

文章编号:1673-9469(2025)04-0097-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.014

## 基于眼动追踪技术的冀南乡村风貌视觉感知优化研究

张蕾<sup>1</sup>,石敏琪<sup>1</sup>,李嘉铭<sup>1</sup>,王清勤<sup>2\*</sup>

(1. 河北工程大学 京津冀空间智能感知协同技术创新中心,河北 邯郸 056038;

2. 中国建筑科学研究院有限公司,北京 100013)

**摘要:** 为应对当下因建筑情感表达缺失引发的社会心理健康问题,借助眼动追踪技术,针对冀南地区藁家河村乡村风貌的视觉感知特征开展了实证研究。通过构建包含道路、边界、节点和标志物四类要素的评价体系,并采用主客观相结合的方法,分析发现:当前乡村风貌存在视觉焦点缺失和注意力分散等显著问题,而通过优化设计可显著提升被试者在关键场景的视觉注意力。研究进一步揭示,绿视率、围合度等空间特征参数与视觉感知效果之间存在明显的区间效应,视觉感知在20%~40%的绿视率、50%~60%的围合度、12%~26%的开放度和10%~31%的视觉可辨性下效果最佳。这一发现为乡村风貌设计提供了基于视觉感知的量化评价方法和优化策略。

**关键词:** 乡村风貌设计;量化情感技术;眼动追踪技术;视觉感知优化

**中图分类号:** TU982.29

**文献标识码:** A

## Research on Visual Perception Optimization of Rural Scenery in Southern Hebei Province Based on Eye Tracking Technology

ZHANG Lei<sup>1</sup>, SHI Minqi<sup>1</sup>, LI Jiaming<sup>1</sup>, WANG Qingqin<sup>2\*</sup>

(1. Jingjinji Spatial Intelligent Perception Collaborative Innovation Center, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** To address the prevalent social and psychological health issues stemming from the inadequate expression of architectural emotion, an empirical study was conducted on the visual perception characteristics of the rural landscape in Linjiahe Village, Southern Hebei Province, leveraging eye-tracking technology. By establishing an evaluation system encompassing four key elements: roads, boundaries, nodes, and landmarks, and adopting a methodology that integrates subjective and objective analyses, the study identified notable issues in the current rural landscape, including the absence of a visual focus and attention dispersion. Importantly, optimized design was found to substantially enhance participants' visual attention in critical scenes. Furthermore, the research unveiled a clear interval effect between spatial feature parameters, such as green vision ratio and enclosure degree, and visual perception outcomes. Specifically, optimal visual perception was achieved with a green vision ratio ranging from 20% to 40%, an enclosure degree of 50% to 60%, an openness of 12% to 26%, and a visual discriminability of 10% to 31%. This discovery offers a quantitative evaluation approach and optimization strategies grounded in visual perception for rural landscape design.

**Key words:** rural landscape design; quantitative emotional technology; eye tracking; visual perception optimization

随着对健康定义的重新认知以及当下建筑情感  
失语加剧引发的社会心理健康危机,健康的内涵已

从传统的机体健康扩展到生理、心理健康等多个  
方面。这一转变促使建成环境研究从关注功能需求转

收稿日期:2025-05-09

基金项目:中央引导地方科技发展资金资助项目(246Z6101G)

第一作者:张蕾(1996—),女,河北邯郸人,硕士,实验师,从事感性建筑方面的研究。

\* 通信作者:王清勤(1964—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授级高级工程师,从事健康建筑方面的研究。

向关注人本关怀。伴随中国城镇化率突破65%及工业化与城市化步伐加快,“千村一面”和“文化认同弱化”等问题日益凸显,这些问题引发的“乡愁缺失”现象已被证实与居民抑郁倾向、社会联结断裂等心理健康问题显著相关<sup>[1]</sup>。这一现实困境暴露出传统乡村规划在主观体验量化方面存在不足的缺陷,亟需建立环境-感知的系统性研究框架。

眼动追踪技术作为环境心理学研究的前沿工具,通过捕捉被试者的注视点、瞳孔大小等客观生理指标,有效突破了传统问卷方法的主观性局限。现有研究主要集中于城市公共空间与建筑环境领域。这些研究揭示了视觉场景中的潜意识偏好与环境特征间的关联机制<sup>[2]</sup>。近年来,该技术逐步拓展至乡村空间视觉评价;研究者运用眼动数据量化公众对乡村公共景观的偏好特征,为景观优化提供科学依据<sup>[3-5]</sup>;对比村民与游客在乡村街道环境中的视线行为差异,提出差异化设计策略<sup>[6]</sup>;结合主观情感量表与生理数据,量化乡村胡同空间感知能力与情感舒适度<sup>[7]</sup>。视觉感知作为人感知环境的主要途径,是空间情感价值评估的核心指标<sup>[8]</sup>,在人类感知中占据70%~80%的比例<sup>[9]</sup>。作为视觉情绪刺激的呈现媒介,实验室环境下的二维静态图片经证实具有可靠的情绪唤起效度。通过标准化控制视觉元素,可有效诱发目标情绪并减少变量干扰<sup>[10]</sup>。综上,眼动追踪技术结合二维静态图片的实验方法在乡村空间视觉评价领域具有显著应用潜力。

乡村作为城乡协同发展的关键载体,其风貌品质直接影响居民的生活满意度与心理健康<sup>[11]</sup>。冀南地区是晋、冀、鲁、豫四省毗邻区域,其乡村作为北方典型乡村类型,凭借丰富的文化与独特建筑形态,是乡村建成环境研究的重要对象。国家乡村振兴战略持续推动空间优化,明确要求统筹经济发展、生态保护与文化遗产,实现建筑空间在文化和功能上的协同发展。深入解析冀南乡村风

貌,对践行“望得见山、看得见水、记得住乡愁”理念、推动其文脉延续与功能升级至关重要。因此,本研究应用眼动追踪技术,量化分析冀南传统村落风貌场景的视觉注意力分布与情感偏好,为风貌优化提供实证依据与实践路径。

## 1 研究对象与研究方法

### 1.1 研究对象

蔺家河村作为千年古村,因蔺相如得名,其空间特征与文化风貌具有冀南地区乡村的代表性和典型性。凯文·林奇在《城市意象》中提出的五要素理论<sup>[12]</sup>,为分析城市和乡村的空间结构提供了经典视角,因此本研究选取该理论作为基础。鉴于“区域”要素在静态视觉感知中存在维度缺失,最终选取道路、边界、节点及标志物为核心分析维度。通过构建乡村风貌要素评估框架,深入探讨风貌特征对视觉感知体验的影响,旨在为乡村风貌的优化设计提供科学依据,提升居民和游客的视觉体验与情感认同。研究框架如图1所示。

### 1.2 研究方法

乡村风貌设计亟需科学量化多元主体的认知与情感差异。为突破传统评价方法的局限性,本研究基于认知评价理论,构建主客观一体化的综合评价体系。

#### 1.2.1 主观问卷评价

数据采集采用分层抽样方法,获取驻村干部、原住村民和游客三类主体的有效问卷84份,问卷有效率达93.4%,采用7级李克特量表进行量化测量。数据采集遵循严格的质量控制标准,剔除无效问卷后,运用统计学方法解析空间要素的情感权重与功能评价,从重要性维度、情感体验维度和实际表现维度揭示风貌要素的认知差异规律。

#### 1.2.2 生理指标评价

为弥补主观评价的局限性,本研究同步开展

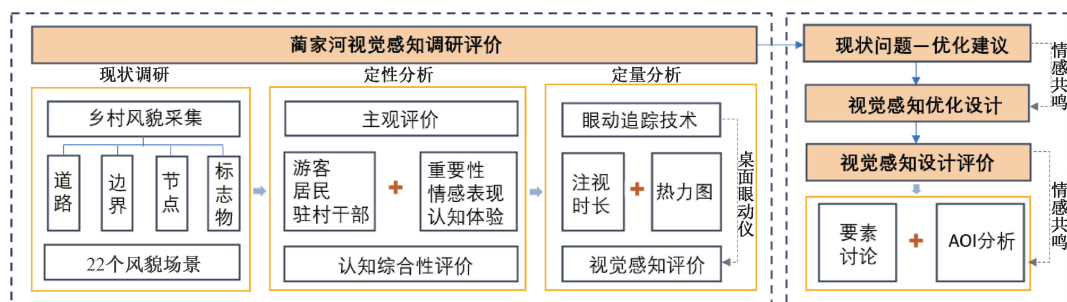


图1 乡村风貌视觉感知优化研究框架

Fig. 1 Research framework for optimizing visual perception of rural landscape

了眼动追踪实验。实验采用七鑫易维 aSee Pro 桌面式眼动仪,该设备基于三维人眼模型与红外瞳孔-角膜反射技术,采样率可达 140 Hz,能够精确捕捉注视点位置及视觉热区分布。样本量计算严格遵循实验设计规范,使用 G \* Power 3.1 软件,依据配对样本 *T* 检验要求设定参数,得出最小理论样本量  $N=34$ 。本研究最终招募 36 名无视力缺陷的被试者,统计效力提升至 0.98。为确保实验标准化并最大限度减少外部变量干扰,在封闭安静的实验室内严格控制照明、温度和湿度保持恒定,所有被试者均保持 60 cm 的固定视距,通过 21 英寸屏幕观看经过标准化处理的乡村风貌刺激图片。本研究重点关注的指标包括:眼动热力图,反映注视点空间密度分布;左右瞳孔直径,作为认知努力程度的客观衡量指标;注视时长,用于衡量视觉处理深度和难度;平均眼跳速度,反映视觉搜索策略的效率及注意力分配模式。

### 1.3 实验场景

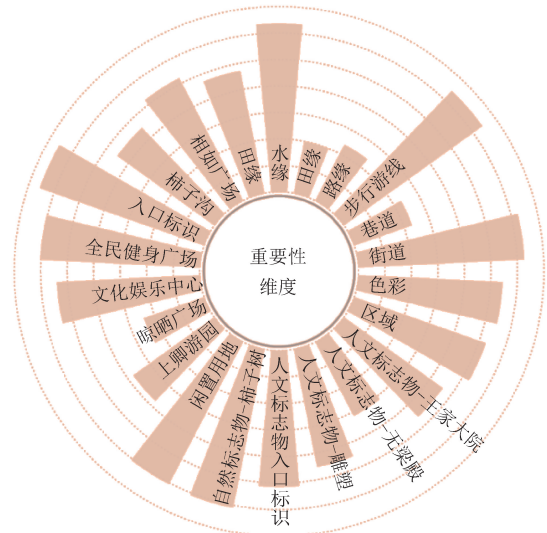
#### 1.3.1 实验场景选取

基于实地调研与统计结果,选取 22 处具有代表性风貌要素场景进行多维度评价,如图 2 所示。其中,重要性维度用于定量识别关键设计要素;情感体验维度揭示景观要素引发情感共鸣与心理认同的效能;实际表现维度考察风貌在现实环境中的呈现效果。根据评价结果,筛选出 10 个重要性高但情感表现薄弱的待优化场景。

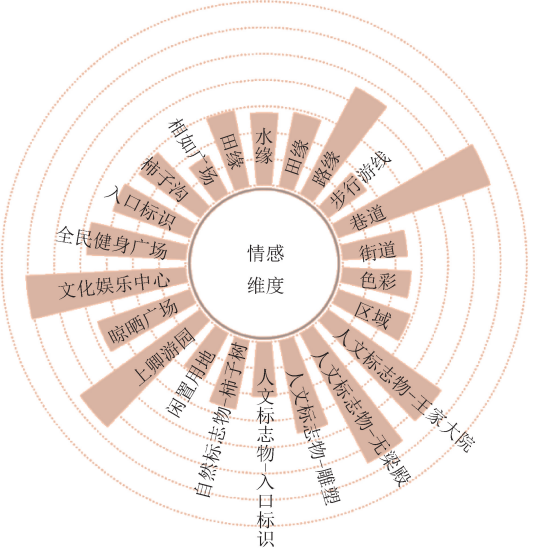
#### 1.3.2 实验场景分析

以蔺家河村风貌要素为自变量、注视时长为因变量进行单因素方差分析,结果显示注视时长  $p=0.262>0.05$ ,无显著差异。这表明当风貌要素高度相似时,缺乏吸引长时间关注的突出特征,难以引发注视时长的显著变化。通过对 aSeeStudio 软件生成的热力图进行视觉关注分布情况分析,如图 3 所示。整体视觉关注分布呈现明显分散趋势,尤其在街道(A)、节点(B)和边界(C)场景中,注视点广泛分布,缺乏集中区域。标志物(D)场景虽存在部分视觉集中现象,但整体关注点依然分散,未能有效引导视觉焦点。

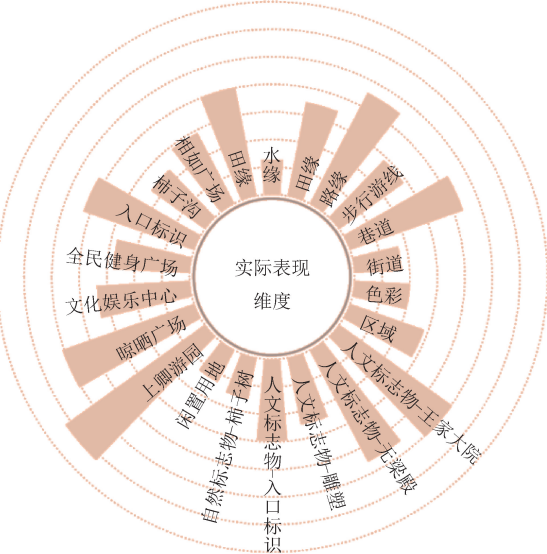
眼动实验结果表明,蔺家河村现有风貌场景的视觉感知效果存在不足:视觉注意力分布分散,缺乏明显焦点。这共同揭示了当前风貌设计在视觉引导效能和文化表现力方面存在双重缺陷。视觉认知的分散性削弱了环境的情感唤起潜力,阻碍了深层次文化共鸣的产生。



(a) 重要性维度



(b) 情感维度



(c) 实际表现维度

图 2 风貌认知评价分析

Fig. 2 Analysis of cognitive evaluation of style and appearance

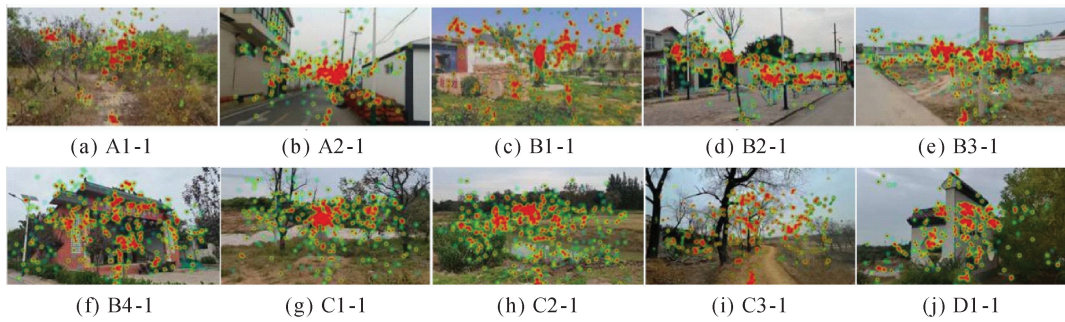


图3 实验素材场景下被试者的眼动热力图

Fig. 3 Eye movement heatmap of participants in experimental material scenarios

## 2 设计优化及验证

### 2.1 优化设计

道路方面,通过设置低矮墙体、采用本土植物进行绿化以及使用特色铺装,增强空间围合感与视觉引导效果,并优化步行路线提升行走体验;边界方面,以水缘为重点设计区域,采用曲线划分空间,结合透水铺装、垂直绿化以及设置观景平台,增强空间层次与视觉吸引力;节点设计通过打造圆形主题广场、设置文化符号雕塑等方式形成视觉

焦点,强化文化辨识度;标志物设计融入河流意象与历史符号,借助地形塑造、特色铺装及框景景窗设计,提升空间识别性。设计前后效果如图4所示。

### 2.2 验证分析

本研究通过分析现实场景与设计模型所引发的被试者眼动数据,探讨乡村风貌改造前后不同空间类型的视觉关注模式的变化。改造后视觉热点图的可视化分析能够清晰识别空间中的主要视觉关注点,如图5所示。

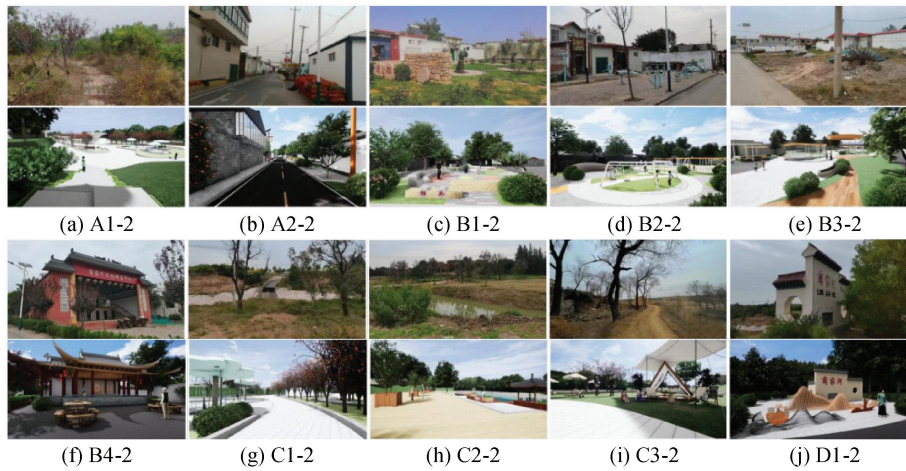


图4 设计前后视觉感知实验场景

Fig. 4 Designing visual perception scenarios before and after

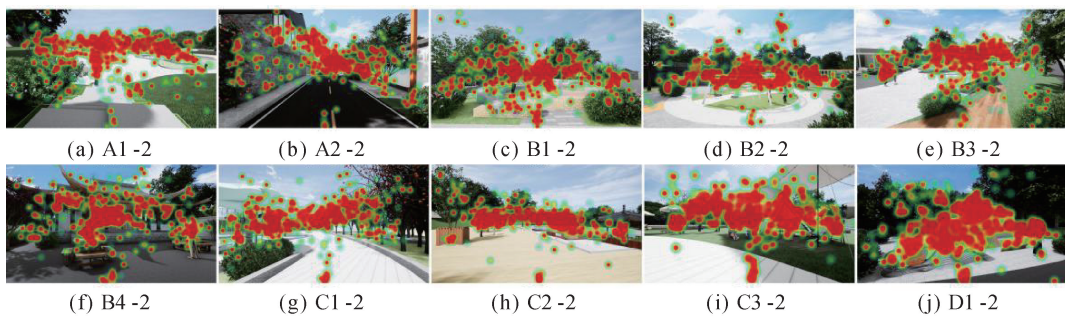


图5 设计后乡村风貌刺激下被试者的眼动热力图

Fig. 5 Oculomotor thermograms of subjects under post-design rural landscape stimuli

设计干预后,热图分布显著变化:热区由点状演变为片状连贯分布,集中于新建和改造的构筑物与核心景观节点。热图聚集性增强证实了设计在引导视觉关注、激发情感共鸣方面的有效性。通过组织视觉序列、嵌入文化元素及重塑功能节点,设计提升了空间识别性与吸引力,使情绪感知更加集中、连贯,进而强化了场所精神与归属感。

为评估风貌改造前后眼动指标的差异,以设计前后场景为自变量、眼动指标为因变量,首先进行正态性检验。结果显示:道路空间与节点空间中左眼瞳孔直径、注视时长、平均眼跳速度,边界空间中左眼瞳孔直径、平均眼跳速度,标志物空间中左、右眼瞳孔直径、注视时长、平均眼跳速度均符合正态分布,后续采用配对样本  $T$  检验分析其变化。而道路空间、节点空间、边界空间的右眼瞳孔直径及边界空间的注视时长呈显著偏态分布,则采用威尔科克森非参数检验来进一步分析数据的差异性。

差异性分析结果显示,道路空间中被试者左右眼瞳孔直径,节点与边界空间中被试者左右眼瞳孔直径及注视时长,以及标志物空间中被试者左右眼瞳孔直径,均达到统计显著水平( $p < 0.05$ ),这表明乡村风貌设计改造在不同空间类型下显著影响了被试者的视觉唤醒和注意力分配。与此同时,被试者在不同空间类型中的平均眼跳速度差异分别为:道路空间为 0.289,节点空间为 0.073,边界空间为 0.499,标志物空间为 0.169,均未达到显著性水平。这表明设计前后场景在整体认知负荷和视觉定位需求上保持一致,未引发被试者视觉扫描策略的改变。为直观呈现设计前后眼动指标的具体变化,基于 Origin 2022 软件绘制了被试者左右眼瞳孔直径变化以及节点与边界空间中注视时长的半箱线图,如图 6 所示。

统计分析显示,被试者在主要空间类型的瞳孔直径普遍呈增加趋势,节点空间左右眼瞳孔直径均增加 4.9%,注视时长增加 13.9%;边界空间左、右眼瞳孔直径分别增加 7.7%、9.0%,注视时长增加 7.0%;标志物空间左、右眼瞳孔直径分别增加 0.3%、1.8%。结果表明,乡村风貌设计对被试者的视觉注意力和认知负荷具有显著影响。此外,注视时长随着实验与场景的递进而增加,这可能是由于在实验初期被试者多进行快速扫视的浅层认知加工,随后逐渐转向局部细节的深度认知加工。

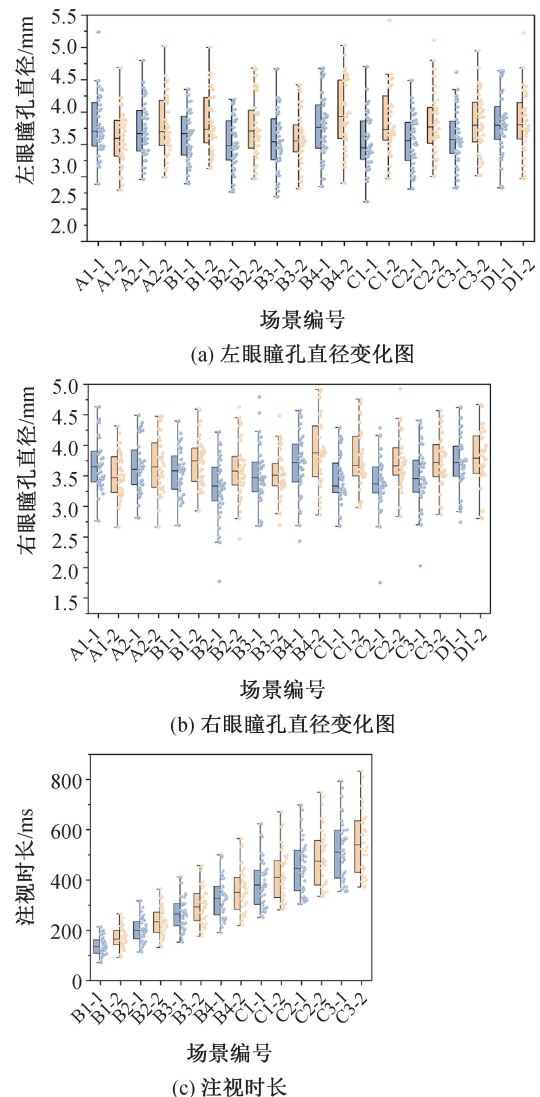


图 6 节点空间设计前后眼动变化

Fig. 6 Changes in eye movement before and after node space design

### 2.3 指标讨论

为系统验证乡村风貌视觉感知的优化效果,研究选取绿视率、围合度、开放度、视觉可辨性、步行化度和机动化度六个量化指标<sup>[13]</sup>,综合评估乡村风貌设计的视觉感知特征,如表 1 所示。鉴于上述分析已证实风貌优化前后被试者瞳孔直径存在显著差异,进一步选取各场景瞳孔直径均值作为核心生理指标,与上述风貌设计指标开展联合分析。

为精准提取乡村风貌设计指标,采用 DeepLabv3+语义分割模型对设计前后场景图像进行自动分割,将场景划分为道路、人行道、建筑物、墙等 19 类要素,如图 7 所示。随后运用 Python 计算各类要素占比,以此量化各场景的绿视率、围合度、开放度等核心指标。

表 1 影响乡村视觉感知体验的关键特征

Tab. 1 Key characteristics affecting rural visual perception experience

空间特征	公式	特征解释
绿视率	绿视率 = $P_{植物}$	场景中绿色植被所占比例,反映生态感知强度和环 境亲 和度
围合度	围合度 = $P_{建筑} + P_{植物} + P_{栅栏} + P_{墙}$	衡量空间界面的封闭程度,反映场所感与安全 感水平
开放度	开放度 = $P_{天空}$	描述空间的开敞程度,体现场景的空间感与视 野开阔性
视觉可辨性	视觉可辨性 = $P_{建筑} + P_{交通标志} + P_{栅栏}$	评估视觉中显著目标的清晰度和易识别性,影 响导航与空间理解
步行化度	步行化度 = $P_{人行道} + P_{人} + P_{骑行者} + P_{交通信号} + P_{交通灯}$	反映对步行和慢行交通友好的程度,体现人本 交通环境 质量
机动化度	机动化度 = $P_{道路} + P_{汽车} + P_{摩托车} + P_{公交车} + P_{卡车} + P_{火车} + P_{交通信号} + P_{交通灯}$	机动车主导的交通环境特征,影响空间的行车 属性与交 通压力

注: $P_i$ 为街景要素*i*在街景图像中的像素占比。

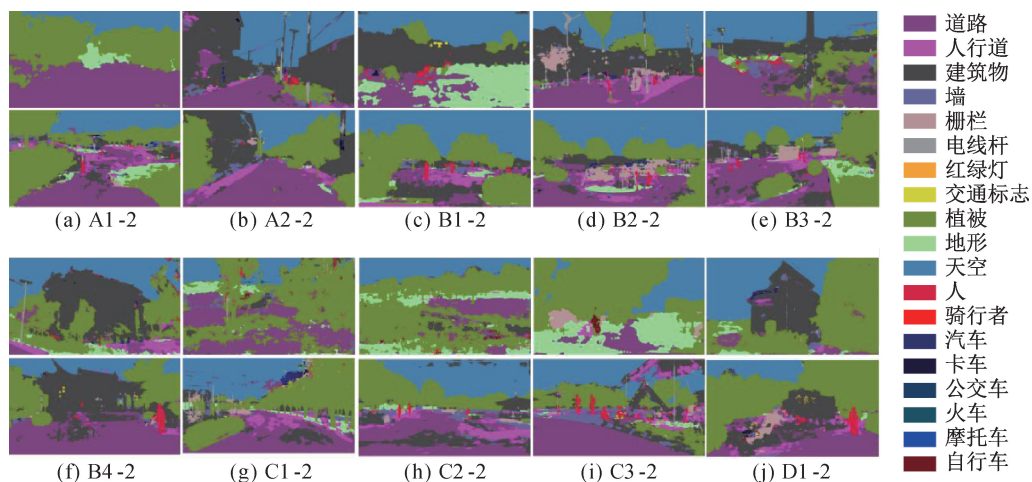


图 7 设计前后图像语义分割

Fig. 7 Semantic segmentation of images before and after design

研究表明,随着绿视率、围合度、开放度与视觉可辨性的提升,被试者的瞳孔直径均值呈现先上升后下降的趋势,如图 8 所示。绿视率在 4%至 40%区间内提升时,瞳孔直径随之增大,反映出被试者注意力与认知投入增强;但当绿视率超过 40%时,瞳孔直径下降,这可能由于过高绿植覆盖导致信息冗余或注意疲劳。围合度提升时,瞳孔直径呈波动上升趋势,并在约 54%时达到峰值,这表明该围合度水平能有效激发感官唤醒或环境关注,因此,50%~60%的围合度是一个较优的设计范围。开放度在 12%~26%区间内瞳孔直径波动显著,且出现多个峰值,说明该区间更易引发被试者的注意或情绪反应;超过该范围后,瞳孔直径趋于稳定。视觉可辨性在 10%~31%区间内,瞳孔直径普遍较大,而在低于 10%或高于 35%时,被试者的反应减弱。相比之下,步行化度与机动化度指标未表现出显著趋势,这可能与样本中交通元

围合度与开放度常被视为互相对立的空间属

素分布相对集中,且被试者关注度受个人经验和交通安全习惯影响较大有关。

为深入探究设计指标与视觉感知的定量关系,本研究引入兴趣区域(Area of Interest, AOI)分析。鉴于适度绿视率可通过优化色彩对比与空间层次提升信息辨识效率<sup>[14]</sup>,并考虑首次注视前时长作为衡量视觉搜索效率与信息加工难度的指标,本研究聚焦绿视率与视觉可辨性要素,分析其与被试者首次注视前时长的关系,以揭示景观特征对视线吸引力的影响机理及自然元素对信息加工效率的促进作用。实验数据显示,高绿视率(即绿视率>40%)可能抑制视觉辨识度:例如样本 C1-1,其绿视率为 51.68%,视觉辨识度仅 8.19%。该样本中视觉要素的首次注视时长为 0.43 s,显著短于绿植区域注视前时长 4.83 s,如图 9 所示。这表明当绿视率超过一定阈值时,浓密植被会吞噬视觉信息,降低关键要素的识别效率。

性,空间的物理围合度提高,开放度会随之降

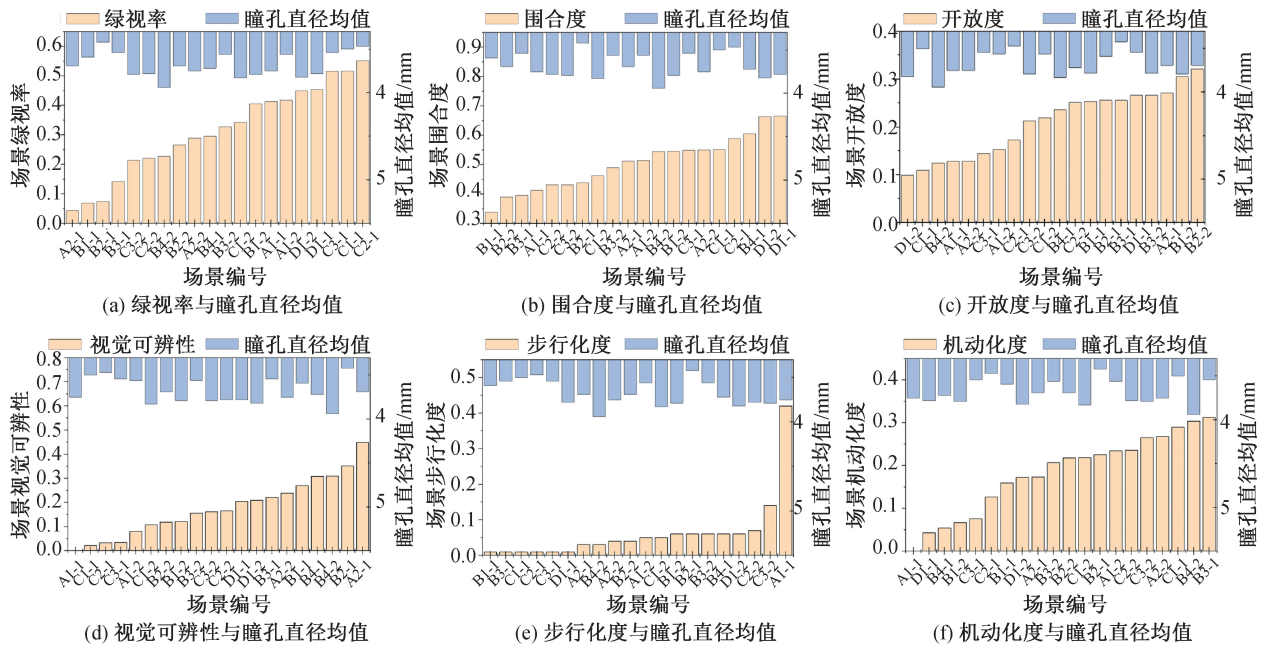


图 8 视觉感知特征与瞳孔直径均值联合

Fig. 8 Visual perception features combined with mean pupil diameter

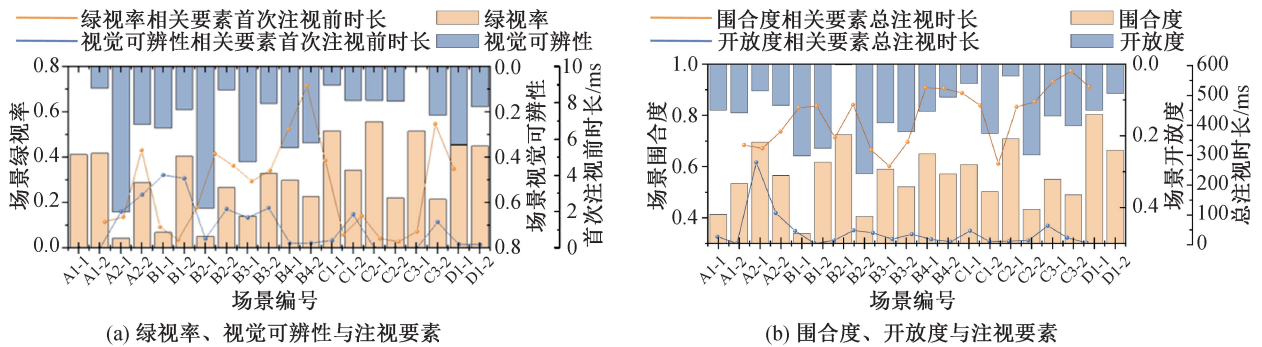


图 9 视觉感知关联及眼动指标分析

Fig. 9 Visual perception correlation and eye movement index analysis

低<sup>[15]</sup>。总注视时长反映注意力分配强度与认知加工深度。注视时间越长,通常表明该区域的信息处理复杂度更高、吸引力更强。数据分析显示,C2-1、D1-1 等高围合度场景的开放度偏低,B1-1、B2-2 等低围合度场景的开放度较高。此外,围合度要素的总注视时长显著高于开放度要素,表明围合界面在空间体验中具有更强的视觉吸引力。这种差异可能源于围合界面包含更丰富的设计细节,需要更长的视觉处理时间,且高围合空间限制视线导致反复注视。

### 3 结论

1) 乡村风貌视觉感知设计应以历史文化的传承与活化、视觉焦点的优化以及引发情感共鸣作为核心要点,以此减少乡村同质化和情感失语

现象。其中,在道路空间设计方面,可采用低矮绿植与本土材料营造连贯的视觉路径,强化线性引导与局部围合;边界空间可依托曲线水缘与多层次绿化提升生态氛围与界面层次;节点空间设计应设置地域文化雕塑与小型广场,构筑视觉焦点以增强空间记忆;标志物设计融合文化意象与象征元素,提升空间识别性与视觉显著度。

2) 绿视率、围合度、开放度与视觉可辨性均呈现出“先刺激后饱和”效应:最佳区间分别为绿视率 20%~40%、围合度 50%~60%、开放度 12%~26%和视觉可辨性 10%~31%,超出此范围易引发信息冗余或认知疲劳。

### 参考文献:

[1] ABEYTA A A, JUHL J. Nostalgia restores meaning in

- life for lonely people[J]. *Emotion*, 2023, 23(6): 1791.
- [2] ROSAS H J, SUSSMAN A, SEKELY A C, et al. Using eye tracking to reveal responses to the built environment its constituents[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(21): 12071.
- [3] SU T, WANG K, LI S, et al. Analysis and optimization of landscape preference characteristics of rural public space based on eye-tracking technology: the case of huangshandian village, China[J]. *Sustainability*, 2022, 15(1): 212
- [4] SHI M Q, WANG R L, ZHANG L. Novel insights into rural spatial design: a bio-behavioral study employing tracking and electrocardiography measures [J]. *PLoS ONE*, 2025, 20(5): e0322301.
- [5] REN H G, YANG F, ZHANG J, et al. Evaluation of cognition of rural public space based on eye tracking analysis[J]. *Buildings*, 2024, 14(6): 1525.
- [6] REN H G, ZHANG L, ZHANG J, et al. Exploration of a rural street environment: the difference in sight between gers and tourists[J]. *Sustainability*, 2024, 16(7): 2653.
- [7] 张 静, 李世坤, 黄珉哲. 乡村胡同宽高比的情感舒适度量化研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2025, 42(2): 101-106.
- ZHANG J, LI S K, HUANG M Z. A quantitative study on the emotional comfort degree of the distance-to-height ratio of rural Hutongs[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2025, 42(2): 101-106.
- [8] 张 利. 城市人因工程学:以人为中心、以高品质空间为导向的设计干预新路径[J]. *科学通报*, 2022, 67(16): 1727-1728.
- ZHANG L. Urban ergonomics: a new approach of human-centred, high-quality space design intervention[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(16): 1727-1728.
- [9] GOLDSTEIN E B. *Sensation and perception*[M]. 9th ed. Wadsworth: Cengage Learning, 2014.
- [10] LANG P J, BRADLEY M M, CUTHBERT B N. International affective picture system (IAPS): technical manual and affective ratings[R]. Gainesville: University of Florida, 1997.
- [11] 彭震伟. 小城镇发展与实施乡村振兴战略[J]. *城乡规划*, 2018(1): 11-16.
- PENG Z W. Small towns development and implementation of rural revitalization strategy[J]. *Urban and Planning*, 2018(1): 11-16.
- [12] 张云彬, 廖欣宇, 丁文清, 等. 基于凯文·林奇城市意象的乡村意象内涵探讨与特征研究[J]. *安徽农业大学学报(社会科学版)*, 2018, 27(3): 12-17.
- ZHANG Y B, LIAO X Y, DING W Q, et al. On connotation and features of rural image based on Kevin Lynch's city image concept[J]. *Journal of Anhui Agricultural University(Social Sciences Edition)*, 2018, 27(3): 12-17.
- [13] 李韵琴, 张嘉新, 谢雨辰. 基于 Grad-CAM 的校园街道步行空间视觉感知体验研究[J]. *新建筑*, 2024(6): 18-23.
- LI Y Q, ZHANG J X, XIE Y C. Research on visual perception experience of pedestrian spaces on campus streets based on Grad-CAM[J]. *New Architecture*, 2024(6): 18-23.
- [14] XU X, NIU L. Analysis of influencing factors of green view index based on street view segmentation[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2024, 48: 517-524.
- [15] ALAM M S, CHOWDHURY A I. A machine learning approach towards determining the openness of urban plaza[J]. *FARU Journal*, 2020, 7:67-74.

(责任编辑 王利君)