

摘要 山地城市公园阶梯步道中居民感知、行为、环境之间密切相关，多模态数据结合推动了现场实验环境下立体空间具身感知研究。以重庆市枇杷山公园中2处典型阶梯空间形成的上下4条路径为空间研究对象，对多模态感知数据与环境数据进行耦合分析，研究路径与节点环境、视声环境、运动方式等差异对被试感知的影响。结果表明：压力舒缓感知程度由高到低的排序为自然下行>人工下行>自然上行>人工上行；上下阶梯环境中，人的生理反应和心理感知评价并非完全一致；由于山地环境整体影响，不同路径中同一空间要素也会产生生理感知差异。

关键词 山地城市公园 阶梯空间 具身感知 人因实验 多模态数据

ABSTRACT Residents' perceptions within the stairway space in mountain city parks are closely related to their behaviors and the surrounding environment, and the combination of multimodal data facilitates the study of three-dimensional spatial embodied perceptions in a field test setting. Taking four stairway paths, including both upward and downward paths, formed by two typical stairway spaces in Pipa Mountain Park as the spatial research objects, a coupled analysis of multimodal perception data and environmental data is conducted to study the impact of subjects' perception under the differences in path and node environment, visual and acoustic environment, and movement direction. The research findings are as follows: 1) The order of perceived stress relief is natural stairway downward > artificial stairway downward > natural stairway upward > artificial stairway upward. 2) In the stairway environment, people's physiological response and psychological perception evaluation are not entirely congruent. 3) The same spatial elements in different stairways also give rise to physiological perception disparities due to the overall influence of the mountain environment.

KEY WORDS mountain city park; stairway space; embodied perception; ergonomics experiments; multimodal data

DOI 10.12069/j.na.202406020

中图分类号 TU986 **文献标志码** A **文章编号** 1000-3959 (2024) 06-0004-07

基金项目 国家自然科学基金项目 (52478006, 51908078)

本文引用格式

宫聪, 杨昕雨. 基于多模态数据的山地城市公园阶梯空间具身感知研究[J]. 新建筑, 2024 (6): 4-10.

GONG C, YANG X Y. Research on embodied perception of stairway space in mountain city parks based on multimodal data[J]. New Architecture, 2024(6): 4-10.

宫聪 杨昕雨

GONG Cong YANG Xinyu

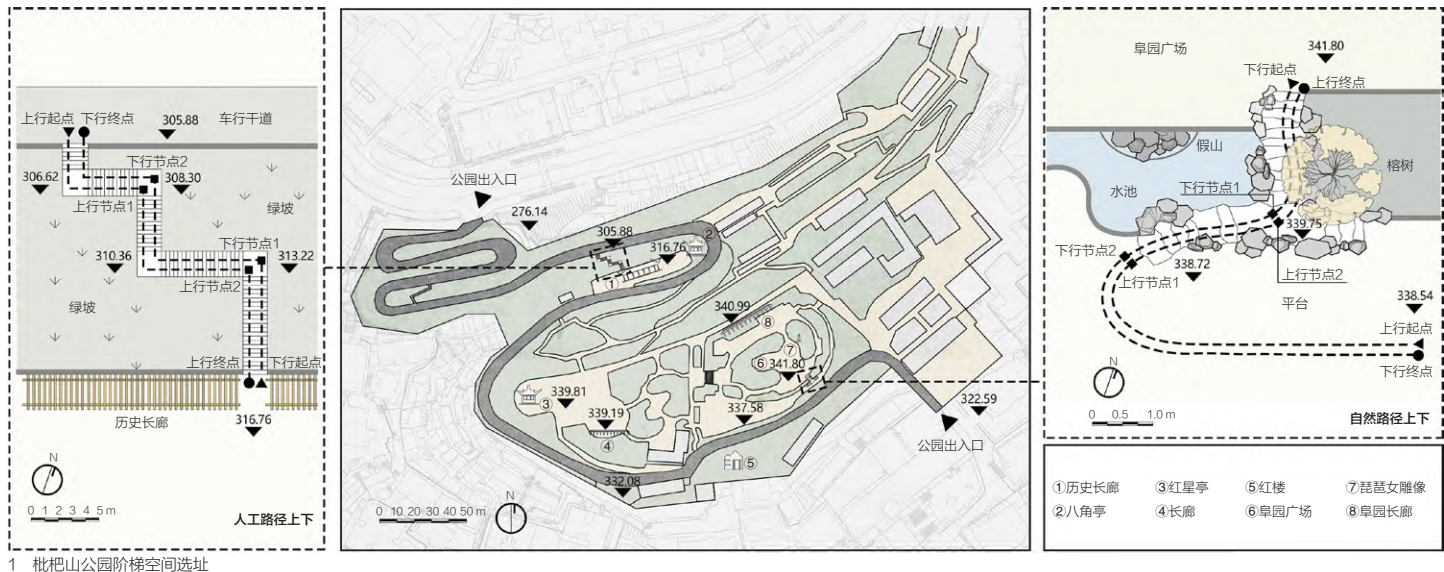
基于多模态数据的山地城市公园阶梯空间具身感知研究

Research on Embodied Perception of Stairway Space in Mountain City Parks Based on Multimodal Data

山地城市公园是承载居民日常休闲活动的主要场所，其中阶梯空间作为公园步道体系及垂直交通网络中的重要构成，在公园中起到组织立体游览景观轴线、界定三维生态公共空间、引导游客感知山地环境等作用^[1]。因此，确定并度量使用者在山地城市公园阶梯空间的感知影响因素，对提升该类重要空间感知品质以及优化公园设计具有重要意义。人的感知过程映射到城市环境中，会形成感觉、知觉、认知与行为4个阶段依次递进的感知层次^[2]。具身感知理论强调身体与环境互动的可能性，身体的状态影响感知过程的进行，环境的变化也会对身体与感知产生本质影响^[3]，具身感知信息可以基于生理、心理、行为等数据来反映与测量。目前建成环境感知研究多集中于实验室环境模拟，而阶梯环境中行为与感知密切相关，对于不同类型阶梯、上下阶梯差异条件下影响具身感知的空间要素，还需要进一步进行现场实验研究。

近年来数据类型与感知识别方法呈现多元化趋势。心理学考察城市环境对感知的影响，认知神经学关注生理器官如何处理信息，环境行为学观察研究个体行为规律^[4]。在交叉学科背景下，多模态数据类型的交叉与整合研究有助于更全面地理解城市环境中公众具身感知形成、表达和调节的复杂过程^[5]。研究借助便携式可穿戴人因设备与问卷量表，以重庆市渝中区枇杷山公园为例，选取地形高差与空间变化丰富的两处阶梯路径为空间研究对象，收集被试在上下阶梯过程中包括生理电、眼动、脑电、问卷量表等表征生理感知与心理感知的多模态数据，以及客观环境数据，借助ErgoLAB平台与SPSS进行关联分析，探索影响被试视听感知的阶梯空间整体作用与节点要素特征，以期阶梯这一重要山地城市空间提供科学的感知机制解析与优化方法参照。

[作者单位] 重庆大学建筑城规学院 (重庆, 400030)



1 枇杷山公园阶梯空间选址

1 相关研究进展与趋势

在城市精细化更新背景下，建筑学经历了从“离身”到“具身”的范式转换，城市公共空间感官环境的改善已成为提升空间品质的重要手段^[2]。“具身感知与公园”相关研究近年来在技术方法、内容主体、空间影响因素等方面呈现多样化。方法层面，主要包含：以现场作为多感官刺激源的实地调研法、感官漫步法、现场实验法和行为观察法；以实验室结合人因工具的实验方法；以社交媒体众包数据为数据源的方法^[6]。内容方面，其一，涉及公园空间尺度、类型、特征等环境异质性形成的感知差异测度与机制研究^[7-9]。其二，涉及不同人群的感知研究，其中以中青年为主要压力群体，结合样地类型及多感官交互的实证研究最丰富^[10]。其三，涉及感知分类与整合研究，例如五感、感知偏好、满意度、舒适度、场所依恋等多维心理感知^[6]，脑电、眼动、生理电等生理感知^[11-12]，以及心理与生理感知耦合研究^[13-14]；此外，探索视听环境品质已成为城市感知研究中的重要方向^[15]。其四，涉及空间与感知、行为之间的关联机制，例如研究指出空间中视觉效果评判直接影响游客的心理感知以及慢行行为的积极性^[16]。关于公园感知的影响因素，已证实自然要素是发挥积极感知裨益的多感官刺激源，且和谐匹配的视听组合有助于改善整体环境偏好和舒适度、声景舒适度等^[6]。从目前公园感知研究成果来看，针对山地环境中感知影响因素的研究有待深入，心理与生理感知关联结果不明确，视声环境对感知的影响机理仍需进一步挖掘。

山地城市空间中多维感知与行为活动往往相互影响^[17]。一方面，身体活动在心境状态、焦虑、应激与紧张、主观良好感、抑郁、自我概念和自我效能等方面存在感知影响^[18]；另一方面，感知也会影响身体活动的持续性^[19]。山城景观中介于客观环境与行为活动之间的内在美学意境感知是影响恢复性体验的重要心理因素^[20]。因此，选择阶梯步道作为研究对象，可以深入探讨山地环境中运动行为、动态感知、空间因子之间的关联机制。具体到阶梯空间感知研究中，近年来主要集中在步道交通线路规划、步道景观优化设计、步道基础设施改进等多个方面^[21-22]，而较少研究行为、感知与环境的关联。

随着数据类型多元化趋势发展，感知识别的方法也愈发多样。传统单模态数据因其主观性或单一性较难满足山地城市复杂空间的多维感知评价。而多模态数据之间能够进行信息互补，相比之下具有更高的鲁棒性和抗噪声能力^[23]。近年来，城市环境感知方面的实验多在实验室进行^[24-25]，相关成果已为多模态数据驱动感知研究提供了方法与数据支撑。对于现场环境实验，生态瞬时评估法（EMA）的应用可以根据时间和位置捕获即时的感知和行为数据^[26]，运用可穿戴人因设备、问卷、定位软件等测量被试的行为与感知数据，结合空间测量可以实现环境与人感的实时对应研究，符合阶梯空间中视声环境、行为与感知、心理与生理感知等关联研究的需求。

因此基于多模态数据，结合实时环境中生理及心理感知反馈，探究山地城市公园阶梯空间中不同

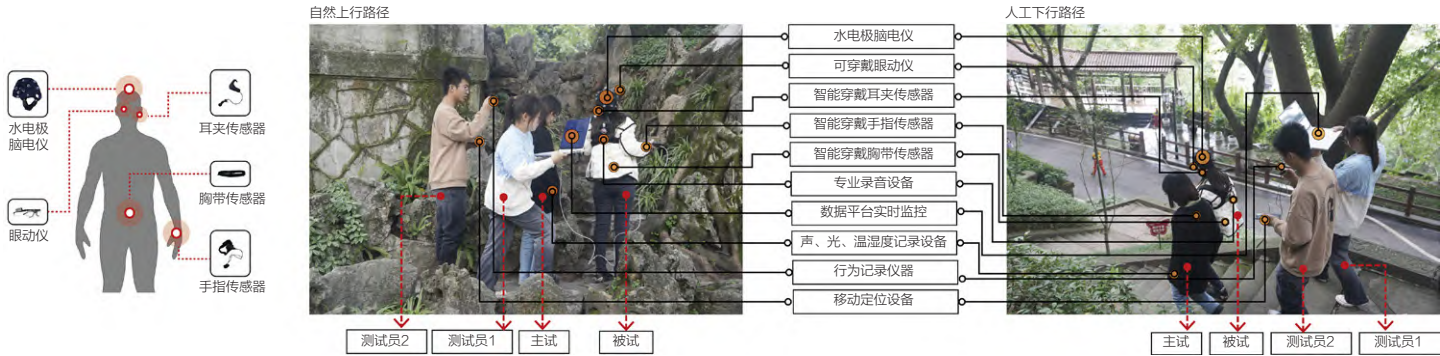
环境及运动方式对使用者具身感知的影响，并探寻影响感知的视声环境要素。以重庆枇杷山公园2处典型阶梯空间、4条路径及相应节点为研究对象，借助相关人因设备与视声景感知评价问卷，旨在解决以下问题：①自然路径、人工路径、阶梯上行、阶梯下行对行人感知影响有何差异？②不同路径心理感知与生理感知是否匹配？③不同路径节点生理反馈与哪些空间环境要素相关？

2 研究方法

2.1 实验样本设定

实验于2023年11月在重庆市渝中区枇杷山公园现场进行。公园占地面积5.4 hm²，位于渝中半岛山脊制高点上，最高点海拔345 m，高差约70 m。阶梯空间作为枇杷山公园的“骨架”，具有山地公园立体交通步道的典型性，为探索不同建成环境要素与使用者感知关联机制提供了样本；另一方面，其区位、尺度、空间特征都较适合人因设备在真实场景中的应用。

实验前，依据研究目标对公园阶梯空间进行预调研与预实验，确定研究路段。选取公园中2条差异明显的阶梯空间进行对照研究：第一条踏步规则的曲折阶梯以交通功能为主（人工路径），剁斧面人工条石铺地，周边绿坡、堡坎、乔木元素丰富，高差10.88 m，踏步79阶，转弯4次，路径总长30.21 m；第二条自然弯曲的阶梯以游憩功能为主（自然路径），自然毛石板铺地，周边以假山、水池、榕树要素为主，具有园林空间氛围，高



2 自然与人工阶梯路径生理实验仪器说明

差3.08 m，踏步19阶，转弯2次，路径总长26.84 m（阶梯段长8.68 m）。在每条阶梯设计上行和下行漫游路线，4条路径各设置4处典型停驻节点（图1）。

2.2 评价指标

2.2.1 生理感知指标

生理感知方面的生理电、脑电、眼动指标主要是通过相应人因设备实时测量。基于ErgoLAB人机环境同步平台与ErgoLAB、Datalog APP移动终端人因记录系统，同步采集可穿戴眼动仪、水电极脑电仪、智能穿戴耳夹传感器、人因测量设备（包含手指传感器与胸带传感器）等进行生理感知相关数据收集。通过ErgoLAB Biometrics模块的心率变异性分析模块、皮电分析模块进行生理电信号的预处理与分析，通过Eyetracking模块进行眼动信号的预处理与分析，通过EEG/ERP脑电分析模块进行脑电信号的预处理与分析（图2）。最终选取心率（heart rate, HR）、心率变异性频域分

析中反映交感神经与副交感神经相对活动程度的低频与高频比值（low frequency/high frequency ratio, LF/HF）、皮肤电导率（skin conductance level, SCL）、呼吸频率（respiration, RESP）等生理电指标； α 脑电波、 β 脑电波、 β/α 等脑电指标；注视次数、注视时间、平均眨眼次数、瞳孔直径等眼动指标（表1）^{[12][24][27-33]}。

2.2.2 心理感知指标

过去30年国外大量研究确定了景观视听感知的范式，其中格雷恩（P. Grahn）和斯蒂格斯多特（U. K. Stigsdotter）确定了8个在欧洲已广泛适用于景观评估和设计的感知指标：宁静、自然、开敞、丰富多样、庇护（封闭和安全）、瞭望、社交和文化^[34]；声景国际研究标准（Acoustics Soundscape 2018）采用了阿克塞尔松（Axelsson）等整合大量感知属性和主成分分析结果建立的听觉感知模型^[35]。研究利用问卷量

表对4条阶梯路径进行心理感知数据的收集，结合山地公园阶梯路段特征调研和居民半结构化访谈，形成阶梯空间心理感知的视觉指标：庇护性（安全感）、高耸感、自然性、公共性、多样性、美观性、可识别性、功能性、可达性、费力与轻松、焦虑与舒缓、无感与兴奋等12项。听觉指标：愉悦性、恼人性、静谧性、无序性、活力性、单调性、事件性、无事件性、自然性、多样性等10项。收集各阶梯路径“视声环境匹配度、视环境满意度、声环境满意度、环境整体满意度”等内容，并建立李克特7级量表^[15]。

2.2.3 空间指标

影响山地城市公园阶梯空间各个节点感知的空间指标主要包括视环境与声环境指标。虽然已有研究表明，观看与感知自然景观有助于恢复注意力、改善情绪，从而增强生理压力恢复^[36]，但在某些情况下，自然声音对游客的疲劳恢复效益更显著^[37]。具身感知的空间指标选择，首先要清晰反映山地景观特征，在具备代表性的基础上保证指标的全面与多样性；其次，指标应根据阶梯空间特色具有导向性，且尽量保证各指标的独立性；最后，应纳入阶梯环境构成要素，避免研究方法与算法框架出现非关错误。本研究最终确定的空间视环境指标包括“开敞度、绿视率、遮蔽度、材质软硬比、堡坎占比、绿坡占比、乔木占比”，空间声环境指标包括“自然声、人工声及机械声在各个节点停驻过程中所占时间比”。此外，将“当前节点与前一个节点的高差值”与“当前节点前段路径转向次数”作为空间行为表征指标。通过实地调研、记录、统计空间动态声环境指标与行为表征指标数据，并以各个节点空间几何中心为拍摄点，以同等视角拍摄并拼合180°全景照片，人工解析各节点空间视环境指标数据。

2.3 实验设计

通过网络与现场招募20~40岁中青年人群参

表1 生理感知指标及解释

指标		指标解释	对应主要感知
生理电指标	心率（HR）	受到刺激、处于压力或兴奋状态时，HR提高；反之则降低 ^[27]	情绪
	呼吸频率（RESP）	处于愉快与不愉快的心理状态时，RESP具有显著差异 ^[28]	
	心率变异性比值（LF/HF）	处于紧张焦虑情绪下，LF/HF增大 ^[29]	压力、情绪
	皮肤电导率（SCL）	处于紧张焦虑或压力状态时，SCL升高 ^[27]	
脑电指标	α 脑电波	压力及焦虑缓解时， α 波升高；注意力增强或受到外界刺激时， α 波降低或消失 ^[24]	注意力、压力、情绪
	β 脑电波	处于紧张或压力的状态下， β 波升高；注意力发散或情绪得到改善时， β 波降低 ^[12]	
	β/α	表征无压力维度与觉醒维度相关的认知负荷的量度， β/α 越大，代表压力越大 ^[30]	认知负荷
眼动指标（单位）	注视次数（n）	次数越多，视线分散不聚集程度越大，要素识别难度越大，但对情感关联的程度和向度的影响可能是正向或负向 ^[31]	信息识别
	注视时间（s）	时间越长，表明解读信息、匹配界面和记忆更费力 ^[32]	
	平均眨眼次数（n/s）	眨眼频率越高，视觉疲劳度越高，注意力相对分散 ^[33]	注意力
	瞳孔直径（mm）	瞳孔直径越大，表明心理负荷越大，认知负担越重 ^[32]	认知负荷

资料来源：作者绘制

与实验，最终确定50名被试，男女各一半。被试要求健康状况良好，没有慢性病、无吸烟史、近期末服用药物，在实验前一天内不能饮酒、咖啡等，保证充足的睡眠，对脑电设备无强烈不适感，裸眼或矫正视力为1.0，以确保眼动数据的正常采集。在借助多功能声级计、温湿度与光照度测试仪控制温湿度、光照度、环境音等变量的前提下，选取工作日12天，每位被试各实验2次，选取最优数据集进行分析，最终确定47人份完整有效的生理信号。

实验具体流程如下。首先，主试引导被试到达路径起始点，并介绍实验流程与相关注意事项，被试需要事先填好社会信息问卷。主试与实验员对环境温湿度、A计权等效声级、照度进行检测，环境条件在控制范围内才可进行下一步实验。其次，主试为被试穿戴好脑电仪、眼动仪、生理测量设备，并进行校准，被试在安静环境中静息3 min。漫步人因实验研究过程中，被试匀速前进，在每处节点停留至少15 s观察周边环境，同时2~3名实验员同步跟随被试并记录每处节点实时客观环境指标，实验全程录音。每段路径实验结束后被试休息10 min再进行下一段路径漫步，休息期间被试回顾环境感知过程，并填写该路径心理感知问卷（图3）。

2.4 数据分析

首先，对评价问卷获取的心理数据及人因设备获取的生理数据进行描述性统计分析，反映被试对4条阶梯路径的心理感知评价以及在不同路径行进过程中的生理变化趋势。其次，对4条路径的心理与生理数据进行斯皮尔曼（Spearman）相关性分析，探究被试在阶梯路径中心理感知与生理测量数据之间的关系。再次，采用复式箱型图直观比较

各生理数据在差异环境和运动方式中的不同变化趋势。采用双因素方差检验分析，将环境（自然环境与人工环境）和运动方式（上行与下行）两个二元变量作为分析中的自变量，生理指标作为因变量，比较眼动、生理及脑电指标相应的差异变化，并对4条阶梯路径进行压力舒缓感知排序。最后，分别对4条阶梯路径中各个空间节点视声指标与生理指标进行Spearman相关性分析，探究空间因子对生理感知的影响（图4）。

3 研究结果与分析

3.1 阶梯路径与节点对应的心理与生理指标统计分析

结合心理评价问卷与生理测量数据探究空间与行为对被试的感知影响。47份问卷的信效度检验表明数据有效，并对26个心理感知指标数据进行统计分析。结果表明，被试对自然路径的总体满意度显著高于人工路径，自然路径环境中视声匹配度更高，且被试在人工路径对视觉指标“无感与兴奋”“可识别性”的感知评价均显著低于自然路径，上行路径中对“费力与轻松”与“庇护性”的感知评价均高于下行路径。但同时，满意度与匹配度在不同被试中产生较大差异，推测是被试群体的环境偏好差异所致。

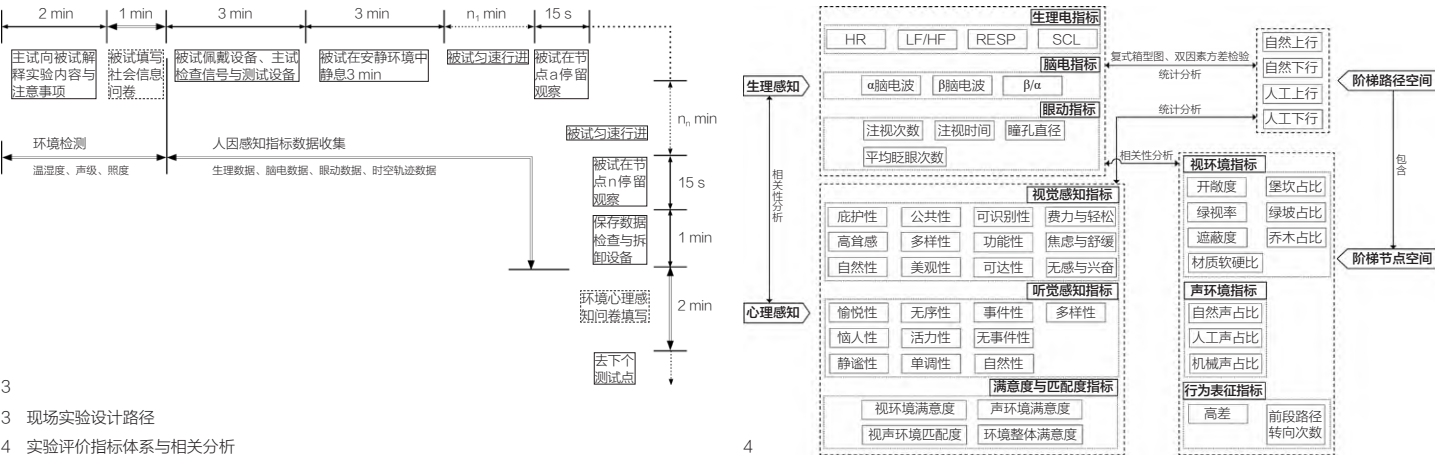
通过ErgoLAB平台对生理数据进行预处理后，为统一标准，进行多模态数据的对比分析，使用归一化法消除生理信号之间的个体差异^[31]。将实验路径中的各个节点测量的生理指标作为时间变量，对4条阶梯路径的心理、脑电及眼动指标的变化进行统计性描述并绘制折线图（图5）。结果表

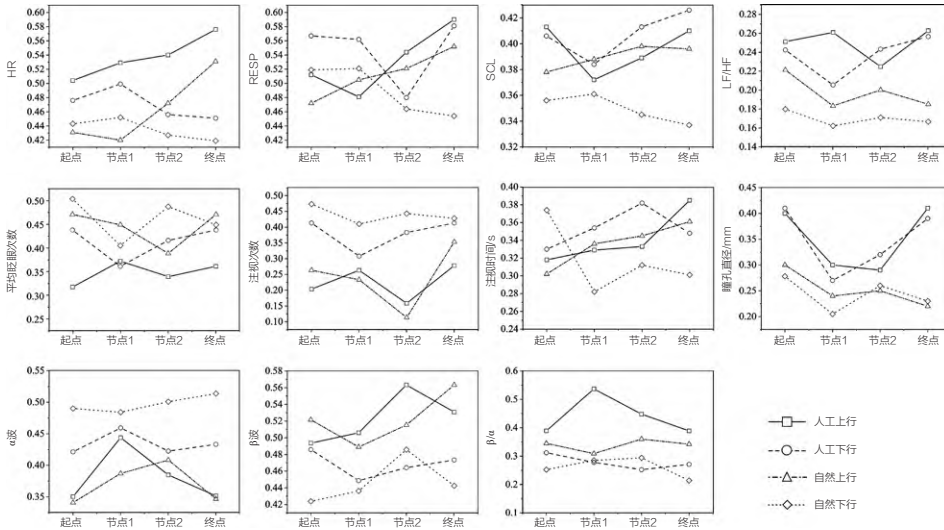
明，随着实验的进行，自然上行路径中，HR与β脑电波均在节点1后呈显著上升趋势，并在活动丰富的阜园广场达到峰值。自然下行路径中，SCL与β/α均呈现短暂上升后显著下降的趋势，在经过节点1后水景及榕树均能缓解被试的压力。人工上行路径中，LF/HF下降后上升并再次下降，注视时间与次数均逐步上升，推测经过节点1后被试持续向上的运动导致其情绪变化较大，但最终被信息景观要素丰富的历史长廊所吸引。人工下行路径中，LF/HF与SCL均在节点1下降后显著上升，终点城市干道附近车流声可能导致被试压力感知增大。

3.2 阶梯路径生理与心理指标相关性分析

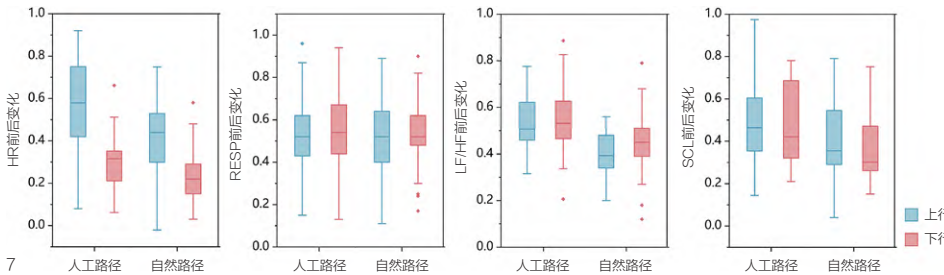
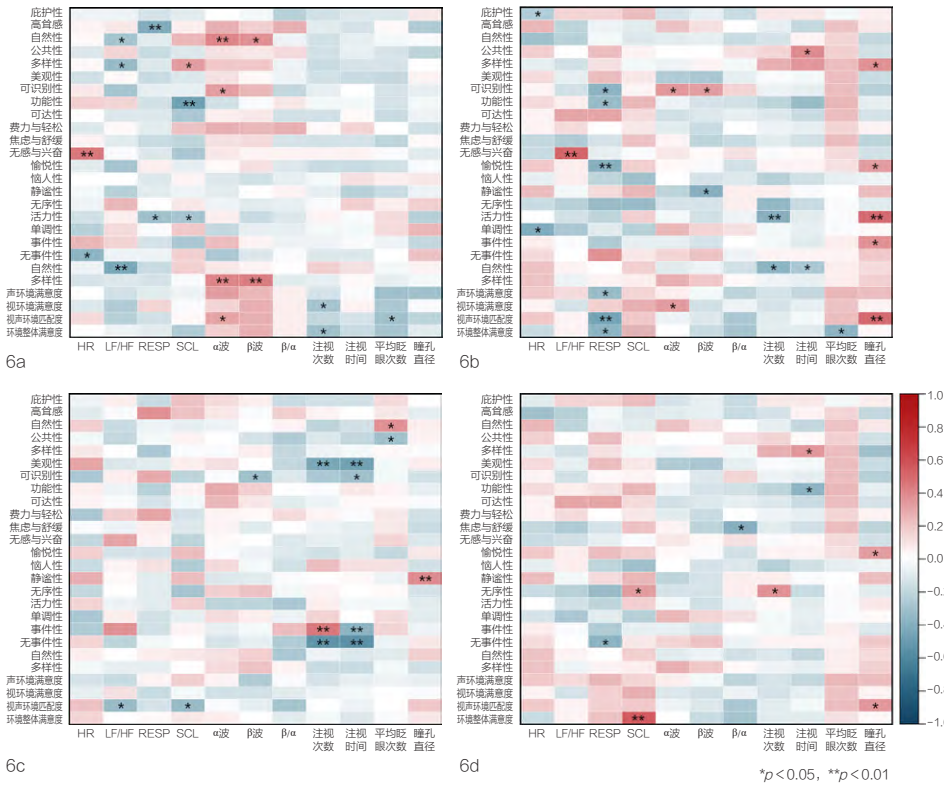
为探究被试心理感知与生理测量之间的关系，将4条路径的生理电、脑电及眼动数据与心理评价问卷得分进行Spearman相关性分析（图6）。结果表明，自然上行路径中，视声环境的“自然性”与LF/HF呈负相关，实测LF/HF呈下降趋势，相应心理感知指标得分较高。被试上行过程中因较高的绿化堡坎及乔木占比而聚焦在自然景观的视声环境方面，同时产生轻松愉悦的情绪。β脑电波与“自然性”呈正相关，生理与心理评价不一致，推测由于β脑电波在节点1前序开始路段呈下降趋势，行进时间较长且主要为人工景观，影响了情绪变化及注意力。自然下行路径中“视声环境匹配”与LF/HF、SCL均呈负相关，“可识别性”与β波呈负相关，路径起讫点均为视声环境要素丰富的开敞空间，被试的心理与生理均反映出情绪的提升。

人工上行路径中，“愉悦性”“视声环境匹配”与RESP呈显著负相关，实测RESP呈上升趋势而相应心理感知指标均低于均值，被试上行过程





5
5 不同路径生理指标统计与对比
6 不同路径生理与心理指标相关性分析
a 自然上行路径 b 人工上行路径 c 自然下行路径 d 人工下行路径
7 基于生理电指标差异的不同路径与运动方式复式箱型图



7

中因体力的消耗及人工声与机械声的影响产生了一定的情绪起伏变化。人工下行路径中，“焦虑与舒缓”与 β/α 呈负相关，生理与心理评价不一致，推测由于该路径各节点的环境差异，节点2前序路段绿视率较高且庇护性较强，而经过节点后因临近公园车行干道，庇护性感知的降低让被试产生了压力。

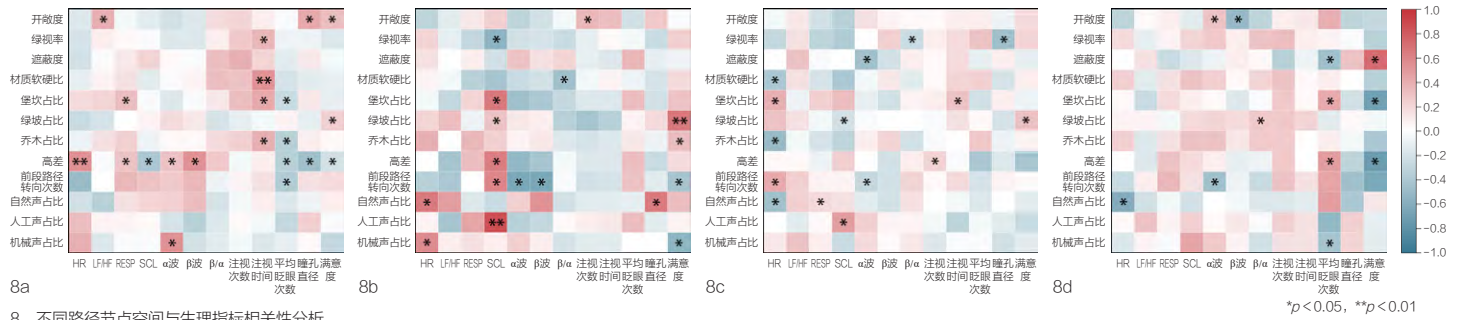
3.3 不同阶梯路径生理感知对比分析

通过复式箱型图可知（图7），被试在上行路径的心率变化显著高于下行路径，人工路径的心率变化、LF/HF及SCL的变化均显著高于自然路径。这表明上行路径会增强被试的情绪唤醒度，导致压力感知逐渐增强，并且在行进过程中自然路径相较于人工路径提供了更高的环境舒适度，有助于缓解被试的紧张情绪。结合4条路径中各指标的变化趋势及大小，不同环境与运动方式中被试压力舒缓感知程度排序为：自然>人工，下行>上行。

为探究环境差异结合运动方式对感知的具体影响，通过双因素方差检验分析可知：生理电数据中呼吸频率在运动方式上具有差异性（ $p<0.05$ ），上行路径显著高于下行路径；SCL在环境上具有差异性（ $p<0.05$ ），人工路径显著高于自然路径；而心率在环境及运动方式上均具有显著差异性（ $p<0.01$ ），人工路径显著高于自然路径，上行路径显著高于下行路径。脑电数据中 α 脑电波在不同环境中具有差异性（ $p<0.05$ ），自然路径显著高于人工路径，表明游憩性的自然路径具有一定趣味性，引导被试产生正向情绪。眼动数据中注视时间与瞳孔直径在环境上均具有差异性（ $p<0.05$ ），自然路径显著高于人工路径，表明自然路径中视声环境要素能够吸引被试的兴趣。上述分析已初步揭示了不同环境和不同运动方式下的感知影响，结合4条路径各指标的均值（表2），被试压力舒缓感知程度排序为：自然下行>人工下行>自然上行>人工上行。

3.4 影响节点生理感知的空间指标分析

在对生理感知数据进行检验后发现其不符合正态分布，因此采用Spearman相关性分析探究不同路径节点的空间要素与生理电、脑电、眼动指标及满意度之间的关系。结果显示，自然上行与人工上行路径中，绿坡占比与满意度均呈正相关；自然上行路径中，开敞度与LF/HF呈正相关；人工上行路径中，高差、绿坡占比均与SCL呈正相关。自然上行与人工上行在节点1前均有较高的绿坡占比，给被试在视觉上带来了压力。自然下行路径中，绿视率与 β/α 呈负相关，绿坡占比与SCL呈负相关，人工



8 不同路径节点空间与生理指标相关性分析
a 自然上行路径 b 人工上行路径 c 自然下行路径 d 人工下行路径

下行路径中，开敞度与β脑电波呈负相关。

山地城市公园具有丰富的声源类型，且已有研究表明声音刺激对心理及情绪影响显著^[11]。实验以自然声、人工声及机械声在各节点时间占比作为探究声环境与生理感知之间关系的自变量。结果显示，自然下行、人工上行与人工下行路径中，自然声对生理指标产生显著影响，鸟叫声与虫鸣声占比越大，越能够使被试放松。人工上行路径中，人工声与SCL呈显著正相关，因其终点为声音嘈杂的居民活动广场，故其中游客声、音响声、乐器声为典型负面声音类型。

上行路径中，高差与前段路径转向次数等行作为表征指标对被试产生了较大影响。自然上行路径中，高差与心率呈显著正相关；人工上行路径中，高差、前段路径转向次数均与SCL呈正相关。自然下行路径中，前段路径转向次数与α脑电波呈负相关。山地公园阶梯为解决较大高差而设置了多次转向，使被试的压力感知逐渐增大（图8）。

4 结论与讨论

基于行人在山地建成环境运动过程中的心理感知、生理感知、空间指标等多模态数据，探索了重庆枇杷山公园阶梯自然与人工路径、上行与下行路径，以及路径各个空间节点带来的感知体验差异。研究可知，不同运动方式、整体空间类型、节点景观要素对生理电、脑电、眼动、心理指标的关联程度与向度均不同，不同路径心理与生理感知也不一定匹配。结果一方面印证了自然主导的景观要素在山地城市环境中提升行人正向感知体验的价值；另一方面，多模态感知、行为、空间数据的结合研究也进一步揭示了感知关联机制，并为山地城市阶梯空间相关设计实践提供了参考^[31]。

（1）不同环境及运动方式的感知差异 在山地城市公园阶梯空间中，自然路径较人工路径、下

表2 双因素方差统计分析结果

生理指标		自然路径				人工路径			
		上行		下行		上行		下行	
		均值	标准偏差	均值	标准偏差	均值	标准偏差	均值	标准偏差
生理电指标	心率（HR）	0.52	0.17	0.47	0.20	0.65	0.20	0.49	0.21
	心率变异性（LF/HF）	0.14	0.23	0.13	0.12	0.15	0.21	0.14	0.18
	呼吸频率（RESP）	0.54	0.16	0.51	0.15	0.57	0.11	0.53	0.14
	皮肤电活动（EDA）	0.32	0.25	0.28	0.23	0.36	0.26	0.33	0.27
脑电指标	α脑电波	0.43	0.24	0.48	0.25	0.38	0.26	0.46	0.26
	β脑电波	0.48	0.23	0.45	0.24	0.47	0.25	0.41	0.22
	β/α	0.38	0.12	0.36	0.12	0.39	0.10	0.37	0.08
眼动指标	注视次数	0.52	0.21	0.54	0.20	0.48	0.21	0.50	0.21
	注视时间	0.33	0.18	0.34	0.15	0.26	0.14	0.32	0.20
	平均眨眼次数	0.25	0.23	0.27	0.26	0.21	0.15	0.23	0.22
	瞳孔直径	0.22	0.26	0.21	0.25	0.40	0.21	0.30	0.22

资料来源：作者绘制

行路径较上行路径更能产生较小的压力感知。压力舒缓感知程度排序为自然下行>人工下行>自然上行>人工上行。自然环境相对人工环境更能激活人体副交感神经系统，从而更好地缓解压力，但其影响程度有赖于与山地地形的配合；下行路径中自然环境的营造会引发积极情绪的产生，而上行路径中由于山地地形的高差影响，视觉范围内堡坎占比增加、自然景观的介入有助于削弱行进过程中的压力感知。以竖向交通功能为主的人工路径应考虑合理的自然景观组合，形成一定独特性和可识别性，在满足基本交通功能需求的同时为被试提供多样的感知体验^[31]。

（2）心理与生理感知的一致性 人的生理反应和心理感知评价并非完全一致，主客观数据交叉佐证研究能够更好地反映环境与感知之间的关系^[28, 14]。在自然下行与人工上行路径中，心理与生理指标一致性较高，而自然上行与人工下行路径

中心理感知与生理指标多处不一致。由此可知，山地城市公园环境中持续的景观变化结合运动体验会导致心理与生理感知的差异，尤其环境特征与运动方式产生相左的感知影响时，复杂的空间景观变化往往决定游客的认知与情绪调整。因此在具体环境中，对生理与心理指标的对比研究与定点分析更能精确地评价空间感知变化。

（3）山地环境中空间要素对生理反馈的影响 不同山地视声环境对生理电、眼动及脑电指标均产生了一定的影响。前述分析已表明，较高的“开敞度”“绿视率”“乔木占比”及“自然声占比”能够在一定程度上提升被试对阶梯空间的感知满意度^[6, 36]，相比之下，“高差”与“堡坎占比”对满意度的影响较为明显。不同路径中，绿坡占比不同对压力感知结果也不同。例如在自然下行路径中，绿坡能缓解压力，而在人工上行路径中绿坡却增加压力。此外，在同一路径中，山地复杂景观变化也

会明显影响被试的感知。山地空间要素确实能显著影响被试的感知，因此对于能够产生积极作用的空间要素应合理利用，例如将水声等自然声与山地地形结合，形成立体的、步移景异的视听序列，适度地促进无意注意，使人们从疲劳中恢复定向注意，减轻精神负荷^[22, 37]。

（4）多模态数据整合研究 前述多模态数据分析在一定程度上揭示了环境与运动方式对具身感知的综合影响。在人工与自然路径中，上行路径关于费力的心理感知显著高于下行路径，但整体满意度却高于下行路径，而生理数据在各节点呈现出不同的变化趋势，表明被试的感知不仅受到运动方式影响，更受到不断变化的视声环境影响^[15]。在山地公园阶梯空间中，视声环境、运动方式、空间属性均与具身感知密切相关，公园设计应综合考虑各路径节点体力活动、声景营造、空间特征，并构建具有识别性的景观序列^[17]。

此外，研究还存在一定的局限性：首先，现场实验研究在控制环境变量方面具有一定难度，需要实时测量与控制声、光、温湿度，确保被试匀速运动，并需要被试重复多次实验以保证生理数据的准确性与完整性；其次，被试年龄差距最高达20岁，且对场地熟悉程度不同，被试主体的差异可能会影响实验结果；最后，未来多模态数据的耦合分析有待借助人工智能模型进行进一步探索^[31]。□

图片来源：所有图片均由作者绘制或拍摄。

参考文献

[1] 徐苗, 陈瑞, 孙锬, 等. 健康城市视角下的山地城市阶梯步道适老性及其设计要素研究: 以重庆山城步道为例[J]. 上海城市规划, 2017 (3) : 6-16.

[2] 周庆华, 王一睿. 基于感知维度的城市设计思考[J]. 规划师, 2021 (16) : 73-77.

[3] 杨璟. 虚拟与现实的交互: 从具身认知角度探讨一种新的空间构建[J]. 新建筑, 2022 (6) : 87-91.

[4] 刘畅, 李树华. 多学科视角下的恢复性自然环境研究综述[J]. 中国园林, 2020, 36 (1) : 55-59.

[5] 谭铃干, 郝培尧. 面向城市建成环境的公众情感体验研究综述[J]. 风景园林, 2024, 31 (3) : 106-114.

[6] 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[J]. 中国园林, 2023, 39 (11) : 29-35.

[7] 刘博新, 应明月, 朱晓青. 老年人对旧城区社区绿道的使用偏好研究: 以杭州市上城区为例[J]. 新建筑, 2023 (3) : 129-134.

[8] 谭少华, 申纪泽, 章露, 等. 感知与行为关联视角下社区公园环境关注度因子研究[J]. 新建筑, 2020 (5) : 27-32.

[9] 冷红, 张钰佳, 袁青. 基于提升老年人体力活动水平的寒地城市公园热舒适性研究: 主观感知和客观监测[J]. 建筑科学, 2023, 39 (4) : 81-89.

[10] 翟宇佳, 吴承熙. 城市公园总体满意度主要影响因素识别: 基于不同年龄组使用者的分析[J]. 风景园林, 2021, 28 (5) : 57-62.

[11] 朱玉洁, 董嘉莹, 翁羽西, 等. 基于眼动追踪技术的森林公园环境视听交互评价[J]. 中国园林, 2021, 37 (11) : 69-74.

[12] LI H, XIE H, WOODWARD G. Soundscape components, perceptions, and EEG reactions in typical mountainous urban parks[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 64: 127269.

[13] LIU L, QU H, MA Y, et al. Restorative benefits of urban green space: Physiological, psychological restoration and eye movement analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113930.

[14] 李欣, 李渊, 任亚鹏, 等. 融合主观评价与眼动分析的城市空间视觉质量研究[J]. 建筑学报, 2020 (S2) : 190-196.

[15] 胡长涓, 宫聪, 龙灏, 等. 协调与偏好: 山地城市公园聚集性空间青年人群视听感知[J]. 风景园林, 2024, 31 (7) : 20-29.

[16] 邵钰涵, 薛贞颖, 蒿奕颖, 等. 城市公园视听感知品质评价研究: 以成都环城生态区为例[J]. 风景园林, 2022, 29 (9) : 26-32.

[17] 张万钦, 杜春兰, 胡俊琦. 知觉交互: 山地城市公园更新中的文化意象激活[J]. 中国园林, 2021, 37 (11) : 63-68.

[18] PRATS E V, NEVILLE T, NADEAU K C, et al. WHO Academy education: Globally oriented, multicultural approaches to climate change and health[J]. The Lancet Planetary Health, 2023, 7(1): 10-11.

[19] 宋晗, 甄峰, 徐海贤. 基于身体活动及心理感知的城市空间环境设计研究[J]. 现代城市研究, 2023 (12) : 45-51.

[20] 刘韩昕, 马宁, 皮佳媛. 山水城市意境感知对健康恢复体验的影响研究[C]//中国城市规划学会. 人民城市, 规划赋能: 2023中国城市规划年会论文集 (07城市设计) . 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 1397-1406.

[21] 郑宇, 成林莉, 黄硕, 等. 新时期多维度协同视角下城市山地公园步道设计探究: 以福州市金鸡山公园为例[J]. 中国园林, 2022, 38 (6) : 69-74.

[22] 史靖嫻, 史耀华. 文化景观视野下的山城步道构成与特征解析: 以重庆渝中半岛山城步道为例[J]. 中国园林, 2017, 33 (9) : 120-123.

[23] DEBIE E, ROJAS R F, FIDOCK J, et al. Multimodal fusion for objective assessment of cognitive workload: A review[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019(3): 1542-1555.

[24] 崔雪, 金荷仙, 曾程程. 校园绿地听嗅交互感知对大学生压力恢复的影响研究[J]. 中国园林, 2023, 39 (2) : 26-31.

[25] FRANEK M, ŠEFARA D, PETRUZALEK J, et al. Differences in eye movements while viewing images with various levels of restorativeness[J]. Journal of Environmental Psychology, 2018, 57(6): 10-16.

[26] EUTE F, DE KORT Y A W. The natural context of wellbeing: Ecological momentary assessment of the influence of nature and daylight on affect and stress for individuals with depression levels varying from none to clinical[J]. Health & Place, 2017, 49: 7-18.

[27] 高雅玲, 黄河, 叶菁, 等. 高校绿地景观自然度对人体生理和心理指标的影响[J]. 中国城市林业, 2022, 20 (4) : 103-109.

[28] LI Z Z, KANG J. Sensitivity analysis of changes in human physiological indicators observed in soundscapes[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 190: 103593.

[29] 董雪, 许晓丹, 谭静仪, 等. LF、HF与LF/HF在心率变异性分析中的应用与争议[J]. 生理科学进展, 2023, 54 (6) : 509-516.

[30] GIANNAKAKIS G, GRIGORIADIS D, GIANNAKAKI K, et al. Review on psychological stress detection using biosignals[J]. IEEE Transactions on Affective Computing, 2022, P13(1): 440-260.

[31] 张若诗, 颜夏悦, 王晨, 等. 多模态数据驱动的人与建成环境情感交互研究: 以京张铁路遗址公园五道口段为例[J]. 城市发展研究, 2022, 29 (7) : 55-66.

[32] 董卫华, 廖华, 詹智成, 等. 2008年以来地图学眼动与视觉认知研究新进展[J]. 地理学报, 2019, 74 (3) : 599-614.

[33] 严家豪, 吕健, 侯宇康, 等. 虚拟现实中心动交互频率对视觉疲劳影响的研究[J]. 图学学报, 2024, 45 (3) : 528-538.

[34] GRAHN P, STIGSDOTTER U K. The relation between perceived sensory dimensions of urban green space and stress restoration[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3-4): 264-275.

[35] INSTITUTION B S. Acoustics - Soundscape - Part 2: Data Collection and Reporting Requirements: ISO/TS 12913-2: 2018[S]. Geneva: BSI Standards Publication, 2018.

[36] JENNINGS V, BAMKOLE O. The relationship between social cohesion and urban green space: An avenue for health promotion[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(3): 452.

[37] MA H, SHU S. An experimental study: The restorative effect of soundscape elements in a simulated open-plan office[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2018, 104(1): 106-115.

收稿日期 2024-06-17
编辑: 明星