

基于EEG信号的益于老年人记忆认知的适老化室内设计研究

刘文凯 高欣悦 黄嘉渝 孙欣

华中师范大学, 中国·湖北 武汉 430079

摘要: 世界人口老龄化程度不断加深, 老年人认知功能的退化直接影响其对居住空间的理解与人身安全。为探究多重室内环境要素交互组合如何系统性影响老年人的空间认知负荷, 本研究构建了包含空间句法量化控制任务难度、三维数字场景仿真以及 EEG 即时神经活动采集的综合客观评价框架。研究采用正交试验设计方法, 在三维虚拟环境中选取空间形态、墙面颜色、光源色温及照明亮度等作为实验变量。设计路径记忆与寻物定位双任务, 并同步采集无线脑电信号。行为学与脑电生理数据分析结果共同表明, 在适度认知负荷的情境中, 高色温与异形空间显著提升了老年被试的任务成功率。在神经机制层面, 异形空间能够跨任务稳定地激活与空间记忆相关的后顶叶皮层区域, 有效调动认知资源。然而这种环境要素的支持作用受制于个体认知负荷阈值, 当任务难度过高时, 大部分室内视觉环境设计要素的调节效果将发生显著衰退。本研究证实适度引入异形空间节点作为认知锚点, 能够有效调动老年人神经资源并代偿其空间定向与记忆功能的退化, 从而为未来构建认知友好型的康养与居家环境提供坚实的数据支撑与参考依据。

关键词: 脑电图信号; 适老化室内设计; 空间认知负荷; 空间形态; 正交试验

Research on Age-friendly Interior Design Beneficial to Elderly Memory and Cognition Based on EEG Signals

Liu Wenkai, Gao Xinyue, Huang Jiayu, Sun Xin

Central China Normal University, China Hubei Wuhan 430079

Abstract: The degree of global population aging is continuously deepening, and the decline in cognitive function among the elderly directly affects their understanding of living spaces and personal safety. To explore how the interaction and combination of multiple indoor environmental factors systematically affect the spatial cognitive load of the elderly, this study constructed a comprehensive objective evaluation framework that includes the quantification of spatial syntax to control task difficulty, three-dimensional digital scene simulation, and real-time collection of EEG neural activities. The study adopted an orthogonal experimental design method, selecting spatial form, wall color, light source color temperature, and lighting brightness as experimental variables in a three-dimensional virtual environment. Dual tasks of path memory and object location were designed, and wireless EEG signals were collected simultaneously. The results of behavioral and EEG physiological data analysis jointly indicate that in a moderate cognitive load context, high color temperature and irregular spatial forms significantly increase the task success rate of elderly subjects. At the neural mechanism level, irregular spatial forms can stably activate the posterior parietal cortex region related to spatial memory across tasks, effectively mobilizing cognitive resources. However, the supportive effect of these environmental factors is constrained by individual cognitive load thresholds. When the task difficulty is too high, the regulatory effects of most indoor visual environment design elements will significantly decline. This study confirms that the moderate introduction of irregular spatial nodes as cognitive anchors can effectively mobilize the neural resources of the elderly and compensate for the decline in their spatial orientation and memory functions, thereby providing solid data support and reference basis for the future construction of cognition-friendly health care and home environments.

Keywords: EEG signals; Age-friendly interior design; Spatial cognitive load; Spatial form; Orthogonal experiment

0 引言

随着世界人口老龄化程度的不断加深, 老年人居住环境的适宜性问题已成为建筑学领域亟需回应的重要议题。相较于身体机能衰退等显性问题, 认知功能变化往往具有

隐蔽性, 却直接影响老年人对空间的理解、记忆与使用安全。在空间形态方面, 清晰的几何形态和节点是老年人构建认知地图的核心线索^[1,2], 室内几何变化会直接诱发大脑动态神经活动的改变^[3]。在视觉与光环境方面, 冷暖色彩

能引发特定的心理与行为反应^[4]；高色温（如 6500K）冷白光可抑制褪黑素分泌，显著提高警觉性与执行功能^[5,6]；高亮度和高对比度色彩亦能提升老年人的空间记忆留存率^[7]。然而，真实居住情境中，空间形态常与色彩、照明等多重要素高度耦合。这种交互组合如何系统性影响老年人的空间认知负荷，目前缺乏清晰阐释；且现有方法多依赖主观量表，难以即时、客观地刻画神经资源的动态分配。脑电图因高时间分辨率成为破解此问题的核心手段。在空间认知与记忆的神经机制研究中，后顶叶皮层（Posterior Parietal Cortex, PPC）被广泛证实是参与空间信息编码与认知地图构建的关键枢纽脑区。多项涉及虚拟建筑漫游的脑电实验发现，对应后顶叶区域的 P7、P8 电极在执行空间定向与记忆任务时表现出高度敏感性^[8]。在信号特征层面，Zsuzsanna Fodor 等人（2021）的研究便提取 α 频段（8–12Hz）与 β 频段（13–30Hz）的功率作为衡量认知负荷的关键指标^[9]。前人建立的这些脑电生理指标体系，为本研究客观量化建筑环境要素对老年人空间记忆的直接影响奠定了坚实的方法学基础。

基于此，本研究旨在解决的关键问题是：多重居住环境要素叠加的使用情境下，空间形态的差异以及其他光色要素的交互作用，将如何系统性地影响老年人的即时空间认知负荷？为此，本研究提炼出具有代表性的“直线空间”与“异形空间”两类平面布局类型，并在三维虚拟环境中进行仿真建构。为科学控制变量，采用正交试验设计方法，选取空间形态、墙面色彩、色温及照明亮度等四项要素作为环境变量^[10]。组织认知状态正常的老年人参与实验，通过设置“路径记忆”和“寻物定位”双重任务，综合分析行为表现与后顶叶区域（P7、P8）的脑电信号变化。旨在从建筑空间设计的角度，揭示老年居住空间中环境要素与认知行为之间的映射关系，为认知友好型老年居住空间的设计策略提供有力参考。

1 实验设计

本研究采用正交试验设计，在三维虚拟环境中构建实验场景。选取空间形态（直线与异形）、墙面颜色（浅蓝色 RGB: R173 G216 B230 与米黄色 RGB: R245 G222 B179）、光源色温（2700K 与 6500K）及照明亮度（1000lm 与 2000lm）四项核心变量，将空间形态、墙面颜色、光源色温与照明亮度四个因素及其对应水平映射至正交表的行列结构中，最终形成 8 组虚拟居住空间实验场景，各实验场景的变量配置（图 1）。其中，颜色与光环境参数的设定充分参考了前人关于色彩心理学及光照生理特征

的研究基础。依托上述场景，实验设置了“路径记忆”与“寻物定位”双任务。并且，为消除直线与异形空间底层物理形态的固有干扰，研究引入空间句法理论中的深度值与步深指标，对路径节点与物品放置点进行参数互补与标准化设计，以确保两类空间形态下任务认知难度的客观对等与实验结果的可比性。本研究采取抽样法确定被试对象，抽取中国河南省洛阳市岳村 28 名老年人作为被试对象。预实验中老年群体操作数字设备存在困难，正式实验全程采用被试口头指引、研究员代为操作的模式。整体流程遵循渐进式原则，被试依次完成环境熟悉、由易到难的路径记忆任务和限时 8 分钟的自由寻物任务，各测试阶段间均穿插静默休息，以规避疲劳效应产生的数据干扰。任务全程使用 EMOTIV EPOC X EEG Headset 无线脑电图耳机设备同步采集被试脑电信号。连续信号依据反应时间动态分段。脑电数据经滤波、去眼动伪迹等预处理后，将重参考设定为对应后顶叶皮层的 P7 与 P8 电极平均电位，以精准捕捉与空间认知加工高度相关的神经活动。

实验号	颜色(RGB值)	色温(K)	亮度(lm)	空间形态
1	浅蓝色(R173 G216 B230)	2700	1000	直线空间
2	浅蓝色(R173 G216 B230)	2700	2000	异形空间
3	浅蓝色(R173 G216 B230)	6500	1000	异形空间
4	浅蓝色(R173 G216 B230)	6500	2000	直线空间
5	米黄色(R245 G222 B179)	2700	1000	异形空间
6	米黄色(R245 G222 B179)	2700	2000	直线空间
7	米黄色(R245 G222 B179)	6500	1000	直线空间
8	米黄色(R245 G222 B179)	6500	2000	异形空间

图1 正交试验表（图片来源：作者自绘）

2 实验分析

2.1 行为表现数据分析

本研究借助 SPSS 软件，通过多因素方差分析与独立样本 t 检验，系统探讨了室内环境因素（颜色、色温、亮度及空间形态）对老年人在寻物与路径记忆任务中认知表现的影响规律，并验证了实验难度划分的有效性。

在寻物任务中，整体环境因素的解释力达到 29.9%（ $R^2=0.299$ ）。数据表明，高色温（均值 0.66）与异形空间（均值 0.75）条件下的寻物成功率显著优于低色温（均值 0.34）与直线空间（均值 0.32），差异均达到显著水平（ $p<0.05$ ）。相比之下，颜色与照明亮度对寻物任务成功率的影响并未达到显著水平（ $p>0.05$ ），说明在自由寻物情境下，这两类视觉因素对认知绩效的作用相对有限。

在路径记忆任务中，任务难度成为了调节环境效应的关键变量。针对简单路线（任务一）的分析表明，环境因素对正确率的变异解释量为 11.5%（ $R^2=0.115$ ），且

仅有空间形态表现出显著的促进作用 ($p < 0.05$)，其中异形空间的正确率 (0.88) 明显优于直线空间 (0.70)。然而，在困难路线 (任务二) 条件下，模型解释力降至 4.7% ($R^2 = 0.047$)，所有环境因素的调节作用均不再显著 ($p > 0.05$)。这表明当认知负荷过高时，空间与光环境要素的调节作用会明显减弱。为验证难度分级的有效性，独立样本 t 检验确认了简单路线 (均值 0.79) 与困难路线 (均值 0.64) 在记忆正确率上存在显著差异 ($t = 2.823$, $p = 0.006$)。特别是在异形空间内，不同难度导致的正确率差异尤为突出，达到 0.01 显著性水平 ($t = 3.198$, $p = 0.002$)。而在直线空间中，虽然简单路线的成功率 (0.70) 高于困难路线 (0.60)，但差异并未达到统计学显著水平 ($t = 1.186$, $p = 0.241$)。

2.2 脑电生理数据分析

脑电生理数据的深层分析与行为学结果高度契合，共同证实了空间形态对老年人认知加工过程的显著神经诱发效应。

在困难模式的路径记忆任务中，对后顶叶 P7 通道的方差分析显示，仅空间形态具有显著主效应 ($F = 4.21$, $p = 0.046$)，而墙面颜色、色温及亮度均不显著 ($p > 0.05$)。这证明了在高难度情境下，空间形态是调节神经活动强度的核心要素。量化检验进一步指出，异形空间在 P7 通道诱发的脑电功率 (4.07 ± 0.39) 显著高于直线空间 (3.50 ± 0.65)，达到统计学显著水平 ($t = -2.12$, $p = 0.041$)，说明异形空间能更强地激活与空间记忆相关的后顶叶皮层。

此外，在寻物任务中，后顶叶 P8 通道的脑电功率同样呈现出空间形态的显著主效应 ($F = 4.21$, $p = 0.046$)，且该过程不受性别及其他视觉环境因素的影响 ($p > 0.05$)，体现出空间形态跨任务类型的稳定神经诱发特征。

2.3 数据总体分析

统计结果验证了实验路线难度划分的合理性，即简单路线的整体正确率显著高于困难路线。研究表明，室内环境要素对老年人认知表现的影响高度依赖于任务难度。在相对简单或自由度较高的情境中，物理环境要素展现出积极的促进效用。具体而言，高色温 (6500K) 与异形空间显著提升了寻物任务的成功率 ($p < 0.05$)，而异形空间在简单路径记忆任务中的正确率也明显优于直线空间；相比之下，颜色与亮度等因素的影响则不显著。

在神经机制层面，空间形态对认知加工的诱发作用表现出了跨任务类型的稳定性。相较于线索相对匮乏的直线

空间，异形空间能够提供独特的空间几何线索，从而更显著地激活后顶叶皮层区域，有效调动与认知地图构建相关的神经资源。本质上，这种由异形空间引发的适度认知负荷属于一种“有效加工投入”，它成功激活了老年人深层的关联记忆系统，使得其在行为表现上优于直线空间。然而，环境要素的代偿与支持作用受制于个体的认知负荷阈值。在困难路径记忆任务中，当任务难度增加导致认知负荷突破一定阈值时，所有环境因素的显著性影响均随之消失。这说明在面临过高认知负荷的情境下，大部分室内视觉环境设计要素的调节效果将发生显著衰退。

3 结语

本研究立足于建筑学与认知神经科学的交叉领域，在理论与方法上进行了一定创新，打破试图既往聚焦单一物理变量与依赖主观问卷评价的情况，构建了“空间句法量化控制任务难度——三维数字场景仿真——EEG 即时神经活动采集”的综合客观评价框架，揭示多环境要素动态耦合下的“阈值效应”与“任务特异性”，证实适度引入异形空间节点作为认知锚点能够有效调动老年人后顶叶区域的神经资源，代偿其空间定向与记忆功能的隐性退化。但仍存在样本规模较小且来源单一、14 导联便携式 EEG 设备分辨率不足，以及非具身性的被动导航模式限制了实验生态效度等局限性，未来仍需扩大并丰富样本群体，引入高密度脑电设备或采用沉浸式 VR 或真实空间实验以提升实践转化价值，力求从神经科学的客观视角，为未来构建认知友好型、差异化配置的康养建筑与居家环境提供具有坚实数据支撑与指导意义的实践导则。

参考文献：

- [1] Sheynikhovich D, Alkachroum M, Arleo A, et al. Landmarks and environmental geometry in spatial navigation: insights for architecture in the context of human aging[J]. Architectural Science Review, 2025, 68(5): 1-15.
- [2] Marquardt G. Wayfinding for people with dementia: A review of the role of architectural design[J]. HERD: Health Environments Research & Design Journal, 2011, 4(2): 75-90.
- [3] Banaei M, Hatami J, Yazdanfar A, et al. Walking through architectural spaces: The impact of interior forms on human brain dynamics[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2017, 11: 477.
- [4] Elliot A J, Maier M A. Color psychology: Effects of perceiving color on psychological functioning in humans[J]. Annual Review of Psychology, 2014, 65: 95-120.

[5] West K E, Jablonski M R, Warfield B, et al. Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2011, 110(3): 619-626.

[6] Chellappa S L, Steiner R, Blattner P, et al. Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: Can blue-enriched light keep us alert?[J]. *PLoS One*, 2011, 6(1): e16429.

[7] Cernin P A, Keller B K, Stoner J A. Color vision in Alzheimer's patients: can we improve object recognition with color?[J]. *Clinics in Geriatric Medicine*, 2003, 19(3): 533-545.

[8] Vecchiato G, Tieri G, Jelic A, et al. Electroencephalographic correlates of sensorimotor integration and

embodiment during the appreciation of virtual architectural environments[J]. *Frontiers in Psychology*, 2015, 6: 1944.

[9] Fodor Z, et al. EEG alpha and beta band functional connectivity and network structure mark hub overload in mild cognitive impairment during memory maintenance[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2021, 13: 680200.

[10] Li A, et al. Relative importance of certain factors affecting the thermal environment in subway stations based on field and orthogonal experiments[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 56: 102107.

基金项目：华中师范大学大学生创新创业训练计划项目资助(202410511075)。