



林业科学
Scientia Silvae Sinicae
ISSN 1001-7488,CN 11-1908/S

《林业科学》网络首发论文

题目：木质环境的视触觉短时交互对人体心理和生理恢复的影响
作者：马盼盼，方曼钰，谢天竣，谢锦秋，肖鹏，王菲彬，五十田博，阙泽利
收稿日期：2026-01-16
网络首发日期：2026-08-21
引用格式：马盼盼，方曼钰，谢天竣，谢锦秋，肖鹏，王菲彬，五十田博，阙泽利. 木质环境的视触觉短时交互对人体心理和生理恢复的影响[J/OL]. 林业科学. <https://link.cnki.net/urlid/11.1908.S.20260821.1133.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11707/j.1001-7488.LYKX20260031

木质环境的视触觉短时交互对人体心理和生理恢复的影响

马盼盼^{1,3} 方曼钰¹ 谢天竣¹ 谢锦秋¹ 肖鹏¹ 王菲彬² 五十田博³ 阙泽利^{1*}

(1.南京林业大学材料科学与工程学院 南京 210037; 2.南京林业大学风景园林学院 南京 210037; 3.京都大学生存圈研究所 宇治 611-0011)

摘要:【目的】探究材料感官特征对人体心理和生理恢复的影响,分析环境主观印象和舒适度感知在恢复过程中的调节作用,为理解真实室内环境中恢复效应的形成机制提供实证支持,并为亲生物建筑中木质材料的科学选用和设计应用提供理论依据与实践参考。【方法】以涂饰和未涂饰的杉木墙板作为视觉刺激、杉木板和浸渍纸贴面刨花板作为触觉刺激,构建3种在舒适度感知上存在明显差异的视触觉环境,并设置由乳胶漆墙面和瓷砖组成的对照环境。招募64名参与者,记录其完成认知任务后的心电和皮肤电信号,采用状态-焦虑量表、主观活力量表和恢复结果量表评估心理恢复水平,通过李克特量表获取环境感知评价。应用方差分析、非参数检验和Spearman秩相关分析比较不同环境条件下的身心反应差异,并检验生理指标与主观评价之间的相关关系。【结果】与对照环境相比,木质环境的视触觉短时交互显著增强副交感神经活动,心率变异性的低频成分(LF)和相邻正常窦性心搏间期差值的均方根(RMSSD)均较基线期升高,且幅值显著大于对照环境($P<0.05$)。墙面涂饰引起的光泽度差异未导致显著生理变化($P>0.05$)。触摸浸渍纸贴面刨花板显著降低皮肤电导水平(SCL)($P<0.05$),但未显著影响环境自然感评价($P>0.05$)。心理恢复指标与自然感、舒适度和喜好度评价呈正相关($P<0.05$),HF和RMSSD升高亦与自然感和喜好度评价显著相关($P<0.05$)。【结论】真实木质环境的视触觉短时交互可促进认知任务后的心理和自主神经恢复,其效应不仅与材料的感官属性相关,还受个体对环境整体舒适度和印象的主观感知调节。同时,自主神经的变化具有感官特异性特征,视觉刺激增强副交感神经活动,触觉刺激调节皮肤交感神经活性,提示恢复效应并非仅由自然感知驱动,而是由视觉诱导的心理放松和触觉介导的生理调节协同塑造。

关键词: 木质环境; 视触觉交互; 心理恢复; 自主神经; 杉木

中图分类号: S781

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488(2026)00-0000-00

Effect of Short-Term Visual-Tactile Interaction with Wooden Environments on Psychological and Physiological Restoration in Humans

Ma Panpan^{1,3} Fang Manyu¹ Xie Tianjun¹ Xie Jinqiu¹ Xiao Peng¹ Wang Feibin² Isoda Hiroshi³ Que Zeli¹

(1.College of Material Science and Engineering, Nanjing Forestry University Nanjing 210037; 2.College of Landscape and Architecture, Nanjing Forestry University Nanjing 210037; 3.Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Uji 611-0011)

Abstract:【Objective】This study examined how material sensory properties contribute to psychological and physiological restoration in indoor environments, focusing on how sensory differences shape comfort-mediated restorative pathways. The aim was to clarify restoration mechanisms in real settings and provide evidence-based implications for the use of wood in biophilic architecture.

【Method】Visual stimuli comprised coated and uncoated Chinese fir wall panels, while tactile stimuli included solid Chinese fir board and melamine-impregnated paper-overlaid particleboard. Three visual-tactile wooden environments differing in perceived comfort were constructed, together with a control condition using latex-painted walls and ceramic tiles. Sixty-four university students performed a cognitive fatigue-inducing task in each condition, and post-task physiological responses were recorded using electrocardiography (ECG) and electrodermal activity (EDA). Psychological restoration was assessed with the state-trait anxiety inventory-6 (STAI-6), subjective vitality scale (SVS), and restoration outcome scale (ROS). Environmental perceptions were rated on Likert scales. Group differences were tested using ANOVA and non-parametric methods, and associations between physiological indices and subjective ratings were examined using Spearman's correlations. 【Result】Relative to the control, brief exposure to wooden environments significantly enhanced post-task parasympathetic activity, as indicated by increased high-frequency power (HF) and root mean square of successive differences (RMSSD) ($P<0.05$). Surface gloss differences induced by coating produced no significant physiological effects ($P>0.05$). Tactile contact with melamine-overlaid particleboard significantly reduced skin

收稿日期: 2026-01-16; 修回日期: 2026-03-21。

基金项目: 江苏省研究生科研创新计划“木质材料环境学特性的多感官交互与协同感知研究”(KYCX25_1416)。

*阙泽利为通信作者。E-mail: zeliq@njfu.edu.cn。

conductance level (SCL) ($P<0.05$), despite no corresponding change in perceived naturalness ($P>0.05$). Psychological restoration scores were positively associated with perceived naturalness, comfort, and preference ($P<0.05$). Increases in HF and RMSSD were also correlated with higher naturalness and preference ratings ($P<0.05$). 【Conclusion】 Short-term interaction with wooden visual-tactile environments effectively facilitates psychological and autonomic recovery following cognitive effort. Visual exposure to real wood primarily supports parasympathetic restoration, whereas comfortable tactile contact-even when artificial-modulates sympathetic activity without undermining perceived visual naturalness. These findings suggest that restorative effects arise from a synergistic integration of visually mediated psychological relaxation and tactile-mediated physiological modulation, rather than from a single dimension of perceived naturalness.

Key words: wooden environment; visual-tactile interaction; psychological restoration; autonomic nervous system; Chinese fir

在城市生活节奏日益加快的当代社会，青年群体正承受着不断加剧的学业和职业压力（Chen *et al.*, 2025a），长期心理负荷不仅易诱发焦虑等心理问题，还可能导致自主神经系统（autonomic nervous system, ANS）功能失调，进而引发消化功能紊乱、睡眠障碍等生理不适（Sheth *et al.*, 2017）。已有研究表明，森林浴（shinrin-yoku）等自然环境暴露可通过增强副交感神经（parasympathetic nervous system, PNS）活动、抑制交感神经（sympathetic nervous system, SNS）唤醒，促进身心恢复，有助于维持 ANS 的动态平衡（Queirolo *et al.*, 2024）。然而，在现代城市生活中，人们约有 90% 的时间处于室内环境中，单纯依赖户外自然暴露难以满足日常恢复需求。因此，如何将自然环境的恢复效应引入室内空间，构建具备日常调节功能的恢复性室内环境，已成为当前建筑学和公共卫生领域的重要研究方向。

木材作为一种广泛应用的天然建筑材料，在视觉和触觉层面具有独特的感知特性。相较于金属、混凝土和砖石等无机材料，木材在视觉上呈现更温润的色调和连续的纹理特征（张悦等，2022），在触觉上则因较低的导热系数给人以柔和、温暖的主观体验（Ikei *et al.*, 2017）。已有研究表明，接触木质环境能够有效降低血压和心率，提高心率变异性水平，并在一定程度上缓解压力、改善情绪状态（Tsunetsugu *et al.*, 2017），说明木材的恢复效应既可体现为主观心理状态的改善，也可表现为自主神经相关生理反应的调节。具体而言，木材纹理和自然色调带来的视觉体验往往伴随副交感神经活动增强等生理放松反应（Ikei *et al.*, 2020）；而与金属材料相比，触摸木材表面呈现出较低的皮肤电导水平，提示其引发的交感神经激活和生理唤醒水平相对更低（Tsunetsugu *et al.*, 2021）。然而，当前研究大多聚焦于单一感官条件下木材的恢复效应，对于真实使用情境中视触觉信息交互作用的探讨仍显不足，相关机制仍有待深入研究（Nakanishi *et al.*, 2024）。

自主神经系统活动受双重路径调控，既包括源于皮肤、内脏等外周刺激的“自下而上”路径，也包含由心理活动驱动大脑皮层进行中枢调节的“自上而下”路径（Taylor *et al.*, 2010），这一双重机制提示，环境的恢复效应不仅取决于材料物理属性引发的直接感官刺激，还受控于个体对环境整体印象和舒适度的主观评价，二者共同塑造最终的生理和心理响应。然而，现有研究多聚焦于材料属性或单一感官通道的输入效应，强调其对自主神经系统的直接生理影响，而对环境整体评价和个体认知判断在恢复过程中所起的调节作用关注尚不充分，且缺乏将二者纳入统一框架进行整合分析的尝试。此外，尽管虚拟现实技术已在环境感知研究中得到广泛应用，但其在生态效度方面仍存在明显局限，难以精确还原真实环境中人与材料交互过程中的细微差异（Personeni *et al.*, 2023）。

基于以上研究现状与局限，本研究提出以下假设：1）相较于人工材料环境，真实木质视触觉环境更有利于促进个体在认知任务后的心理和生理恢复；2）恢复效应呈现感官通道特异性，即视觉刺激主要通过“自上而下”的认知加工路径（如自然性感知）调节副交感神经活性，而触觉刺激则主要通过“自下而

上”的体感传入（如物理舒适度）直接调控皮肤交感神经活动；3）个体对环境的主观印象和舒适度感知在恢复过程中发挥着重要的调节作用。

为验证上述假设，本研究通过前期感官评价实验，筛选出在自然感、舒适度等维度上具有明显差异的真实材料组合，据此构建不同的视触觉交互环境，以 20~26 岁的青年群体为研究对象，模拟其日常短时休息场景，系统考察不同视触觉环境对其心理状态和自主神经功能的影响，揭示材料感官特征和主观环境评价在视触觉交互恢复机制中的协同作用，以期为理解真实室内环境中恢复效应的形成机制提供实证支持，并为亲生物建筑中木质材料的科学选用和设计应用提供理论依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 参与对象

本研究通过线上平台招募 64 名参与者，其中男性 30 名、女性 34 名，平均年龄 21.27 ± 1.47 岁。所有参与者均具有正常视力（或经矫正后可达正常视力），惯用手为右手，且无木材或木质材料过敏史。

1.2 实验材料

前期研究表明，木质材料的光泽度和表面粗糙度对其视觉和触觉感知具有显著影响（Ma *et al.*, 2026）。本研究以视觉光泽度和触觉粗糙度为变量设置视触觉刺激条件，并将白乳胶漆墙面与瓷砖的组合作为对照组纳入实验设计，通过对条件进行预筛选（见附录），最终确定 4 种实验条件，如表 1 所示。

表 1 各组视触觉刺激设置

Tab.1 Experimental conditions for each test group

组别 Group	视觉刺激 Visual stimulus	光泽度 Glossiness (GU)	触觉刺激 Tactile stimulus	粗糙度 Roughness (R_a)/ μm	
				顺纹 Parallel-grain	横纹 R_a Cross-grain
VU-TF ($n=16$)	杉木墙面（未涂饰）Uncoated fir wall	6.4	杉木 Chinese fir board	3.23	9.57
VC-TF ($n=16$)	杉木墙面（涂饰）Coated fir wall	51.12	杉木 Chinese fir board	3.23	9.57
VC-TP ($n=16$)	杉木墙面（涂饰）Coated fir wall	51.12	浸渍纸贴面刨花板 Paper-overlaid particleboard	1.31	5.48
VL-TT ($n=16$)	白乳胶漆墙面 Latex-painted wall	2.1	瓷砖 Tile	0.57	

实验材料如图 1 所示。杉木墙板采用无节、无开裂、无变形、无腐朽等缺陷的杉木（*Cunninghamia lanceolata*）制作，该树种为我国南方常用建筑和装饰用材。选取 6 块产自江西省的杉木板，单块规格为 200 mm（宽） $\times$ 20 mm（厚） $\times$ 1 500 mm（长），拼接组装为幅面 1 200 mm（宽） $\times$ 1 500 mm（高）的木质墙面。墙面一侧采用清漆涂饰，均匀涂刷 2 遍，每遍涂刷量控制在 $80 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，间隔 24 h，涂饰后置于室温通风环境下干燥 72 h，确保漆膜完全固化。墙面另一侧保持无涂饰状态。参照《色漆和清漆 20°、60°和 85°光泽的测定》（GB/T 9754—2025）要求，采用镜面光泽度计（LS197，深圳市林上科技有限公司，中国）在 60°几何条件下，于墙面中心及四角共设置 5 个测点进行光泽度测定。触觉刺激用杉木板和浸渍纸贴面刨花板同样无缺陷，尺寸为 400 mm（长） $\times$ 90 mm（宽） $\times$ 18 mm（厚）。实验前，所有材料均于室温通风环境下自然放置 60 天，以消除可能残留的气味，并使含水率趋于平衡。

1.3 实验流程

实验在南京林业大学材料科学与工程学院木结构实验室进行。实验前保持实验室充分通风，参照《民用建筑室内空气气味评价方法标准》（T/CECS 1357—2023），采用 6 级气味强度量表对背景气味进行主观感官评价，仅当气味强度被评定为“无气味”时开始实验，以确保背景气味的潜在干扰控制在可接受范围内。实验全程通过人工调控维持室内环境稳定（温度 $22 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $50\% \pm 10\%$ ），并由电子温湿度计持续监测与记录实时温湿度数据。

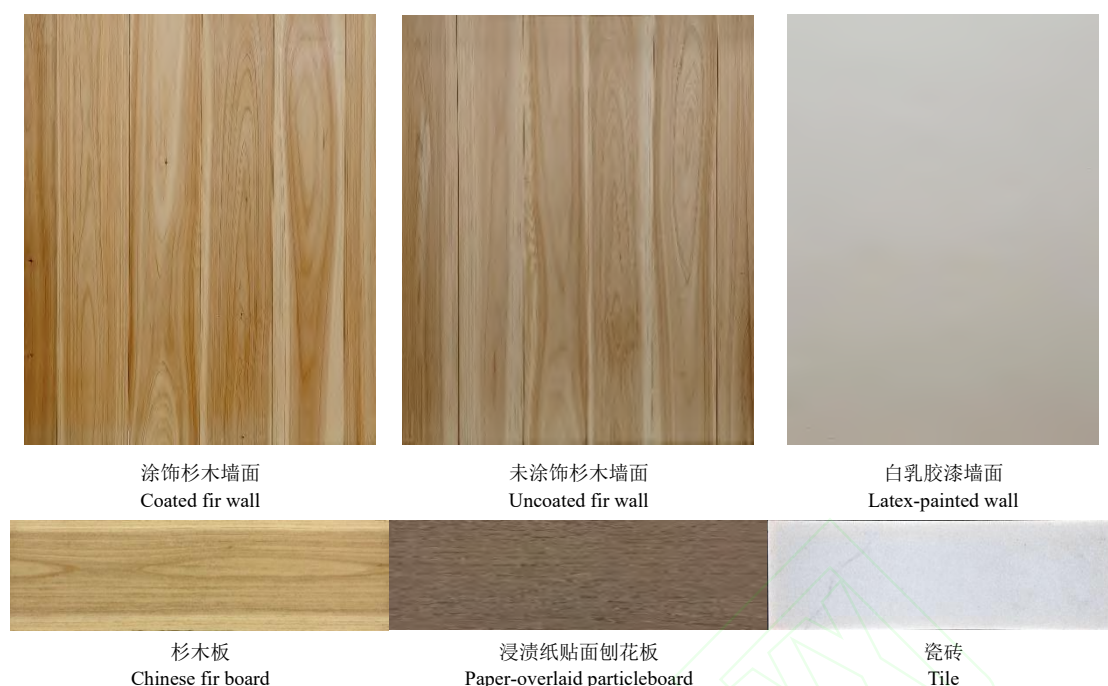


图1 实验材料

Fig.1 Materials used in this study

实验开始，参与者进入实验室，听取实验流程的相关说明并签署知情同意书。填写基本信息问卷后，在实验人员协助下佩戴心电图（electrocardiogram, ECG）、皮肤电（electrodermal activity, EDA）传感器和臂式血压计。参与者佩戴电生理检测设备后的状态如图2所示。

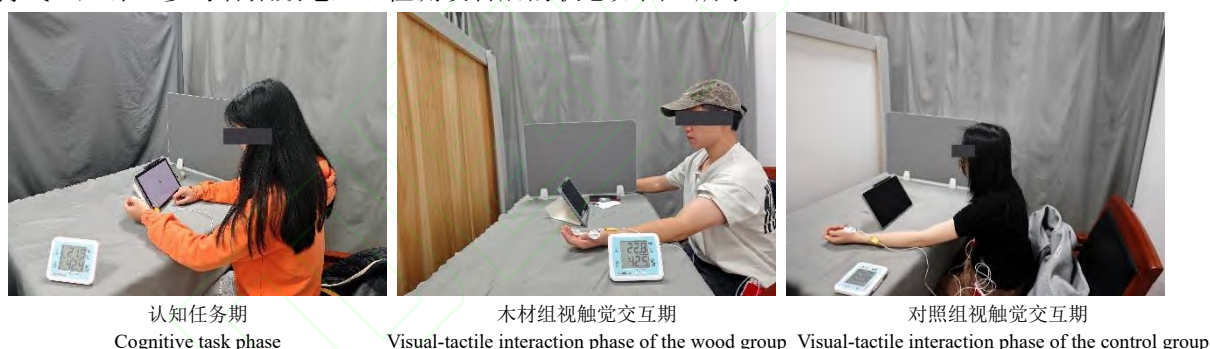


图2 实验布置及过程

Fig.2 Experimental setup and procedure

准备阶段结束后，参与者进入 180 s 静息阶段，以稳定生理状态。静息结束采集前测生理数据：先通过臂式血压计测量 1 次血压，后连续采集 330 s 的 ECG 和 EDA 信号。基线测量完毕，参与者完成 Stroop 色词干扰任务，任务参数设置为：使用 6 种颜色，一致试次比例为 0.2，试次间隔为 0.5 s，练习阶段时长 30 s，正式测试 300 s。Stroop 任务结束后立即进入操作广度任务（operation span task, OSPAN），集合大小设为 3~7，并设置一个集合大小为 3 的练习阶段，2 项任务总耗时约 660 s。任务全部完成后，再次测量血压，并填写中文版简版特质-状态焦虑量表（state-trait anxiety inventory-6, STAI-6）、主观活力量表（subjective vitality scale, SVS）和压力视觉模拟量表（visual analog scale, VAS）。问卷填写完毕，实验人员移除遮挡木质墙面的灰布，参与者进入视触觉联合刺激恢复阶段，持续 600 s。恢复阶段结束后采集后测数据，包括血压测量，填写 STAI-6 量表、SVS 量表以及恢复结果量表（restoration outcome scale, ROS）和感官评价量表；量表填写完成后，重复进行 Stroop 和操作广度任务。完整实验流程如图3所示。

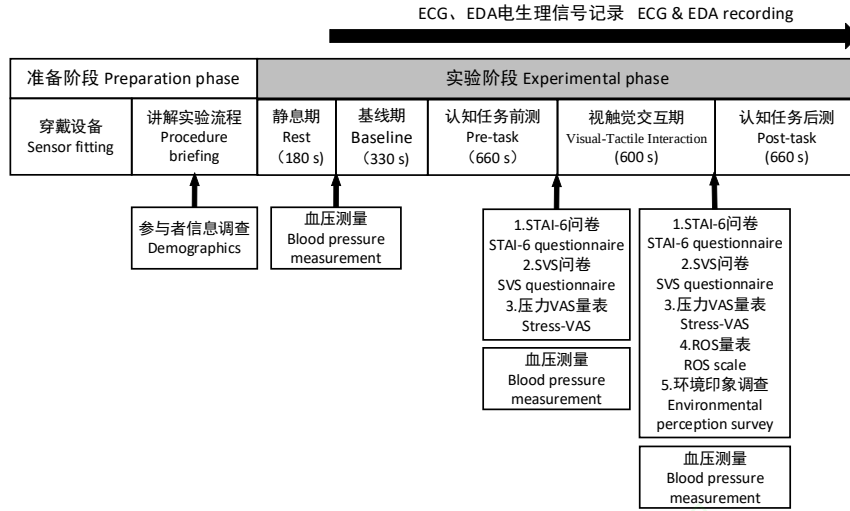


图3 实验流程示意

Fig.3 Schematic diagram of the experimental procedure

1.4 生理指标测量

利用心电传感器（BITalino HearBIT, PLUX Biosignals, Portugal）采集每位参与者的 ECG 数据，采样率为 1 kHz，采用 II 导联方式连接。原始数据在 Python 3.9 中使用 NeuroKit2（Makowski *et al.*, 2021）进行预处理，并根据 R-R 间期计算心率变异性（heart rate variability, HRV）。HRV 分析包括频域和时域 2 个维度。频域分析采用 Welch 法估算功率谱密度，提取高频（HF）以及低频/高频比值（LF/HF），HF 反映副交感神经活动水平，LF/HF 用于表征交感-副交感神经系统的相对平衡。时域分析提取正常窦性心搏间期标准差（standard deviation of normal-to-normal intervals, SDNN）和相邻正常窦性心搏间期差值的均方根（root mean square of successive differences, RMSSD），分别反映整体自主神经调节水平和副交感神经活动（Laborde *et al.*, 2017）。HF 和 LF/HF 常呈偏态分布，统计分析前对其进行自然对数转换。

基线期和恢复期 ECG 记录时长分别为 330 和 600 s。为提高数据稳定性，基线期选取后 300 s 作为分析窗口；考虑到恢复初期自主神经活动可能处于快速波动和调整阶段，选取恢复期中间 300 s 进行分析，以比较不同条件下相对稳定恢复状态的差异。该时长满足欧洲心脏病学会和北美起搏与电生理学会联合工作组关于时域和频域分析的时间要求（Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, 1996）。最终计算各 HRV 指标恢复期相对于基线期的差值，用于评价生理恢复效果。

利用皮肤电传感器（BITalino EDA sensor, PLUX Biosignals, Portugal）采集每位参与者的 EDA 数据，采样率为 1 kHz，电极贴附于参与者左手掌的大鱼际和小鱼际区域。原始数据同样使用 NeuroKit2 进行预处理，提取快速变化成份（phasic）和缓慢变化成分（tonic），分别用于计算皮肤电导反应（skin conductance response, SCR）和皮肤电导水平（skin conductance level, SCL），SCR 反映参与者对瞬时刺激的短期反应，SCL 代表整体生理唤醒水平。EDA 记录时长和窗口划分与 ECG 一致。此外，为考察 SCL 的全局变化趋势，将全程 EDA 信号划分为多个 60 s 短时窗口，并计算每个窗口的 SCL 均值。

1.5 心理指标测量

通过语义差异量表法（semantic differential, SD）和室内环境恢复性特征量表中的延展感分量表（indoor restorative characteristic scale-extent, IRCS-Extent）（Shibata *et al.*, 2024）评估参与者对视触觉刺激的主观感知印象，其中，SD 法采用 7 分李克特量表形式，以含义相反的形容词对记录参与者的主观评分。基于

前期实验 (Ma *et al.*, 2026), 并参考京都大学 Nakamura 等 (2022) 的相关研究选取 4 组形容词对 (表 2)。

表 2 语义差异量表法所用双极形容词对

Tab.2 Bipolar adjective pairs used in the semantic differential scale				
评价维度	自然联想度	舒适度	喜好度	稀有度
Evaluation dimension	Natural association	Comfort	Preference	Rarity
形容词对	不能联想到自然环境-能联想到自然环境	不舒服-舒服	讨厌-喜欢	常见-稀有
Adjective pair	Cannot associate with natural environment - Can associate with natural environment	Uncomfortable-Comfortable	Dislike-Like	Common-Rare

为诱发认知疲劳, 采用 Stroop 和操作广度任务作为认知任务, 分别评估疲劳诱发对抑制控制能力的损害程度 (Habay *et al.*, 2026; Wu *et al.*, 2025) 以及认知疲劳对多任务资源分配和存储能力的损害 (Wereszczyński *et al.*, 2025; Westfield, 2024)。此外, 采用 STAI-6 (Marteau *et al.*, 1992)、SVS (Ryan *et al.*, 1997)、ROS (Du *et al.*, 2022)、压力 VAS (Lesage *et al.*, 2011) 对参与者的主观恢复状态进行测量, 分别从状态焦虑、主观活力、恢复结果和压力水平 4 方面反映实验前后的心理变化。

本研究所用心理、生理相关评价测量指标汇总如表 3 所示。

表 3 心理、生理测量指标汇总

Tab.3 Summary of psychological and physiological measures		
类别 Category	指标 Index	表征 Characterization
心率变异性 Heart Rate Variability (HRV)	HF	副交感神经活动水平 Parasympathetic nervous activity level
	LF/HF	交感-副交感神经相对平衡 Sympathetic-parasympathetic balance ratio
	SDNN	整体自主神经调节水平 Overall autonomic regulatory capacity
	RMSSD	副交感神经活动水平 Parasympathetic nervous activity level
皮肤电活动 Electrodermal Activity (EDA)	SCL	交感神经基础唤醒水平 Sympathetic basal arousal level
	SCR	瞬时刺激诱发的交感神经反应 Transient stimulus-induced sympathetic response
环境感官评价 Environmental sensory evaluation	SD	环境印象评价 Environmental impression evaluation
	IRCS-Extent	环境主观延展感评价 Subjective environmental spaciousness perception
认知疲劳诱发 Cognitive fatigue induction	Stroop	抑制控制能力 Inhibitory control ability
	OSPAN	工作记忆容量 Working memory capacity
恢复状态评价 Restorative state evaluation	STAI-6	状态焦虑水平 State anxiety level
	SVS	主观活力水平 Subjective vitality level
	ROS	恢复结果 Restorative outcome
	VAS	主观压力水平 Subjective stress level

1.6 统计分析

通过 Python 3.9 编程语言及其统计库进行数据统计分析, 以检验各条件引发的反应差异是否具有统计学显著性。对于生理指标, 首先计算各组恢复期与基线期的生理指标差值, 然后通过 Shapiro-Wilk 检验验证各组差值的正态性。对于满足正态分布的数据, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检验视触觉刺激条件的主效应; 若主效应显著, 则进一步通过 LSD 法进行事后检验。对于不满足正态分布的数据, 采用 Kruskal-Wallis 非参数检验考察主效应, 并进行全部成对多重比较。心理指标同样采用 Kruskal-Wallis 非参

数检验考察主效应，若主效应显著，则进行全部成对比较，并采用 Holm 法校正多重比较的 P 值。此外，通过 Spearman 秩相关分析分析检验各指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 生理指标结果

2.1.1 HRV 频域结果 LF/HF 比率反映交感神经与副交感神经活动的平衡性。由图 4 可知，各组 $\Delta\ln(\text{LF}/\text{HF})$ 的均值±标准误分别为 VC-TF=0.19±0.15、VU-TF=0.14±0.14、VC-TP=0.06±0.14、VL-TT=0.22±0.17，相较于基线阶段，各组 $\Delta\ln(\text{LF}/\text{HF})$ 均有小幅上升，说明自主神经平衡略微偏向交感主导。通过 Shapiro-Wilk 正态性检验和 Levene 方差齐性检验，4 组数据均符合正态分布 ($P>0.05$)，且方差齐次 ($P>0.05$)。进一步进行单因素方差分析，环境条件的主效应不显著 ($F=0.213$, $P=0.887$)。尽管 VC-TP 组 $\Delta\ln(\text{LF}/\text{HF})$ 均值低于其他组，但差异未达统计显著水平，表明不同实验条件对交感与副交感神经的整体平衡无显著影响。

HF 功率反映副交感神经活动水平。由图 5 可知，各组 $\Delta\ln(\text{HF})$ 的均值±标准误分别为 VC-TF=0.41±0.12、VU-TF=0.28±0.11、VC-TP=0.34±0.12、VL-TT=0.00±0.12，说明与木质材料视触觉交互可提高 HF 功率，增强副交感神经活动，促进生理放松。通过 Shapiro-Wilk 正态性检验和 Levene 方差齐性检验，4 组数据均符合正态分布 ($P>0.05$)，且方差齐次 ($P>0.05$)。进一步进行单因素方差分析，环境条件主效应呈边缘显著 ($F=2.374$, $P=0.079$)，具有中等效应量 ($\eta^2=0.106$)。鉴于此，继续进行 Fisher's LSD 事后两两比较，VC-TF 组和 VC-TP 组与 VL-TT 组的差异均达到统计显著水平 ($P<0.05$)，VU-TF 组与 VL-TT 组的差异在 0.1 水平下显著 ($P=0.091$)。此外，3 个木材组之间均无显著差异 ($P>0.05$)。具体而言，VC-TF 组与 VU-TF 组无显著差异 ($P=0.44$)，表明杉木无论是否涂饰，与白乳胶漆视觉刺激相比均显示出相似的副交感神经活性增强趋势；VC-TF 组与 VC-TP 组无显著差异 ($P=0.66$)，表明触觉刺激是否为真实木质材料不影响整体副交感神经活性变化。

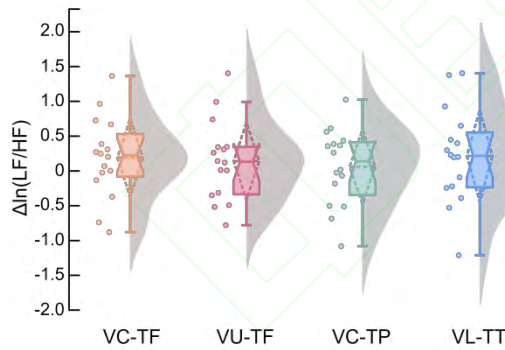


图 4 各组 $\Delta\ln(\text{LF}/\text{HF})$

Fig.4 $\Delta\ln(\text{LF}/\text{HF})$ among different groups

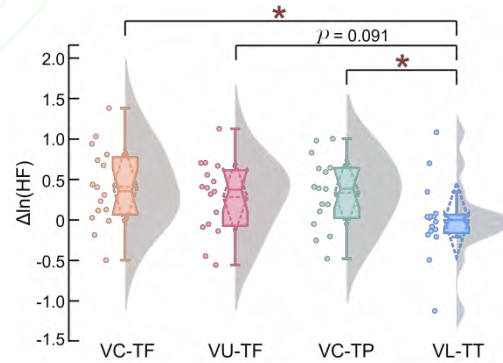


图 5 各组 $\Delta\ln(\text{HF})$

Fig.5 $\Delta\ln(\text{HF})$ among different groups

*: $P<0.05$.

2.1.2 HRV 时域结果 SDNN 反映整体自主神经调节水平。由图 6 可知，恢复期各组 SDNN 较基线期均有 0~20 ms 提升，各组 ΔSDNN 的均值±标准误分别为 VC-TF=8.49±2.14、VU-TF=5.20±4.16、VC-TP=4.39±1.65、VL-TT=4.32±3.37 ms。验证各组数据分布的正态性和方差齐次后，单因素方差分析显示，环境条件的主效应不显著 ($F=0.429$, $P=0.733$)，各组间的 ΔSDNN 无显著差异。

RMSSD 与 HF 相同，被视为反映副交感神经尤其是迷走神经对心率调节的快速响应性指标，其值升高代表副交感神经活动增强。由图 7 可知，各组 ΔRMSSD 的均值±标准误分别为 VC-TF=3.81±1.50、VU-TF=5.80±1.42、VC-TP=4.13±0.98、VL-TT=-0.27±1.38 ms，除 VL-TT 组略微下降外，其他组 RMSSD 在恢复期

较基线期均有所提升，再次说明与木质材料的视触觉交互可增强副交感神经活动，但对照组无此效应。Shapiro-Wilk 正态性检验表明，4 组数据中仅 VU-TF 组不符合正态分布，但其峰度、偏度绝对值均小于 2，可视为近似正态分布，同时 Levene 检验显示方差齐次 ($P>0.05$)。单因素方差分析表示，环境条件的主效应显著 ($F=3.707$, $P=0.016$)，且效应量较大 ($\eta^2=0.156$)。Fisher's LSD 事后比较显示，3 个木材组与 VL-TT 组均有显著差异 ($P<0.05$)，但各木材组间无差异 ($P>0.05$)。

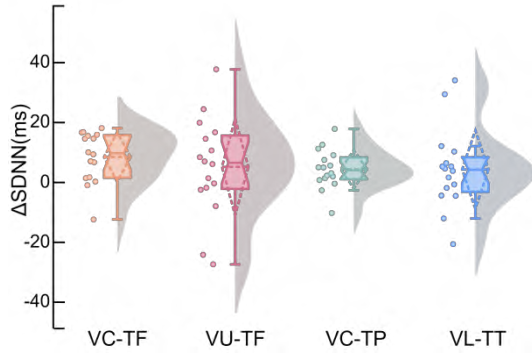


图 6 各组 Δ SDNN

Fig.6 Δ SDNN among different groups

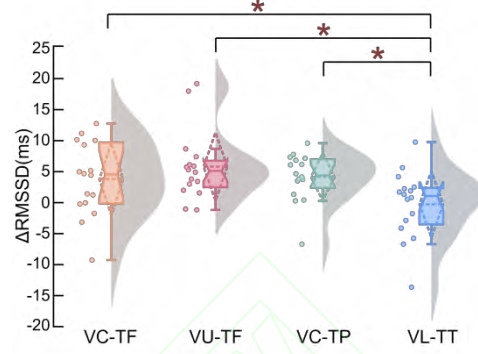


图 7 各组 Δ RMSSD

Fig.7 Δ RMSSD among different groups

*: $P<0.05$.

总体而言，HRV 的频域和时域分析结果显示出一致趋势，与木材的视触觉交互可显著提高参与者的 $\Delta\ln(\text{HF})$ 和 ΔRMSSD ，表明副交感神经活动得到增强，但对交感-副交感的平衡 [$\Delta\ln(\text{LF}/\text{HF})$] 和整体自主神经活性 (ΔSDNN) 的影响不显著。

2.1.3 SCL 分析结果 SCL 反映 SNS 的整体唤醒程度，其值升高通常被认为对应交感神经活动增强。由图 8 可知，基线期，除 VU-TF 组 SCL 略低外，其他 3 组 SCL 较为接近，并随时间增加缓慢下降。前测任务期开始后，各组 SCL 均明显上升，反映认知任务诱发交感神经兴奋。进入恢复期，各组 SCL 均呈逐渐下降趋势，其中 VC-TP 组和 VL-TT 组的下降幅度相较 VC-TF 组和 VU-TF 组更明显。后测任务开始后，各组 SCL 再次明显升高。这一时序变化趋势表明，SCL 可有效捕捉交感神经在认知任务阶段的唤醒以及恢复阶段的回落，验证实验范式对交感神经激活-恢复过程的有效操控。

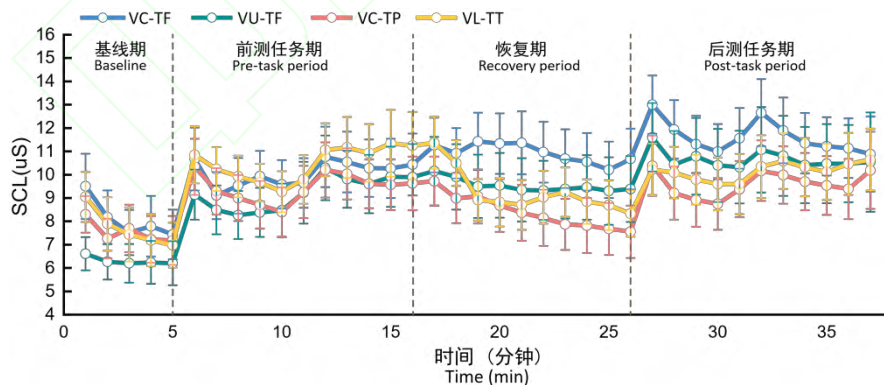


图 8 皮肤电导水平 (SCL) 时序变化

Fig.8 SCL temporal change among different groups

由图 9 可知，各组恢复期 SCL 相对于基线期的差值 (ΔSCL) 的均值 $\pm$ 标准误分别为 VC-TF= 3.02 ± 0.73 、VU-TF= 3.00 ± 0.71 、VC-TP= 0.87 ± 0.69 、VL-TT= 1.23 ± 0.82 μS 。通过 Shapiro-Wilk 正态性检验和 Levene 方差齐性检验，4 组数据均符合正态分布 ($P>0.05$)，且方差齐次 ($P>0.05$)。进一步进行单因素方差分析，环境条件的主效应呈边缘显著 ($F=2.383$, $P=0.078$)，具有中等效应量 ($\eta^2=0.106$)。继续进行 Fisher's LSD 事后两两比较，VC-TP 组与 VC-TF 组、VU-TF 组均有显著差异 ($P<0.05$)，VL-TT 组与 VC-TF 组、VU-TF

组的差异具有显著趋势 ($P<0.10$)。这表明在恢复阶段,不同视触觉环境下交感神经唤醒的回落幅度存在差异。VC-TF 组 SCL 显著低于 VC-TP 组,说明与触感粗糙、舒适度低的杉木相比,触摸光滑、舒适度高的木质人造板可显著促进 SCL 回落,降低交感兴奋。

为进一步考察不同视触觉刺激对交感瞬时反应的影响,计算恢复期 SCR 平均振幅和峰值数量,如图 10 所示。与木材组相比,VL-TT 组 SCR 平均振幅相对较大,峰值数量相对较少;各木材组之间 SCR 平均振幅和峰值数量较为接近。因 VL-TT 组数据不满足正态分布 ($P<0.05$),采用 Kruskal-Wallis 非参数检验考察环境条件主效应发现,环境条件对 SCR 平均振幅和峰值数量的影响均未达到统计显著水平 ($P>0.05$)。

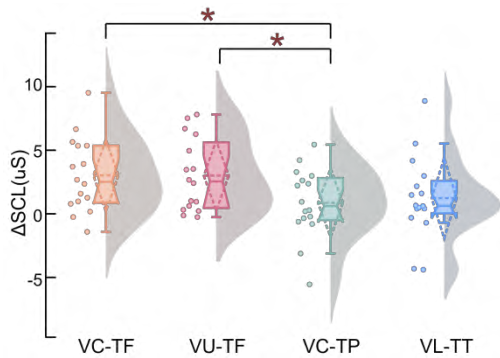


图 9 各组 Δ SCL

Fig.9 Δ SCL among different groups

*: $P<0.05$.

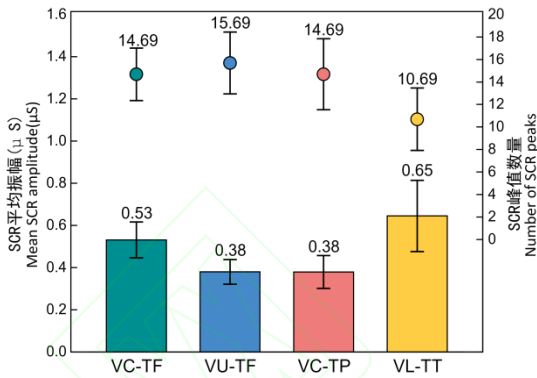


图 10 恢复期 SCR 平均振幅和峰值数量

Fig.10 SCR mean amplitude and peak counts among different groups in the recovery period

综合 SCL 与 SCR 结果发现,不同视触觉环境对交感神经活动的调节主要体现在整体唤醒水平的缓慢变化,而非瞬时反应事件的发生频率或幅度。这一结果表明,在以恢复为目标、缺乏突发刺激的情境中,环境对交感神经的影响主要通过调节唤醒状态实现,对瞬时反应的影响有限。

2.2 心理指标结果

由图 11 可知,各组视触觉环境主观印象评价结果均不符合正态分布 ($P<0.05$),采用 Kruskal-Wallis 非参数检验考察环境条件主效应发现,在自然环境联想、舒适感、喜好度和稀有度 4 个维度上,主效应均显著 ($P<0.05$)。为识别具体组间差异,进行事后两两比较并采用 Holm 方法进行校正。对于自然环境联想维度,3 个木材组评分均显著高于 VL-TT 组 ($P<0.05$),表明木质材料的视触觉刺激能够稳定引发参与者对自然环境的联想。对于舒适感维度,木材组评分整体高于 VL-TT 组,未校正时差异均达到显著水平 ($P<0.05$);经 Holm 校正后,仅 VC-TP 组与 VL-TT 组的差异仍保持显著 ($P=0.037$)。对于喜好度维度,木材组评分同样明显高于 VL-TT 组,未校正时差异均达到显著水平 ($P<0.05$);经 Holm 校正后,VC-TF 组与 VL-TT 组的差异不再显著 ($P>0.05$)。对于稀有度维度,VC-TP 组评分最高,与 VL-TT 组差异经 Holm 校正后显著 ($P=0.012$),其他木材组与 VL-TT 组无显著差异。

环境主观印象评价结果说明,与白乳胶漆墙面与瓷砖组成的人工环境相比,木材的视触觉环境在舒适感、喜好度和自然联想维度上评价更高。同时,由杉木墙面的视觉和人造板的触觉引起的视触觉冲突提升了稀有度感知,并与 VL-TT 组产生显著差异,而视触觉一致的杉木木材组在该维度与 VL-TT 组无显著差异,说明感官冲突可能增强新奇感,提高对稀有度的主观感知。

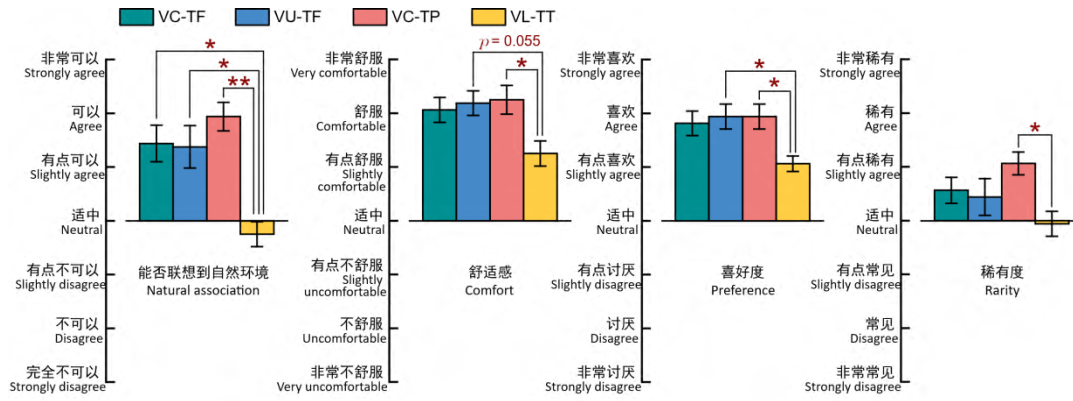


图 11 视触觉环境主观印象评价

Fig.11 Subjective impression evaluation of the visual-tactile environment

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

对 SVS、ROS、STAI-6 等量表进行统计分析前, 采用 Cronbach's α 系数检验各量表的内部一致性信度, 各量表系数介于 0.69~0.88 之间, 表明本次测量中各量表的内部一致性信度良好, 所获数据具有较高可靠性 (Tavakol *et al.*, 2011)。

经 Shapiro-Wilk 检验确认各组数据符合正态分布 ($P > 0.05$) 后, 采用配对样本 t 检验考察恢复前后状态焦虑的变化。由图 12 可知, 各组恢复期结束后 STAI-6 得分与恢复前相比均显著降低, 3 个木材相关组得分下降均达统计显著水平 ($P < 0.01$), VL-TT 组得分下降则达显著阈值 ($P = 0.05$), 表明恢复阶段有效缓解了认知任务诱发的状态焦虑, 同时木材相关视触觉环境表现出更明显的焦虑恢复幅度。

由图 13 可知, 各组恢复期结束后 SVS 得分均小幅上升, 但配对样本 t 检验表明恢复前后差异未达统计显著水平 ($P > 0.05$), 不同视触觉环境之间亦未观察到显著差异。

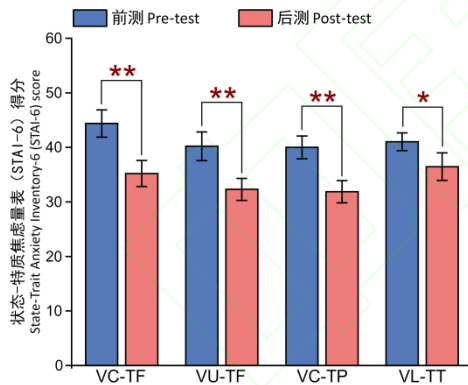


图 12 恢复前后状态-特质焦虑量表得分

Fig.12 STAI-6 scores pre- and post-recovery

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

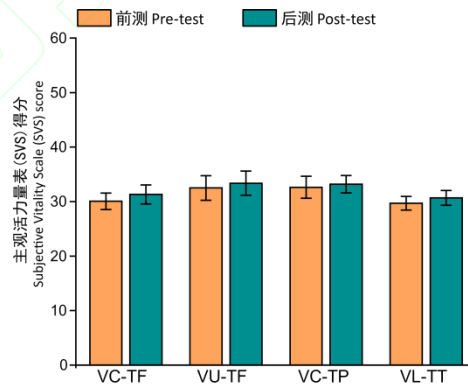


图 13 恢复前后主观活力量表得分

Fig.13 SVS scores pre- and post-recovery

图 14 显示, 3 个木材相关组的 ROS 得分整体高于 VL-TT 组。单因素方差分析表明, 环境条件的主效应未达统计显著水平, 但具有小效应量 ($\eta^2 = 0.047$), 表明不同恢复环境对恢复结果的影响具有一定方向性趋势, 但该差异在本研究中尚不足以形成显著组间区分。

图 15 显示, 各组参与者在认知任务完成后、恢复开始前主观压力水平均较基线期明显升高, 并在恢复期结束后出现回落。单因素方差分析表明, 环境条件对 Δ 压力的主效应不显著, 各组间压力下降幅度不存在显著差异, 说明在当前实验范式下, 不同视触觉恢复环境均能促使参与者的主观压力水平回落, 环境条件未明显影响压力恢复的幅度。

Group	Restoration Outcome Scale (ROS) score (approx.)
VC-TF	28.5
VU-TF	29.5
VC-TP	29.5
VL-TF	27.0

Figure 1 is a combined bar and line chart. The X-axis lists four groups: VC-TF, VU-TF, VC-TP, and VL-TT. The left Y-axis represents 'Subjective pressure score' (0 to 60). The right Y-axis represents 'Pre-post difference (Δ Stress)' (0 to 60). The legend indicates four data series: Baseline (blue bars), Pre-test (orange bars), Post-test (teal bars), and Pre-post difference (Δ Stress) (red line with circular markers). Error bars are present for all data points.

Group	Baseline (Score)	Pre-test (Score)	Post-test (Score)	Pre-post difference (Δ Stress)
VC-TF	~25	~32	~21	~10
VU-TF	~23	~26	~18	~10
VC-TP	~19	~28	~13	~18
VL-TT	~28	~36	~22	~18

Condition	Perceived spaciousness score
VC-TF	~4.0
VU-TF	~3.8
VC-TT	~4.1
VL-TT	~3.0

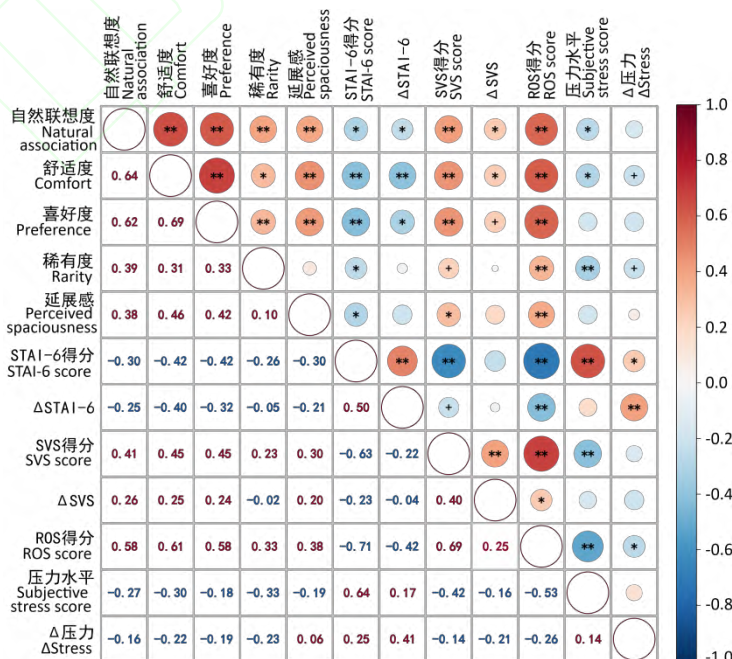


图 17 心理指标相关系数矩阵

Fig.17 Correlation coefficient matrix of psychological indicators

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

此外，在印象评价指标内部相关关系中，除稀有度与延展感之间未观察到显著相关外，其余各维度间均显著正相关（ $P < 0.05$ ），表明自然联想度较高、空间体验更为舒适的视触觉环境通常伴随更高的主观喜好度，构成一致的积极环境印象。

为进一步探讨自主神经变化与主观印象评价和情绪状态之间的关系，对 HRV 和 SCL 指标与心理指标进行 Spearman 秩相关分析。图 18 显示，自然环境联想和主观喜好度均与 $\Delta RMSSD$ 和 $\Delta \ln(HF)$ 显著正相关（ $P < 0.05$ ），表明对环境自然性和喜好度评价较高的参与者，其恢复期副交感神经活动增强幅度更大。在情绪状态层面， ΔSVS 与 $\Delta \ln(HF)$ 显著正相关（ $P < 0.05$ ），同时与 $\Delta \ln(LF/HF)$ 显著负相关（ $P < 0.05$ ），说明主观活力变化与副交感神经激活程度和自主神经平衡状态的变化具有一致性对应关系。

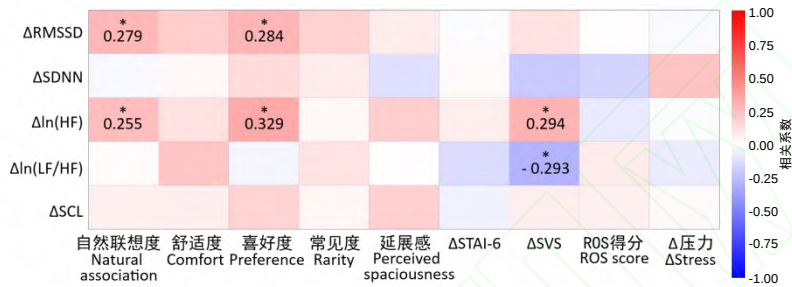


图 18 心理-生理指标相关系数矩阵

Fig.18 Cross-correlation coefficient matrix of psychological-physiological indicators

*: $P < 0.05$.

3 讨论

3.1 视触觉刺激对主观印象评价的影响

印象评价结果显示，木材相关组在自然环境联想、舒适度、喜好度和延展感等多个维度上的评分均显著高于由乳胶漆墙面与瓷砖构成的对照组。同时，自然感、舒适度、喜好度与延展感之间均显著正相关，表明木质材料的视触觉交互可增强环境的自然语义联想，并形成以生物亲和性为核心的整体印象结构，从而提升了环境的主观体验评价（Yin *et al.*, 2020）。该结果支持亲生物设计理论中关于自然材料能够通过感官刺激塑造积极环境印象的观点。

在不同木材视触觉环境之间，涂饰和未涂饰杉木墙面组在自然感、舒适度和喜好度等评价上无显著差异，说明本研究条件下，表面涂饰引起的光泽度变化未削弱杉木墙面所承载的自然语义。这可能由于自然语义的主要驱动因素为由木材的有机纹理和材色等视觉效果引发的对树木、森林等自然场景的联想，而表面涂饰未破坏这些关键视觉线索。此外，本研究采用的涂饰表面处于中等光泽度水平，在稳定的室内照明条件下不易产生明显眩光或反射干扰，故未对主观评价造成显著负面影响。相较之下，适度提高的表面光泽可能强化空间的开放感（Chen *et al.*, 2025b），使涂饰木材组的延展感评分显著高于对照组（ $P < 0.01$ ），而未涂饰木材组仅表现为边缘显著（ $P = 0.07$ ）。

此外，由涂饰杉木墙面与浸渍纸饰面刨花板构成的 VC-TP 组，在自然感、舒适度和延展感等维度上的评分与杉木板构成的 VC-TF 组相当。既往感官研究（Ma *et al.*, 2026）已表明，参与者能够通过触觉区分实木与人造板材料，并将刨花板明确识别为人工材料；然而，对于我国青年参与者而言，人造板更高的平整度和硬度被感知为更舒适且更具价值感。这一结果提示，在视触觉组合环境中，自然语义的形成主要由视觉通道主导，触觉层面的人工属性不会必然削弱整体自然感，反而可能通过提升触觉舒适度间接提高整

体评价。

3.2 视触觉刺激对心理和生理恢复的影响

在心理恢复层面，所有恢复环境均能有效缓解由认知任务诱发的状态焦虑，表现为恢复后 STAI-6 得分显著下降。然而，STAI-6、SVS 和 ROS 等量表在组间的差异未达到统计显著水平。与此同时，自然感、舒适度、喜好度和延展感等印象评价维度均与上述量表呈显著相关，提示心理恢复效应受个体对环境语义的主观解读调节，并非仅由环境差异决定。对照环境虽在自然联想评价上显著低于木质环境，但其现实熟悉度高，且未引发明显不适或负面评价，在心理层面不是具有明显负效应的压力源，反而更接近“语义中性”的恢复情境。这种中性特征可能削弱了不同环境之间在心理恢复指标上的组间差异，使恢复效应的差异主要体现在个体层面，在环境分组层面不显著。

在生理恢复方面，所有木材相关组的 $\Delta \ln(\text{HF})$ 与 ΔRMSSD 均显著高于对照组，提示木质视触觉环境有利于副交感神经活动增强。同时上述指标均与自然感和喜好度等主观评价显著正相关，说明对环境自然语义感知更强的个体更容易在生理层面表现出恢复性自主神经反应，与亲生物理论中关于自然环境能够促进自主神经系统向恢复状态转变的观点一致 (Kumpulainen *et al.*, 2024; Nakanishi *et al.*, 2024; 李静等, 2024)。在 3 个木材组之间， $\Delta \ln(\text{HF})$ 与 ΔRMSSD 未表现出显著差异，表明 50 GU 清漆涂饰的视觉刺激以及触觉层面的人工属性均未对副交感神经活动的增强产生抑制作用，与心理层面未观察到的负面效应结果相一致。

此外，与 VC-TF 组相比，VC-TP 组不仅表现出副交感神经活动增强，还伴随 SCL 的显著下降，提示在该条件下同时发生副交感神经的激活和皮肤交感神经的回撤。相比之下，VL-TT 组的副交感神经指标未出现显著变化，但 SCL 显著下降，表明该环境虽未激活心脏层面的副交感调控，但诱发皮肤层面的交感神经回撤。这种差异可能源于材料在粗糙度、摩擦系数和导热性能等方面的不同引发的触觉知觉差异。知觉差异进一步影响触觉舒适度评价，表面较为粗糙且黏滞感较强的杉木触觉舒适度评分相对较低，而表面光滑的人造板触觉舒适度较高。触觉舒适度的差异可能通过调节皮肤交感神经的激活程度 (Hu *et al.*, 2022)，塑造不同环境条件下 SCL 的变化模式。

3.3 心理与生理恢复差异的潜在神经机制

基于文献推测，综合印象评价以及心理、生理恢复结果的差异，提示不同视触觉环境可能通过功能侧重不同的神经通路产生恢复效应。对于视觉刺激，木材纹理等自然视觉特征经 V3 和 V4 区域进行中级特征加工后，经腹侧通路投射至颞叶完成语义整合，并与眶额皮层的奖赏系统发生交互 (Rolls, 2024)。既有 fMRI 研究表明，自然场景感知可激活海马旁回位置区 (parahippocampal place area, PPA) 和回顾性场景建构区 (retrosplenial cortex, RSC) (Gong *et al.*, 2023)，并可通过海马-眶额通路与情绪和奖赏系统相连接 (Rolls, 2026)，从而促进副交感神经活动增强。由于视觉在空间结构与语义联想加工中占据主导地位，因此在无显著认知冲突 (cognitive conflict) 情况下触觉输入的语义权重有限。这一以视觉语义为主导的加工路径，可能解释为何在视触觉组合条件下触觉层面的人工属性并未显著削弱整体自然感知。

相比之下，触觉刺激主要通过皮肤机械感受器 (如 Meissner 和 Pacinian 小体) 传入，经脊髓后柱-内侧丘系通路到达体感初级皮层 (S_1) 和次级体感皮层 (S_2)，并进一步投射至岛叶和杏仁核等边缘系统区域。该路径与下丘脑和脑干的自主神经调控中枢相连接，因而更容易影响皮肤交感神经活动 (Zhang *et al.*, 2024)，引起 SCL 变化。愉悦的触觉体验可通过岛叶调节抑制交感输出，而粗糙的触觉刺激可能维持一定程度的警觉水平，限制交感神经活动回撤 (Davidovic *et al.*, 2019)。由此，视觉和触觉在本研究中可能分别通过“语义-奖赏”和“体感-自主神经调节”2 条功能侧重不同的神经通路，共同塑造心理和生理恢复的差异化表现 (图 19)。

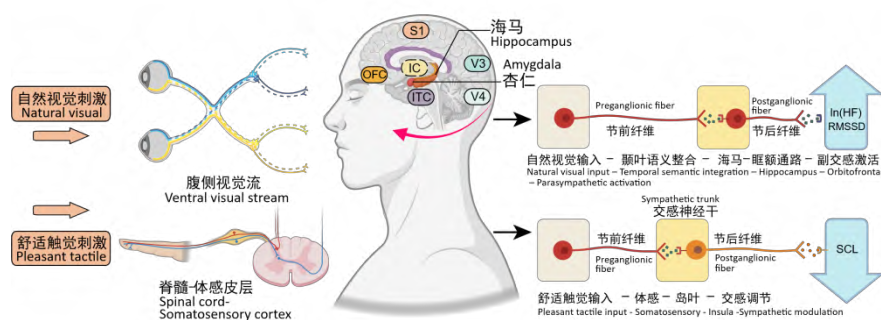


图 19 视触觉刺激影响自主神经系统的两条可能神经通路示意

Fig.19 Schematic diagram of two possible ANS-regulating neural pathways induced by visual-tactile stimulation

4 结论

本研究考察 64 名参与者在认知任务后，于不同视触觉环境短时交互后的心理和生理恢复差异。结果发现：1）真实木质环境的生理恢复效应在不同感官通道中的调节机制不同。视觉通道主要通过诱发自然语义联想，促进以副交感神经活动增强为主导的生理恢复，触觉通道则通过体感舒适度诱导交感神经的有效回撤。2）心理恢复效应与个体对环境的评价密切相关，而非由单一材料属性直接决定。自然感、舒适度和喜好度等主观评价均与心理恢复指标呈显著相关关系，但不同环境之间的心理恢复差异未达到显著水平，提示心理恢复主要受环境语义理解与整体感知质量的调节。3）木质材料在健康建筑中的应用应针对不同感官特征进行精准处理：视觉层面应优先保留木材纹理、材色等关键自然线索，以强化环境的自然语义感知和积极情绪；触觉层面则应通过优化轮廓粗糙度、摩擦系数等物理参数提升体感舒适度。通过视觉“自然感”与触觉“舒适性”的协同适配，可最大化提升身心恢复效果。

但本研究也存在以下局限：首先，样本主要为 22 岁左右青年群体，年龄分布单一，未充分考虑年龄对视触觉感受器和感知的潜在影响；其次，聚焦视触觉交互，未纳入嗅觉影响；最后，实验在高度控制的实验室条件下进行，可能与真实生活场景存在差异。

未来研究可从以下方向进一步拓展：一是纳入中年和老年群体，考察年龄对木材视触觉恢复效应中的调节作用；二是扩展至多感官整合实验，系统探讨嗅觉因素在恢复路径中的协同贡献；三是转向真实室内场景的长期实地研究，以提升结果的生态效度和实际应用价值。

参考文献

- 李 静, 徐洪澎, 张 超, 等. 2024. 高校室内木质化空间的心理增益探析. 世界建筑, (2): 58-63.
- (Li J, Xu H P, Zhang C, *et al.* 2024. Discussion on the psychological benefits of wooden interior spaces on university campuses. World Architecture, (2): 58-63. [in Chinese])
- 张 悦, 李 超, 郭叶莹子, 等. 2022. 木材的视觉刺激及人体心理生理响应研究进展. 北京林业大学学报, 44(6): 156-166.
- (Zhang Y, Li C, Guo-Ye Y Z, *et al.* 2022. Research development on human psychological and physiological responses to visual stimulation of wood. Journal of Beijing Forestry University, 44(6): 156-166. [in Chinese])
- Chen J, Chen G M. 2025a. Academic burnout among Chinese college students: a study based on FSQCA method. Acta Psychologica, 253: 104701.
- Chen X, Duan W T, Liu Y, *et al.* 2025b. The influence of material and spatial size on indoor environment preference evaluation. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 24(3): 1112-1122.
- Davidovic M, Starck G, Olsson H. 2019. Processing of affective and emotionally neutral tactile stimuli in the insular cortex. Developmental Cognitive Neuroscience, 35: 94-103.
- Du Q Y, Liu H W, Yang C J, *et al.* 2022. The development of a short Chinese version of the state-trait anxiety inventory. Frontiers in Psychiatry, 13: 854547.
- Gong Z X, Zhou M, Dai Y X, *et al.* 2023. A large-scale fMRI dataset for the visual processing of naturalistic scenes. Scientific Data, 10: 559.

- Habay J, Arenales Arauz Y L, Proost M, *et al.* 2026. Mental fatigue negatively impacts cognitive and physical performance outcomes: a large-scale randomized crossover trial. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 58(2): 225-241.
- Hu Q W, Li X H, Fang H, *et al.* 2022. The tactile perception evaluation of wood surface with different roughness and shapes: a study using galvanic skin response. *Wood Research*, 67(2): 311-325.
- Ikei H, Nakamura M, Miyazaki Y. 2020. Physiological effects of visual stimulation using knotty and clear wood images among young women. *Sustainability*, 12(23): 9898.
- Ikei H, Song C, Miyazaki Y. 2017. Physiological effects of touching wood. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7): 801.
- Kumpulainen S, Kilpiäinen M, Koski J, *et al.* 2024. Wooden interiors improve heart rate variability-derived psychophysiological well-being: an acute cross-over study. *Environment and Behavior*, 56(3/4): 155-178.
- Laborde S, Mosley E, Thayer J F. 2017. Heart rate variability and cardiac vagal tone in psychophysiological research-recommendations for experiment planning, data analysis, and data reporting. *Frontiers in Psychology*, 8: 213.
- Lesage F X, Berjot S. 2011. Validity of occupational stress assessment using a visual analogue scale. *Occupational Medicine*, 61(6): 434-436.
- Ma P P, Shi Q, Xie T J, *et al.* 2026. Materials selection in biophilic building design: multisensory perception and psycho-physical mapping of wood materials. *Buildings*, 16(4): 726.
- Makowski D, Pham T, Lau Z J, *et al.* 2021. NeuroKit2: a Python toolbox for neurophysiological signal processing. *Behavior Research Methods*, 53(4): 1689-1696.
- Marteau T M, Bekker H. 1992. The development of a six-item short-form of the state scale of the Spielberger State: Trait Anxiety Inventory (STAI). *British Journal of Clinical Psychology*, 31(3): 301-306.
- Nakamura M, Ikei H, Miyazaki Y. 2022. Effects of visual stimulation using wooden-wall images with different amounts of knots on psychological and physiological responses. *Wood Science and Technology*, 56(6): 1869-1886.
- Nakanishi E Y, Poulin P, Blanchet P, *et al.* 2024. A systematic review of the implications of construction materials on occupants' physical and psychological health. *Building and Environment*, 257: 111527.
- Personeni G, Savescu A. 2023. Ecological validity of virtual reality simulations in workstation health and safety assessment. *Frontiers in Virtual Reality*, 4: 1058790.
- Queirolo L, Fazio T, Roccon A, *et al.* 2024. Effects of forest bathing (shinrin-yoku) in stressed people. *Frontiers in Psychology*, 15: 1458418.
- Rolls E T. 2024. Two what, two where, visual cortical streams in humans. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 160: 105650.
- Rolls E T. 2026. Hippocampal revolutions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 180: 106492.
- Ryan R M, Frederick C. 1997. On energy, personality, and health: subjective vitality as a dynamic reflection of well-being. *Journal of Personality*, 65(3): 529-565.
- Sheth C, McGlade E, Yurgelun-Todd D. 2017. Chronic stress in adolescents and its neurobiological and psychopathological consequences: an RDoC perspective. *Chronic Stress*, 1: 2470547017715645.
- Shibata S, Tokuhiko K, Ikeuchi A, *et al.* 2024. Visual properties and perceived restorativeness in green offices: a photographic evaluation of office environments with various degrees of greening. *Frontiers in Psychology*, 15: 1443540.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. 1996. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 93(5): 1043-1065.
- Tavakol M, Dennick R. 2011. Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, 2: 53-55.
- Taylor A G, Goehler L E, Galper D I, *et al.* 2010. Top-down and bottom-up mechanisms in mind-body medicine: development of an integrative framework for psychophysiological research. *EXPLORE*, 6(1): 29-41.
- Tsunetsugu Y, Matsubara E, Sugiyama M. 2017. Evaluation of the impact of wooden living environments on humans. *Mokuzai Gakkaishi*, 63(1): 1-13.
- Tsunetsugu Y, Sugiyama M. 2021. Heat transfer, physiological responses, and subjective perceptions during short contact time with wood or other materials. *Journal of Wood Science*, 67(1): 27.
- Wereszczyński M, Chwiłka P, Smolka E, *et al.* 2025. Data from SymSPAN and OSPAN working memory capacity tasks in online and laboratory settings. *Data in Brief*, 62: 111923.
- Westfield P. 2024. Working memory capacity, mental fatigue, and human performance. *Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Aircraft Systems. SCITEPRESS - Science and Technology Publications*, 126-133.

Wu J L, Guan Z T, Li C L, *et al.* 2025. Brain functional connectivity after Stroop task induced cognitive fatigue. *Scientific Reports*, 15: 22342.

Yin J, Yuan J, Arfaei N, *et al.* 2020. Effects of biophilic indoor environment on stress and anxiety recovery: a between-subjects experiment in virtual reality. *Environment International*, 136: 105427.

Zhang R H, Deng H F, Xiao X. 2024. The insular cortex: an interface between sensation, emotion and cognition. *Neuroscience Bulletin*, 40(11): 1763-1773.

(责任编辑 石红青)



附录

为明确本研究所采用的视触觉刺激组合，开展一项感官评价实验。视觉刺激为正文所用的涂饰和未涂饰杉木墙板；触觉刺激为包含正文所用杉木板和浸渍纸贴面刨花板在内的 15 种木质材料。实验共招募 48 名参与者，采用组间设计，2 种涂饰条件各随机分配 24 名参与者。感官评价采用语义差异法进行，选取 22 组双极形容词对材料进行评价，具体词对如附表 1 所示。

附表 1 感官评价所用双极形容词对

Tab. 1 Bipolar adjective pairs used in the sensory perception experiment

视觉特性 Visual characteristics	触觉特性 Tactile characteristics	情感与偏好评价 Affective-preference evaluation	
哑光-亮光 Matte - Glossy	粗糙-光滑 Rough - Smooth	旧-新 Old - New	讨厌-喜欢 Dislike - Like
对比弱-对比强 Low-contrast - High-contrast	硬-软 Hard - Soft	人工-天然 Artificial - Natural	脏-干净 Dirty - Clean
暗-亮 Dark - Bright	冷-暖 Cold - Warm	粗劣-精致 Unrefined - Elegant	紧张-放松 Tense - Relaxed
	厚-薄 Thick - Thin	不舒服-舒服 Uncomfortable - Comfortable	廉价-昂贵 Cheap - Expensive
	粘手-顺滑 Sticky - Slippery	联想到自然- 不能联想自然 Can associate with natural environment - Cannot associate with natural environment	常见-稀有 Common - Rare

对评价数据进行探索性因子分析和验证性因子分析，提取出“情感判断”“自然联想”“品质价值”3 个潜在因子，并计算相应因子得分。VC-TF 组与 VC-TP 组在 3 个维度上的得分情况如附表 2 所示。Wilcoxon 符号秩检验结果表明，2 组在 3 个维度上均达到统计显著水平。鉴于 2 种搭配在情感评价、自然感知和品质认知等维度均存在显著差异，最终选定 VC-TF 与 VC-TP 作为正式实验所采用的视触觉组合刺激。

附表 2 各维度因子得分结果（均值±标准误）

Tab.2 Factor scores of each dimension (mean±SE)

组别 Group	情感判断 Affective judgment	自然联想 Natural association	品质价值 Value perception
VC-TF (n=24)	-0.54±0.13**	0.39±0.19*	-0.71±0.10**
VC-TP (n=24)	0.76±0.16**	-0.08±0.19*	-0.90±0.14**

注：*：P< 0.05；**：P< 0.01。 Note: *：P< 0.05；**：P< 0.01.