [18] JUST M A, CARPENTER P A. Eye fixations and cognitive processes[J]. *Cognitive Psychology*, 1976, 8(4): 441-480.
- [19] YARBUS A L. *Eye movements and vision*[M]. New York: Springer, 2013: 19.
- [20] 付而康, 王艺瀚, 周佳玟, 等. 眼动分析用于社区公园恢复性环境评价初探[J]. *南方建筑*, 2022(6): 93-99.
- FU E K, WANG Y H, ZHOU J W, et al. A Tentative Research of Restorative Environmental Evaluation of Community Parks Base on Eye Movement Analysis[J]. *South Architecture*, 2022(6): 93-99.
- [21] WHITE M P, ALCOCK I, GRELLIER J, et al. Spending at least 120 minutes a week in nature is associated with good health and wellbeing[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 7730.
- [22] HU C, ZHU K, HUANG K, et al. Using natural intervention to promote subjective well-being of essential workers during public-health crises: A Study during COVID-19 pandemic[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2022, 79: 101745.
- [23] POMEROY J. *The Skycourt and Skygarden: Greening the urban habitat*[M]. London: Routledge, 2014: 44-47.
- [24] LI Y, DU H W. Research on the spatial characteristics of sky gardens based on networked pictures: a case study of Singapore[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2022, 21(6): 2247-2261.
- [25] 李燕, 杜宏武. 高层建筑空中花园空间感知及需求研究[J]. *中国园林*, 2024, 40(9): 57-63.
- LI Y, DU H W. Research on the Spatial Perception and Demand of Sky Gardens in High-rise Building[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2024, 40(9): 57-63.
- [26] LI Y, DU H W. Research on the restorative benefits of sky gardens in high-rise buildings based on wearable biosensors and subjective evaluations[J]. *Building and Environment*, 2024, 260: 111691.
- [27] MARTILLA J A, JAMES J C. Importance-Performance Analysis[J]. *Journal of Marketing*, 1977, 41(1): 77-79.
- [28] SEVER I. Importance-performance analysis: A valid management tool?[J]. *Tourism Management*, 2015, 48: 43-53.
- [29] BACON D R. A Comparison of Approaches to Importance-Performance Analysis[J]. *International Journal of Market Research*, 2003, 45(1): 1-15.
- [30] AZZOPARDI E, NASH R. A critical evaluation of importance - performance analysis[J]. *Tourism Management*, 2013, 35: 222-233.
- [31] LI Y, DU H W. The Improving of Sky Gardens' Environmental Quality from a Health Promotion Perspective[J]. *Land*, 2024, 13(6): 13060894.
- [32] 刘昆, 匡晓明, 奚婷霞, 等. 健康睦邻社区的街道边界探索: 眼动和行为学证据[J]. *时代建筑*, 2022(5): 28-37.
- LIU K, KUANG X M, XI T X, et al. Exploring Street Edges in a Healthy Livable Neighborhood Evidence from Eye-Tracking and Behavioral Data[J]. *Time + Architecture*, 2022(5): 28-37.

(编辑/王媛媛)

作者简介:

李燕

1992年生/女/新疆阿勒泰人/同济大学建筑与城市规划学院在站博士后/研究方向为恢复性环境、计算性城市设计(上海200092)

杜宏武

1970年生/男/河南西平人/博士/华南理工大学建筑学院教授, 博士生导师/研究方向为高密度环境、城市公共空间及恢复性环境(广州510641)

Measuring and Optimizing Sky Garden Restoration Benefits in High-rise Buildings Based on Eye-tracking and Subjective Evaluation

LI Yan, DU Hongwu*

Abstract: As important supplementary green spaces in high-density urban environments, sky gardens have been increasingly recognized for their potential to promote public physical and mental health. Existing studies have preliminarily evidenced their restorative benefits; however, the underlying mechanisms linking spatial environmental characteristics, physiological responses, and psychological perceptions remain insufficiently understood. In particular, there is still a lack of evidence-based guidance at the level of specific spatial elements, which limits the translation of theoretical findings into practical design and optimization strategies. Against this background, this study takes sky gardens as a research object and aims to systematically measure, interpret, and optimize their restorative benefits from an integrated "spatial-physiological-psychological" perspective. First, drawing on computer vision-based semantic segmentation and a comprehensive literature review, key spatial composition elements and restorative indicators of sky gardens are identified, providing a quantitative foundation for subsequent analysis. Based on this framework, eye-tracking experiments are conducted to capture individuals' visual physiological responses during restorative processes, including attention allocation and visual stress indicators. Meanwhile, psychological restorative perceptions are assessed using the perceived restorativeness scale, covering dimensions such as being away, fascination, coherence, and compatibility. By integrating objective physiological data and subjective psychological evaluations, this study constructs a hierarchical association model linking spatial attributes, visual physiological responses, and psychological restorative outcomes. Subsequently, the proposed "spatial-physiological-psychological" model is applied to different types of sky gardens to identify key spatial indicators that significantly influence restorative benefits. To further enhance the applicability of the findings, an importance-performance analysis (IPA) is employed to distinguish priority spatial elements that require targeted intervention and optimization in design practice.

This approach allows not only the identification of influential factors, but also the formulation of practical strategies for improving restorative performance under constrained urban conditions. The results reveal several notable patterns. First, spatial scale and visual depth are identified as critical factors in alleviating visual physiological stress, indicating that appropriate spatial openness and depth perception play a vital role in reducing visual load. Second, sky gardens designed at an embodied scale significantly enhance psychological restorative experiences, particularly in terms of temporarily forgetting responsibilities and obligations, alleviating fear and tension, and fostering immersive engagement with the environment. Third, users generally demonstrate a high level of acceptance of sky gardens within high-density urban living contexts. Among spatial attributes, void-to-solid ratio, sky openness, and facility cleanliness exhibit consistently positive effects on restorative benefits. In contrast, the effects of green landscapes are found to be dual in nature, showing both positive and negative influences depending on their spatial configuration and quality. This finding highlights the necessity of flexibly selecting appropriate indicators to represent greenery quality rather than relying solely on quantity-based measures. Overall, this study provides an integrated analytical framework for understanding and optimizing the restorative benefits of sky gardens by bridging spatial design, physiological responses, and psychological perceptions. By combining computer vision techniques, eye-tracking data, and subjective evaluations, the research offers evidence-based insights that support more precise spatial control and targeted design interventions. The findings contribute not only to the theoretical understanding of restorative environments in high-density cities, but also to the practical guidance for designing and upgrading sky gardens to better support public health and well-being.

Keywords: landscape architecture; sky garden; restorative benefit; "spatial-physical-psychological" association model; healthy living environment

Biography

LI Yan, female, born in 1992 in Altay, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ph.D., Postdoctoral Researcher of College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, research area: restorative environment, computational urban design (Shanghai 200092)

DU Hongwu, male, born in 1970 in Xiping, Henan Province, Ph.D., Professor and Doctoral Supervisor in School of Architecture, South China University of Technology, research area: high-density environments, urban public spaces, restorative environment (Guangzhou 510641)