

基于视觉感知的留园入口空间序列研究

Research on the Spatial Sequence of the Entrance to the Lingering Garden Based on Visual Perception

孙旻恺¹ 王晓萌¹ 王雨琴¹ 董璐² 张健¹ 毕雪婷¹ 陆语蝶^{1*}
SUN Minkai¹ WANG Xiaomeng¹ WANG Yuqing¹ DONG Lu² ZHANG Jian¹ BI Xuetong¹ LU Yudie^{1*}

(1.苏州科技大学建筑与城市规划学院, 苏州 320500; 2.嘉兴学院设计学院, 嘉兴 330400)

(1. School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu, China, 320500;
2. School of Design, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang, China, 330400)

文章编号: 1000-0283(2026)01-0050-09

DOI: 10.12193/j.laing.20250810001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-08-10

修回日期: 2025-10-26

摘要

中国古典园林丰富、多变和连续性的园林空间影响着游园者的视觉感知与游观体验,但是园林空间影响游园者视觉感知的作用路径及机制尚不明确。以留园入口空间为例,使用交叉随机对照试验探讨了古典园林入口空间序列变化影响游园者视觉感知与游览体验的作用机制。使用眼动仪、生理记录仪和问卷记录分析30名被试者观看留园入口空间与主景区虚拟现实(Virtual Reality, VR)视频时的眼动、心率和主观数据。结果表明:(1)通过入口空间后被试者视线集中在可亭和连廊等关键园林要素上,推知空间尺度及明暗对比影响游园者的视觉注意力;(2)通过入口空间后被试者的交感神经持续活跃,推知狭暗入口空间与开阔主景区的对比使游园者精神振奋;(3)入口空间与主景区的对比对游园者的主观情绪无显著影响,但可使游园者保持兴奋;(4)无论有无入口空间,观赏主景区都有减压效果。证实古典园林空间序列设计可强化园林设计意图传达,提升游客游览兴致,丰富游观体验,达到曲径通幽的设计目的。

关键词

风景园林; 古典园林; 入口空间; 视觉感知; 眼动追踪技术

Abstract

Research indicates that the rich, varied, and continuous spatial configurations of classical Chinese gardens influence visitors' visual perception and viewing experience. However, these studies typically employ qualitative methods, leaving unclear the pathways and mechanisms by which garden spaces affect visitors' visual perception. In this study, we used the entrance space of the Lingering Garden as an example and explored the mechanism of action by which changes in the sequence of the entrance space of classical gardens affect the visual perception and tour experience of garden visitors using a cross-over randomized controlled experiment. Eye movement, heart rate, and subjective data from 30 subjects were analyzed as they watched VR videos of the entrance space and the main scenic area of the Lingering Garden using eye-tracking, a physiological recorder, and questionnaire responses. The results showed that: (1) The subjects' eyes focused on key elements such as elements Ke Ting and the corridor after passing through the entrance space. It was inferred that the spatial scale and the contrast between light and darkness affected the visual attention of garden visitors; (2) The subjects' sympathetic nerves were continuously active after passing through the entrance space. It is inferred that the contrast between the narrow dark entrance space and the open main landscape area will invigorate the visitors; (3) The contrast between the entrance space and the main landscape area does not have a significant effect on the subjective emotion of the visitors, but it can keep the visitors excited; (4) The viewing of the main landscape area will have a stress-reducing effect regardless of whether there is an entrance space or not. This study confirms that the spatial sequence design of classical gardens can strengthen the communication of garden design intention, enhance visitors' excitement, enrich the touring experience, and achieve the purpose of creating a secluded path.

Keywords

landscape architecture; classical garden; entrance space; visual perception; eye-tracking technology

孙旻恺

1984年生/男/江苏苏州人/博士/副教授/研究方向为景观感知

王晓萌

2001年生/女/湖北襄阳人/在读硕士研究生/研究方向为景观感知

陆语蝶

1999年生/女/江苏苏州人/在读硕士研究生/研究方向为景观感知

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: l981008@126.com

基金项目:

国家自然科学基金青年科学基金项目“东晋南朝‘士族—江南’地域景观体系的时空演进”(编号: 42401274)

园林空间是一种相对于建筑的外部空间，意指人的视线范围内由植物、建筑、山石、水体等要素构成的景观区^[1]。中国几千年的造园史中，主要通过分割、经营有限空间来创造无限精神空间，反映造园者寓于园林的审美意识与精神思想^[2]。此外，中国古典园林的园林空间艺术深刻影响着现代建筑设计与规划。明末计成^[3]以“不妨偏径，顿置婉转”表述曲径通幽的空间序列。刘敦桢^[4]引入“空间”概念，定义为人们对空间的感知和构建。冯纪忠^[5]引用唐代柳宗元的“旷奥”评价园林空间。孟兆祯^[6]提出中国风景园林设计理法序列。

园林入口是连接府邸与院落、城市与自然的过渡空间，是营造咫尺山林的结构中介^[7]。江南私家园林占地面积小，常通过先抑后扬、空间对比等手法达到景愈藏则意境愈深的效果^[8]。目前关于传统园林入口空间的研究主要关注园林入口空间的布局构建与入口范围界定^[9]，或使用视域分析法模拟空间结构的变动对空间视域和游览体验的影响^[10]。尚无基于真实生理数据的入口空间视觉感知量化研究，传统园林空间理论的作用机制尚不明确。

既往园林空间研究主要运用定性方法或基于二维信息解析视觉空间。随着新技术与方法的发展，空间句法^[11]、三维点云^[12]、驻点研究^[13]、分形维数^[14]等技术丰富了传统园林的视觉空间探索方式。其中，部分研究重视“人—景”关系，意识到“人”在园林空间中的重要性，聚焦于游人行为与视域范围^[15]，分析游客行为和中国园林空间结构以探索“步移景异”特性的生成机制^[16]，或基于游客照片分析园林廊空间偏好^[17]。另有研究以全息投影可视化游观园林过程中的视觉信息^[18]。但该类研究并未直接探究“人”在

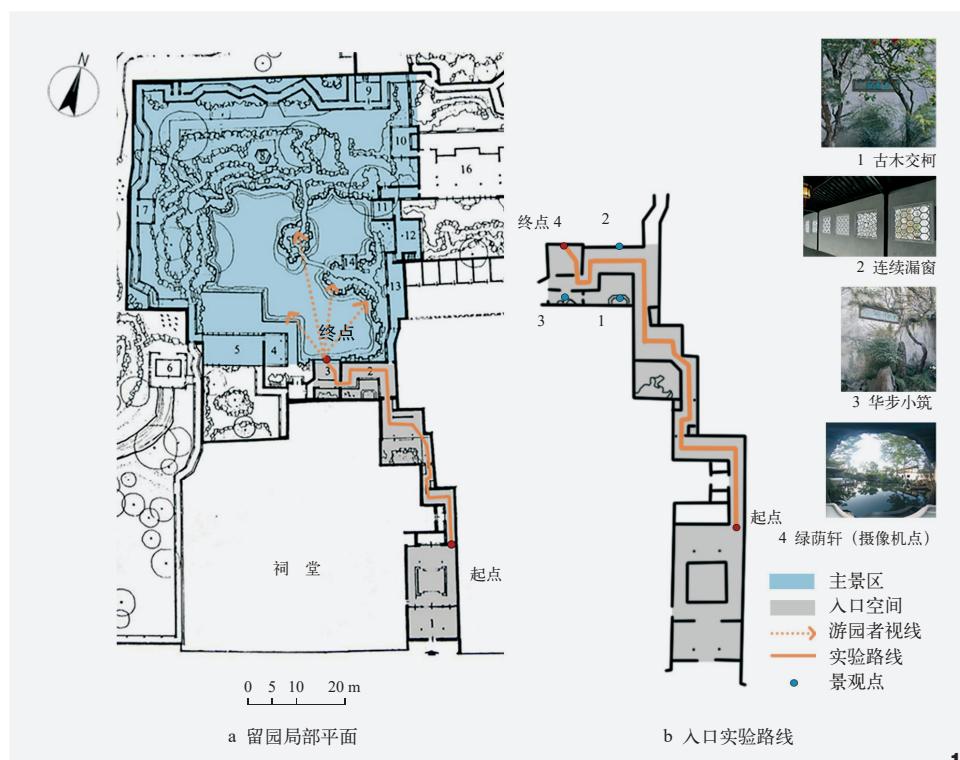


图1 实验路径示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental path

园林空间中的视觉感知，园林空间对游人视觉感知的作用机制仍未探明。

虚拟现实、眼动追踪与生理测量技术的结合为量化分析被试者视觉、生理指标提供新的技术手段。虚拟现实技术能够创造并模拟不同场景和环境。眼动追踪技术能够观测并分析被试者缘于空间变化产生的视觉反应、感知特征和注意偏好。在古典园林视觉感知领域，已有研究主要探索游园者处于固定观赏位置时园林要素与视觉偏好的关系^[18-19]。耦合生理、心理层面，探索游观时中国古典园林空间影响游园者视觉感知与游观体验的研究有待进一步探索。

本研究构建了由眼动仪、心率变异性测量设备、问卷调查组成的多维数据采集分析系统，耦合生理、心理数据，探究古典园

林入口空间序列变化如何影响游园者视觉感知，积累基础数据，揭示传统园林空间理论的作用机制，为中国古典园林艺术的现代转译提供循证基础。

1 研究方法

1.1 实验对象

留园位于苏州市姑苏区，为首批列入《世界遗产名录》的苏州古典园林之一。留园因其入口空间转折变化的复杂性而成为建筑空间理论的经典案例^[20]。因此本研究以留园入口空间为例探索传统园林空间结构对视觉感知的影响机制。

留园的入口空间序列起于大门，经古木交柯，后抵达绿荫轩，可观全园中部的主景区（图1-a）。与主景区相比，入口空间建筑

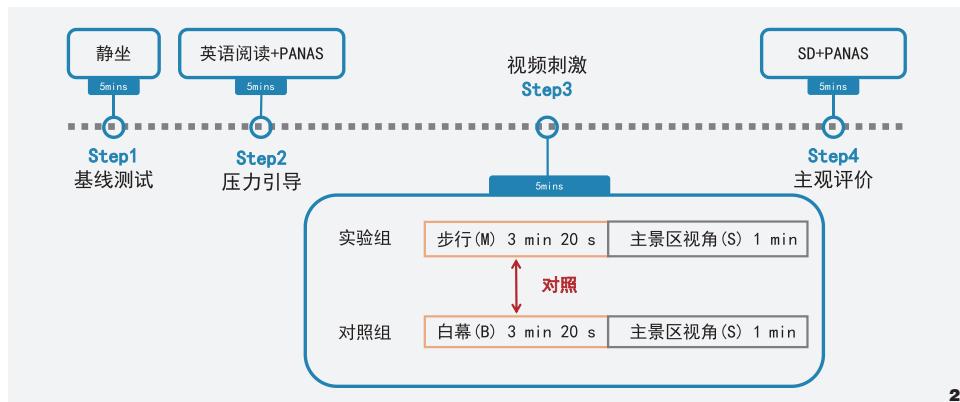


图2 实验流程
Fig. 2 Experimental procedure

物集中且整齐分布，空间曲折狭长、幽暗封闭，使人有沉闷、压抑之感^[21]。中部主景区设置较大的水池，与入口相比，建筑物沿水池四周分布，形成疏密对比，水面更能表现广阔，于是人通过入口空间进入主景区便豁然开朗^[22]。入口空间序列与主景区空间尺度的对比，能使人从喧闹城市入园后进行情绪净化，提起游兴^[23]。

历经多次修缮，留园入口已非初建原貌^[24]。根据已有研究对留园入口空间范围的界定^[4,7,9,21]，本次实验游览路线（图1-b）基于现存空间格局，将起点设为门厅口，经古木交柯、连续漏窗、华步小筑，至终点绿荫轩观看中部主景区。路线总长约为50 m。

1.2 视频材料制备

使用理光映像RICOH THETA SC2全景相机录制实验视频，视频分辨率为3 840像素×1 920像素。使用大疆DJI Osmo Mobile 6 OM手持云台操控全景相机防止画面抖动。基于公园行人平均步速^[25]并结合现实，录制人员移动速度设为0.56 m/s，摄像头高度设为1 500 mm，符合成年人站姿平均眼高。拍摄过程中镜头朝向与摄制人员的步行方向始终保持一致。

视频全长4 min 20 s，其中入口至绿荫轩部分为3 min 20 s，抵达绿荫轩后面向小蓬莱方向固定视角视频1 min，以模拟游人步行通过入口空间序列后观赏园林主景的情景。视频拍摄于2023年6月3日早晨7点，拍摄日天晴无风。视频全程没有录入任何人、动物等移动物体。为了探究入口空间序列对游园者的影响，本研究剪辑两组视频作为实验材料：

(1) 实验组(E)，3 min 20 s入口空间通行视频(M)，续以小蓬莱固定视角视频(S)；(2) 对照组(C)，即为无入口空间通行视频组，因压力导入后被试的压力水平随时间经过会自然降低，为保证实验结果的鲁棒性，防止两组被试在压力导入后到观看留园主景区间的时间差异导致实验结果不准确，在C组中将入口空间通行视频替换为同等时长的白幕影像(B)，再续以小蓬莱固定视角视频(S)（图2），以防止无特殊刺激情况下时效性生理、心理活动变化对实验结果的影响。

1.3 实验设备和调查问卷

眼动追踪设备为HTC头戴式虚拟现实眼动追踪器Ergo VR（跟踪频率120 Hz）。心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)数据由使用由

Ergo LAB可穿戴无线生理记录仪（北京津发科技）记录，实时监测被试者的HRV心率变异性。SD问卷参考已有研究^[26-28]，定17对反义形容词。被试者通过李克特5级量表（非常丰富=5分，非常单调=1分）评估其游赏后的主观情绪，并进行对比分析。

1.4 被试者

作为探索性研究，为防止因年龄等群体差异对实验结果的稳定性造成影响，本研究将本实验的被试定为苏州科技大学在校学生共30人（15名男性，15名女性），平均年龄22.13±1.43岁，裸眼视力或矫正视力达到1.0以上，专业背景包含建筑学、风景园林学、城乡规划等。该群体年龄、教育背景较为均质，以保证本研究被试群体的稳定性。在后续研究中，将进一步拓宽被试的年龄、教育背景，以增强结论的普适性。本研究的研究方案已获得苏州科技大学伦理委员会批准（IRB 190703）。

1.5 实验场地及流程

实验日期为2023年9月11–15日。实验地点为苏州科技大学建筑实验室，实验期间实验室内仅有实验实施人员与单一被试，实验时室内保持25°C恒温恒湿，且隔绝外部噪音。

被试进入实验室后，实施人员引导其签署实验同意书，后在座椅上休息2 min，之后实施人员为被试佩戴眼动和HRV测量装置，进行校准和指标检查后，要求被试静坐，实施人员记录5 min HRV数据作为基线。记录完成后，实施人员要求被试在2 min内完成一篇英语阅读理解（六级难度），以导入压力，同时采集被试在压力状态下的HRV数据，结束后填写PANAS情绪量表。而后实施人员引导

被试起立，随后播放两段视频中的一段，同时记录被试的眼球运动和HRV数据。视频播放完毕后，引导被试坐回座椅，摘下设备后要求被试填写SD量表和PANAS情绪量表。被试休息2 min，重复以上步骤一次（观看另一个视频）后离开实验室。实验中两段视频以随机顺序播放，以防止顺序效应。

1.6 数据分析

为分析被试观赏留园主景区时的视觉注意力特征，按园林要素将主景画面分为水体、建筑、铺装、假山、乔木、灌木等14个兴趣区（Area of Interest, AOI）（图3）。

已有研究表明，AOI面积比例与总注视时间和注视次数呈正相关^[29]。为了消除AOI面积差异的影响，本研究引入视觉信息密度与视觉吸引力进行分析，见公式（1）（2）。

$$D = \frac{T_i/T}{P_i/P} \quad (1)$$

$$A = \frac{N_i/N}{P_i/P} \quad (2)$$

式中， D 代表视觉信息密度， T_i 代表AOI注释时长， T 代表全画幅注视时长， P_i 代表AOI像素， P 代表全画幅像素； A 代表视觉吸引力， N_i 代表AOI注视次数， N 代表全画幅注视次数。

因数据不符合正态分布，采用Kruskal-Wallis H检验分别分析两种观赏模式下多个AOI的视觉吸引力、视觉信息密度和平均注视时间， H 值用以检验多个AOI的中位数是否存在显著差异，当 H 值显著，说明至少有一个AOI的中位数与其他AOI具有显著差，而后进行两两多重比较，以Bonferroni法校正 p 值，探究具体哪些AOI存在显著差异。对于两种不同观赏模式下静观主景区的总注视时间、注视次数、平均注视时间差异则采用配对样本的Wilcoxon符号秩和检验分析。此外，根据以往关于视



图3 静观主景时AOI划分
Fig. 3 AOI delineation during static viewing of primary scenes

觉注意力与景观之间关系的研究，本研究将注视持续时间设定至少为200 ms^[30]。

HRV数据选取频域指标HF（高频）与LF/HF（低频/高频），HF主要反映副交感神经的活跃程度，LF/HF主要反映交感和副交感神经的平衡关系，并对C、E两组的HF均值和LF/HF均值进行基线处理，见公式（3）。

$$F_p = \frac{H_p}{H_b} \quad (3)$$

式中， F_p 代表压力阶段的HF或LF/HF变化率， H_p 代表压力阶段HF或LF/HF均值， H_b 代表基线阶段HF或LF/HF均值。

对HRV数据进行重复方差分析，组内因子设为4个时间阶段（基线vs加压vs白幕或步行vs静观）和两个观看类型（CB vs EM），后通过Bonferroni法校正 p 值。对SD问卷数据进行因子分析，通过主成分分析法（promax斜交转轴法）旋转6次收敛，设定特征值 > 1 ，将C、E两组的因子得分进行比较，后进行配对t检验。在所有情况下，显著性水平设为 $p < 0.05$ ，边缘显著性设为 $p < 0.1$ 。两

名被试的数据未被收录，因此分析了28组有效数据。

2 研究结果

2.1 眼动数据

2.1.1 不同观赏模式下AOI的视觉感知比较结果

就视觉吸引力水平而言，当被试观看留园主景区时，构成主景区的14个AOI之间存在显著差异（C组， $H = 166.488, p < 0.001$ ；E组， $H = 153.769, p < 0.001$ ）。多重比较结果显示，无论C组还是E组，可亭及连廊（AOI 6）的视觉吸引力显著高于其他AOI，而后依次为正面植物（AOI 4）、左侧植物倒影（AOI 8）、右侧植物（AOI 7）。就视觉信息密度水平而言，主景区的14个AOI之间的也存在显著差异（C组， $H = 192.69, p < 0.001$ ；E组， $H = 180.467, p < 0.001$ ）。无论C组还是E组，可亭及连廊（AOI 6）的视觉信息密度显著高于其他AOI，而后依次为：正面植物（AOI 4）、左侧植物倒影（AOI 8）、建筑倒影（AOI 10）、曲裕楼（AOI 9）。就平均注视时间而言，C组14个AOI的平均注

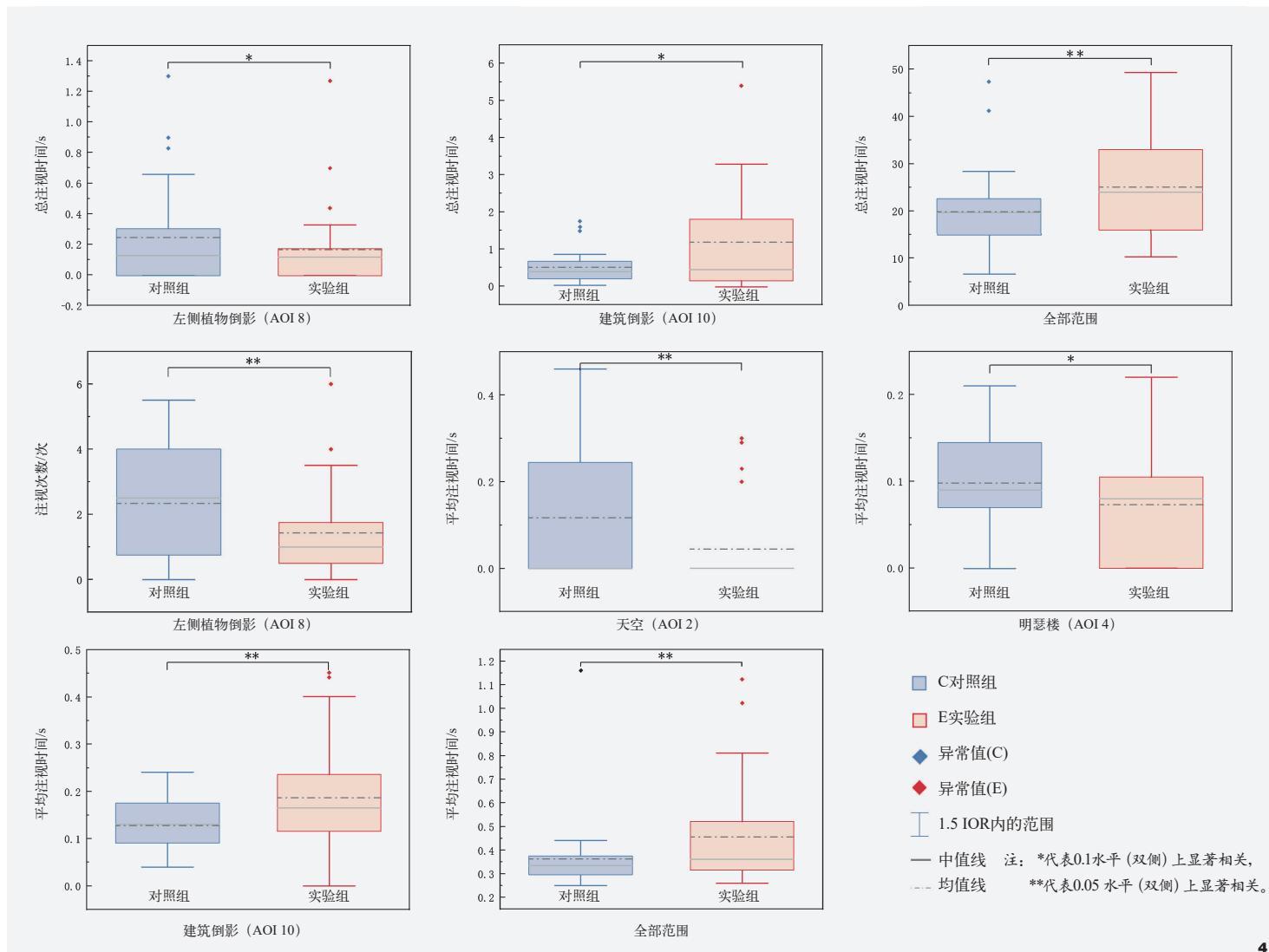


图4 不同观赏模式眼动指标比较

Fig. 4 Comparison of eye movement indicators under different viewing modes

视时间存在显著差异 ($H=128.927, p<0.001$)，E组同样存在显著差异 ($H=127.589, p<0.001$)。无论C组还是E组，正面植物(AOI 4)的平均注视时间显著长于其他AOI，而后依次为：可亭及连廊(AOI 6)、左侧植物倒影(AOI 8)、建筑倒影(AOI 10)、右侧植物(AOI 7)。

2.1.2 不同类型观赏模式下主景区视觉感知差异

被试观看ES时的总注视时间、平均注

视时间都显著长于CS。CS中左侧植物倒影(AOI 8)的总注视时间长于ES，且两者差异边缘显著。ES中建筑倒影(AOI 10)的总注视时间长于CS，且两者差异边缘显著。CS中左侧植物倒影(AOI 8)的注视次数显著高于ES。CS中天空(AOI 2)与明瑟楼(AOI 4)的平均注视时间均显著长于ES，ES中建筑倒影(AOI 10)的平均注视时间显著长于CS(图4, 图5)。

2.2 生理数据

方差分析4个时间段(基线 vs 加压 vs 白幕或步行 vs 静观)的HF，得 $F(3, 81)=7.873, p<0.05, \eta_p^2=0.226$ ，表明C、E两组的HF在各个阶段整体具有显著差异。HF(EM)与HF(CB)的分析得 $F(1, 27)=2.961, p<0.1, \eta_p^2=0.09$ ，表明EM与CB的HF呈边缘显著。方差分析4个时间段(基线 vs 加压 vs 白幕或步行 vs 静观)的LF/HF，得 $F(3, 81)=9.283, p<0.01$ ，

$\eta_p^2 = 0.256$, 表明C、E两组的LF/HF在各个阶段整体具有显著差异。LF/HF (EM) 与LF/HF (CB) 的分析得 $F(1, 27) = 4.236, p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.137$, 表明EM与CB的LF/HF具有显著差异(图6)。

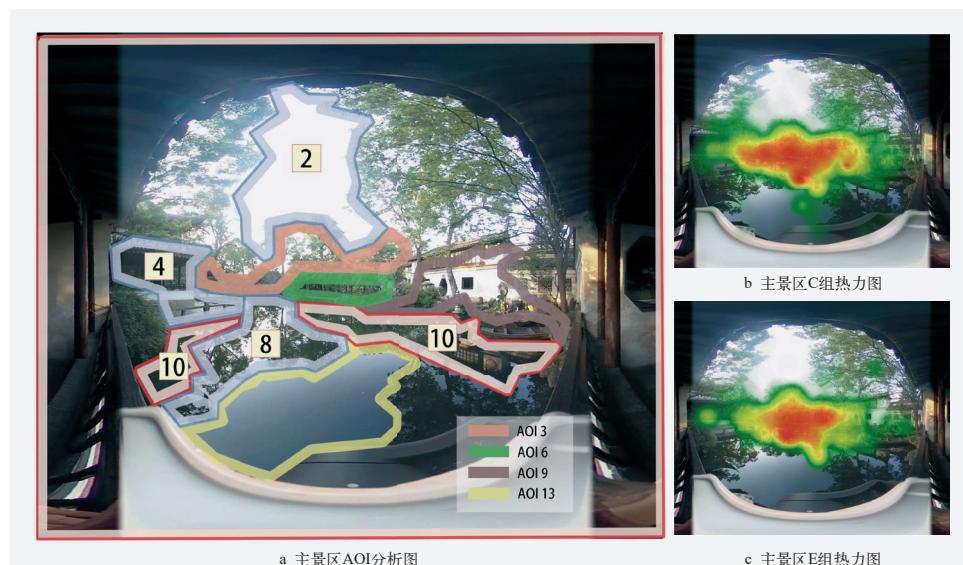
2.3 主观问卷

因子分析得到5组公因子, 共解释原有变量总方差的71.9%。根据5组公因子的形容词对, 依次将其命名为“游览体验”“空间尺度”“设计评价”“序列感知”“主观情绪”(表1)。结果表明, 被试者观看CB时对空间尺度的主观评分显著高于观看EM时; 被试观看EM时对序列感知的主观评分显著高于观看CB时; 被试观看CB与EM时对设计评价的主观评分统计呈边缘显著差异, 且观看CB时的评分平均值高于观看EM时; C、E两组的游览体验和主观情绪均无显著差异(图7)。

3 讨论

3.1 留园入口空间序列与视觉感知

研究显示, 正面植物(AOI 3)、可亭与连廊(AOI 6)等为主要园林构成要素^[21]。根据已有研究, 以绿荫轩为视点时, 游园者更容易分配视觉注意力给可亭与连廊等主要园林要素^[26]。本研究数据表明, 相较于无入口空间, 游园者通过暗狭入口空间序列后观赏主景区的总注视时间与平均注视时间增长, 可知游园者的视觉注意力更为集中, 对主要园林构成要素的视觉关注度更高。平均注视时间的增长表明通过入口空间后, 主景区景观对游园者产生的视觉吸引力大于无入口空间静观。注视点热力图显示, 就园林要素而言, 游园者通过暗狭入口空间后倾向于分配更多的视觉注意力给位于整体画面近心点区域。相较于有入口空间通道, 无入口空间情



a 主景区AOI分析图

b 主景区C组热力图

c 主景区E组热力图

注: AOI 10及全部范围在ES时的总注视时间、平均注视时间均显著长于CS时, 以红色标注; AOI 8在CS时的总注视时间显著长于ES时, AOI 8在CS时的注视次数显著高于ES时, AOI 2、4在CS时的平均注视时间显著长于ES时, 以蓝色标注。

5

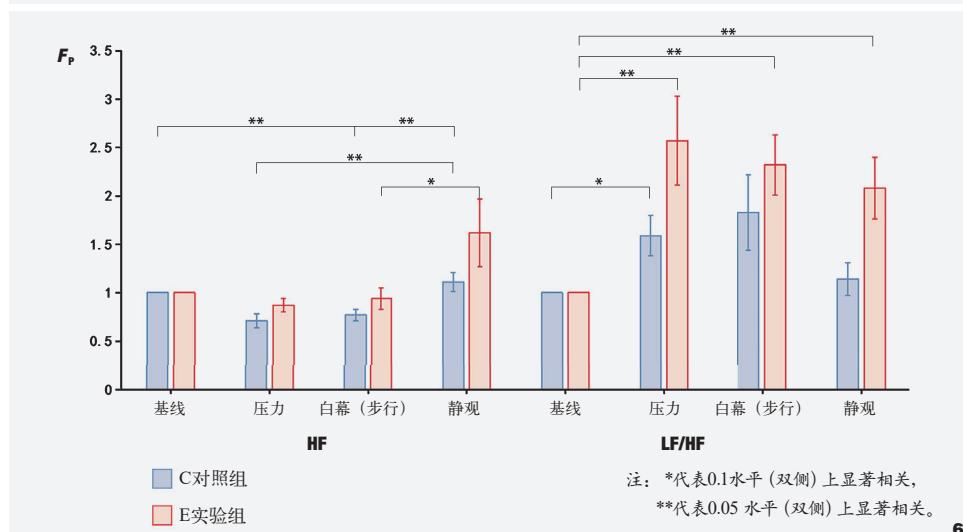


图5 不同观赏模式AOI分析图与注视点热力图

Fig. 5 AOI analysis diagrams for different viewing modes and eye tracking heatmap

图6 C、E两组各时间段的HF和LF/HF的比较

Fig. 6 Comparison of HF and LF/HF between groups C and E across time periods

况下游园者观赏主景区时视觉重心更为分散, 分配更多视觉注意力给天空(AOI 2)、明瑟楼(AOI 4)、左侧植物倒影(AOI 8)等非核心要素, 对主要园林构成要素可亭及连廊(AOI 6)的视觉关注减弱。由此可知入口空间将游园者的视觉注意力诱导到以正面植物(AOI 3)、

可亭与连廊(AOI 6)为主的主要园林构成要素上, 起到调节视觉体验、强化园林设计意图传达度的作用。

可亭及连廊(AOI 6)、正面植物(AOI 3)、曲裕楼(AOI 9)、建筑倒影(AOI 10)、明瑟楼(AOI 4)对被试者的视觉吸引力强于其他AOI。

表1 因子旋转矩阵
Tab. 1 Factor rotation matrix

因子轴 Factor axis	评估项目 Evaluation item	因子 Factor				
		F1	F2	F3	F4	F5
游览体验	丰富—单调	0.986	-0.167	-0.130	0.092	-0.165
	有趣—无趣	0.856	0.039	-0.084	0.047	0.123
	有韵律的—无韵律的	0.753	0.158	0.013	-0.019	-0.005
	协调—失调	0.690	0.201	0.008	-0.611	-0.020
	怀有期待—不期待	0.673	-0.202	0.373	0.158	0.082
空间尺度	开阔—狭小	-0.100	0.969	0.050	-0.020	-0.139
	大的—小的	0.012	0.935	-0.422	-0.058	0.018
	开敞—封闭	-0.113	0.733	0.231	-0.277	0.038
	深远—浅近	0.153	0.686	0.078	0.188	-0.441
	明亮—暗淡	-0.068	0.613	-0.044	0.289	0.226
设计评价	放松—压抑	0.052	0.461	0.436	0.067	0.161
	淡雅—鲜艳	-0.065	-0.125	0.869	-0.164	-0.209
	柔和—强烈	0.001	-0.031	0.839	0.033	0.002
序列感知	曲折的一笔直的	0.092	0.010	-0.014	0.882	-0.301
	富于变化—无变化	0.390	-0.006	-0.184	0.565	0.083
主观情绪	严整—散漫	-0.034	-0.164	-0.155	-0.263	0.974
	愉快—悲伤	0.181	0.213	0.173	0.127	0.508

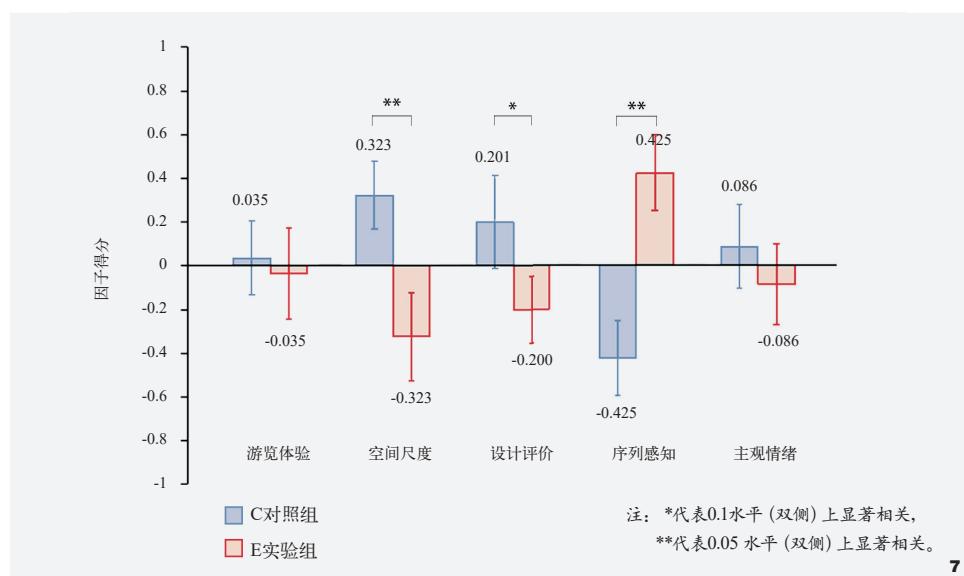


图7 C、E两组的因子得分对比与t检验

Fig. 7 Comparison of factor scores between group C and group E and the t-Test

先行研究认为人的视觉重心与要素的位置、明暗、留白、比例、复杂程度有关^[31]。而天空(AOI 2)与天空倒影(AOI 13)明度高、比

例大、复杂程度较低,对比之下,处于画面中心点处明度低、复杂程度高的建筑要素,如可亭及连廊(AOI 6)、曲裕楼(AOI 9)、明瑟

楼(AOI 4)等更容易吸引游园者的注意,这与以往研究相一致^[18],而观赏主景区之前游客通过暗狭入口空间序列的游览行为进一步强化了主景区的视觉吸引力。

可亭与连廊(AOI 6)、正面植物(AOI 3)、建筑倒影(AOI 10)、左侧植物倒影(AOI 8)、曲裕楼(AOI 9)包含的视觉信息高于其他AOI。而高水平的视觉复杂性元素会吸引被试者的注意力,并且可以激发被试者的好奇心,从而鼓励随后的注意力投入^[32]。

平均注视时间表明景观复杂性与被试者的兴趣或参与度^[18]。本研究中,正面植物(AOI 3)、可亭及连廊(AOI 6)、天空倒影(AOI 13)、左侧植物倒影(AOI 8)、建筑倒影(AOI 10)这5个AOI具有较强的视觉复杂性,并且更容易吸引游园者的兴趣。天空倒影(AOI 13)无论在CS时还是ES时的平均注视时间排名仅次于可亭,显著高于天空(AOI 2),已有研究表明古典园林中的水中倒影可以显著提升观赏者对构成要素的视觉注意力^[33],推知虽然天空本体视觉吸引力较低,但水面倒影的存在增加了其吸引力。

整体而言,无论有无入口空间,可亭与连廊仍然是主景区的主要园林构成要素。此外,入口空间序列的设置在影响游园者视觉注意力的同时,使游园者视线集中于主要园林构成要素,调节视觉体验,具有强化园林设计意图传达度、优化游观体验的效果。这一结果证明留园是一个各个空间紧密关联的有机整体,其主景区基于视觉体验的美感并不仅依赖于基于静观的中国传统山水画论和表现方法^[34],游客进入观赏区域前的导入空间也发挥了不可忽视的视线诱导作用。

3.2 留园入口空间序列与生理影响

C组和E组的HF在各个阶段整体都具有

显著差异，表明被试者观赏CB与EM后，都可以达到舒缓情绪的效果。与加压后相比，看CB时，副交感神经活动无显著变化，但观看EM后活动增强，HF基本回到基线位置。与之相对，步行后观看景观时，HF均值虽有回升，但不显著。

C组和E组的LF/HF在各个阶段整体都具有显著差异，这表明CB和CS与EM和ES都可以达到加压后减轻被试压力的效果。但两组减压效果存在一定差异，CB时LF/HF在加压后上升，观看景观后基本回落至基线值。但EM情况下，交感神经始终维持兴奋状态，LF/HF没有回落的迹象。这一现象表明，灰暗狭长的空间可以使游园者兴奋，丰富游观体验^[24,21,27]。这与前文眼动结论中，入口空间的设置可以影响游园者视觉注意力，调节视觉体验相互印证。可用“步行后豁然开朗”的理论进行一定的解释^[21]：狭暗入口空间会带给游园者压抑与兴奋感，并且开阔的主景区与狭暗入口空间形成的空间、明暗对比会带给游园者一定的视觉冲击，使游园者的交感神经依旧维持一定的活跃状态。之后，随着观看主景区时间的增加，开阔主景对游园者的减压效果渐渐显现。故此处LF/HF未有回落迹象可以理解为一种正向的兴奋保持。

综上所述，无论入口空间是否变化，观看主景区开阔的景观始终会给人带来减轻压力的效果，但是两组之间存在一定差异。与前文研究一致的是，通过设置灰暗狭长的入口空间序列，可以使游园者达到精神活跃、兴奋的状态，提升游园者游览兴致，进而达到丰富游观体验的目的。

3.3 留园入口空间序列与心理影响

如图7所示，就游览体验而言，C组与E组之间没有显著差异($p=0.69$)，这表明是

否在主景前设置狭长通道对游园者主观游观体验并无影响。这一结论与前文生理数据分析中的结论相呼应：C、E两组的HF与LF/HF都具有显著差异，表明步行后静观与白幕后静观都能起到减压效果，且游赏过程中副交感神经活动较为平稳。这与现有研究提及的狭长、封闭、明暗对比的空间可以为游园者提供更丰富的情绪变化，使其拥有良好的丰富的情绪体验的观点似乎不同^[24,21,27]，可能游园者丰富的情绪不仅由生理活动引起，也源于园林诗意图空间的情景交融^[35]。

就空间尺度而言，C组与E组之间具有显著差异($p=0.01$)，这表明灰暗狭长的廊道会带给游园者压抑、空间较小的主观感觉。这一结论与前文生理数据中，LF/HF在步行阶段上升后始终维持兴奋状态，交感神经活跃，被试达到亢奋、紧张的状态相互印证，与狭长的空间会给游园者带来沉闷、压抑感觉的研究结论一致^[4,21,27]。但有趣的是，步行后静观因子得分较低，这表明狭暗入口空间给被试带来压抑的主观感觉不会因为观赏开阔的主景区而被立刻消除，这种压抑的感觉可能会持续一段时间。这与前文生理数据中，LF/HF在步行后没有回落的迹象，交感神经始终维持兴奋状态相互印证。

就设计评价而言，C组与E组之间具有边缘显著差异($p=0.05$)，并且E组因子得分高于C组，这表明步行空间与开阔主景区的光线明暗、色彩强烈、风格浓淡等对比可以对游园者的心灵造成较大冲击。这与前文生理数据中，LF/HF在步行阶段上升，并且在静观时交感神经始终维持兴奋状态相互印证。并且与前文所提文献预测的空间对比、明暗变化、视觉色彩等设计要素可以对游园者产生心理影响所相符^[24,21,27,36]。

序列感知而言，C组与E组之间具有显著

差异($p=0.01$)，并且步行后静观因子得分高于白幕后静观，这表明入口空间的存在确实达到了曲径通幽、丰富空间序列感受的设计意图。这一结论与前文的生理数据中，被试在步行状态下，交感神经始终维持兴奋状态相互印证。并且这一结论得到了先前研究的支持^[24,21,27]。

就主观情绪而言，C组与E组之间没有显著差异($p=0.34$)，这表明有无入口空间对游园者的主观情绪无显著影响。这一结论与前文生理数据中，步行后静观与白幕后静观都能起到减压效果，且副交感神经的变化不大相互印证，并且与游览体验因子的结论相互印证。

综上所述，与前文研究所一致的是，就设计本身而言，灰暗狭长入口空间的设置，以及其空间收放、明暗对比、色彩对比等手法可以带给游园者压抑、亢奋的主观感受；同时，狭暗入口空间与开阔主景区的空间对比也能对游园者的感官造成一定的冲击，并且达到丰富空间形态、营造曲径通幽的设计目的，但这一对比手法所造成的冲击力，对游园者的主观游览体验没有显著影响。

4 结论

耦合分析留园入口空间实验时被试者眼动、生理、心理数据，得出如下结论：通过设置暗狭入口空间序列与开阔主景区的空间对比可以影响游园者视觉注意力，使游园者视线集中于主要园林构成要素，起到调节视觉体验、强化园林设计意图传达度的作用。同时，暗狭入口空间序列可使游园者神经活动更为活跃，为其带来丰富的游观体验的同时，达到营造曲径通幽的设计目的。狭暗入口空间的尺度、明暗对比对游园者造成的压抑、兴奋感较为强烈，并且入口空间序列与

开阔主景区的对比会带给游园者一定的视觉冲击，使其维持一定的兴奋状态。眼动数据表明，暗狭入口空间具有将游园者视线聚焦到留园主景区的可亭等关键园林要素上的作用，达到强化园林主景的吸引力、优化游观体验的效果。生理数据表明，步行后观赏主景区依旧可以给游园者带来减压效用，只不过这种减压效用可能因为兴奋感的延续而稍被替代。故本研究将这种“豁然开朗”的现象解释为一种正向兴奋感。本研究从游园者的视觉、心理、生理角度出发，对古典园林空间序列的视觉感知作用机制进行了初步探索，为掌握中国传统造园理论与技术和景观设计师在现代空间设计中的决策提供了基础数据。

注：图1改绘自参考文献[21]；其余图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] 衣学慧. 园林艺术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [2] 陈从周. 说园[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007.
- [3] (明)计成. 园治[M]. 胡天寿, 译. 重庆: 重庆出版社, 2007.
- [4] 刘敦桢. 苏州古典园林[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979.
- [5] 冯纪忠. 组景刍议[J]. 中国园林, 2010, 26(11): 20-24.
- [6] 孟兆祯. 借景浅论[J]. 中国园林, 2012, 28(12): 19-29.
- [7] 迟津萍. 苏州古典园林入口空间研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- [8] 尹玉洁. 基于空间结构分析探究留园造园理法[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [9] 尹莹. 苏州宅园建筑入口空间特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [10] 刘婉抒, 许庆, 孟祥庄, 等. 不同时期拙政园园林入口空间视域特征量化研究[J]. 园林, 2021, 38(12): 44-51.
- [11] 陈星汉, 于瀚婷, 熊若璟, 等. 基于空间句法与机器学习的中国古典园林空间指征分析框架建构[J]. 风景园林, 2024(03): 123-131.
- [12] 张冠亭, 彭予洋, 史蒂芬·奈豪斯. 基于LiDAR点云的中国传统园林视觉空间定量分析方法——以寄畅园为例[J]. 风景园林, 2024, 31(07): 108-114.
- [13] 丁绍刚, 刘雪寒, 陆攀. 基于驻点研究法的网师园多路径交汇处游人行为研究[J]. 中国园林, 2021, 37(07): 55-59.
- [14] 于遂坤, 徐跃家, 金秋野. 基于分形维数的游览路径复杂性分析——以留园为例[J]. 华中建筑, 2023, 41(04): 134-139.
- [15] 张甜甜, 刘滨谊, 朱喆, 等. 网师园“步移景异”时空感知生成机理[J]. 中国园林, 2023, 39(11): 22-28.
- [16] 寿田园, 王欣欣. 基于视觉感知的中国古典园林廊空间序列量化及偏好研究——以瞻园为例[J]. 古建园林技术, 2025(03): 39-45.
- [17] 朱海鹏, 孔宇航, 大野隆造. 基于全景技术的园林游观体验视觉分析方法——以留园为例[J]. 风景园林, 2021, 28(12): 77-84.
- [18] SUN M K, DONG L. Impact of the Classic Chinese Garden Soundscape with Focus on Physiological and Psychological Effects, Tested Through Eye-Tracking, and Subjective Evaluation[J]. Frontiers in Psychology, 2022, 13: 902630.
- [19] 陆邵明. 眼动追踪视野下上海古典园林文化基因的刻画[J]. 同济大学学报(社会科学版), 2020, 31(06): 93-102.
- [20] 郭黛姮, 张锦秋. 苏州留园的建筑空间[J]. 建筑学报, 1963(03): 19-23.
- [21] 彭一刚. 中国古典园林分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [22] 彭一刚. 庭园建筑艺术处理手法分析[J]. 建筑学报, 1963(03): 15-18.
- [23] 潘谷西. 苏州园林的观赏点和观赏路线[J]. 建筑学报, 1963(06): 14-18.
- [24] 鲁安东. 隐匿的转变: 对20世纪留园变迁的空间分析[J]. 建筑学报, 2016(01): 17-23.
- [25] 赵鑫玮, 陈小鸿. 城中公园行人特性研究[C]// 品质交通与协同共治——2019年中国城市交通规划年会论文集. 成都: 中国城市规划学会城市交通规划学术委员会, 2019: 2252-2267.
- [26] 陈从周. 苏州园林[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1986.
- [27] 周维权. 中国古典园林史[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [28] 童嵩. 江南园林志[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [29] AMATI M, GHANBARI PARMEHR E, MCCARTHY C, et al. How Eye-catching Are Natural Features when Walking Through a Park? Eye-tracking Responses to Videos of Walks[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 31: 67-78.
- [30] MCCONKIE G W, ZOLA D. Is Visual Information Integrated Across Successive Fixations in Reading?[J]. Perception & Psychophysics, 1979, 25(03): 221-224.
- [31] LATINI A, MARCELLI L, DI GIUSEPPE E, et al. Investigating the Impact of Greenery Elements in Office Environments on Cognitive Performance, Visual Attention and Distraction: An Eye-tracking Pilot-study in Virtual Reality[J]. Applied Ergonomics, 2024, 118: 104286.
- [32] SUN Z K, FIRESTONE C. Curious Objects: How Visual Complexity Guides Attention and Engagement[J]. Cognitive Science, 2021, 45(04): e12933.
- [33] SUN M K, BAO Y Y. Effects of Reflecting Water on Viewers' Visual Attention, Spatial Perception, and Emotional Responses: A Case Study in Chinese Heritage Garden[J]. NPJ Heritage Science, 2025, 13: 26.
- [34] 王胜男, 吴晓淇. 寄情山水——中国山水画与造园美感的成因[J]. 中国园林, 2024, 40(07): 15-18.
- [35] 赵江华, 曹林娣. 从实例看中国园林建筑意境的营构手法[J]. 中国园林, 2024, 40(08): 30-36.
- [36] 谭明. 景园色彩构成量化研究——以南京地区为例 [D]. 南京: 东南大学, 2018.