

文章编号:1673-9469(2026)01-0061-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.009

## 自然声环境下乡村民宿窗形态对青年恢复性体验的心理生理量化研究

任洪国,严钊崧,韩天添,张静\*

(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)

**摘要:** 为探究自然声环境下乡村民宿空间不同窗形态对青年群体恢复性体验的影响,融合脑电图技术、计算机自动虚拟环境系统与感知恢复量表,对比不同组别窗形态所诱发的青年被试者的脑电响应与主观心理评价。研究发现:自然声音的介入能显著诱发青年人的放松反应与积极情绪。放松组窗形态(低复杂度、开口数少、无锐角弧形轮廓)可引发显著神经放松效应,提升了额叶、顶叶及中央叶等脑区9个电极的 $\alpha$ 波功率值;唤醒组窗形态(高复杂度、开口数多、锐角直线轮廓)伴随 $\alpha$ 波功率值抑制,恢复性体验未获提升。同时从神经生理与心理认知双重视角,证明了窗形态、脑电活动与恢复性体验三者之间的关联性。研究表明,自然声环境下乡村民宿差异化窗形态可调控青年人恢复性体验,为乡村民宿空间具有恢复性导向的窗户设计提供了情感化设计依据。

**关键词:** 脑电图;窗形态;计算机自动虚拟环境系统;乡村民宿;自然声音;恢复性体验

**中图分类号:** TU241.4

**文献标识码:** A

## A Psychophysiological Quantitative Study on Youth Restorative Experience Influenced by Window Morphology in Rural Homestays Under Natural Sound Environments

REN Hongguo, YAN Tianyu, HAN Tiantian, ZHANG Jing\*

(Jingjinji Spatial Intelligent Perception Collaborative Innovation Center, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** To explore the impact of different window morphologies in rural homestay spaces in a natural sound environment on the restorative experience of young people, this study integrated electroencephalogram (EEG) technology, Computer Automatic Virtual Environment (CAVE) system and Perceived Restorativeness Scale (PRS) to compare the EEG responses and subjective psychological evaluations of young subjects induced by different groups of window morphology. Research shows that the intervention of natural sounds can significantly induce relaxation responses and positive emotions in young people. Relaxing window morphologies (low complexity, fewer openings, curved contours without sharp angles) can trigger a significant neural relaxation effect, enhancing the alpha wave power values of 9 electrodes in brain regions such as the frontal lobe, parietal lobe, and central lobe. Arousing window morphologies (high complexity, multiple openings, sharp-angled rectilinear contours) were accompanied by the suppression of alpha wave power values, and the restorative experience was not improved. At the same time, from the dual perspectives of neurophysiology and psychological cognition, the correlation among window morphology, EEG activity and restorative experience is proved. Studies show that under natural sound environments, differentiated window morphologies in rural homestays can regulate young people's

收稿日期:2025-09-26

基金项目:河北省教育厅在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZSS2025084);国家自然科学基金面上项目(52578014)

第一作者:任洪国(1979—),男,山东德州人,博士,教授,从事感性建筑方面的研究。

\* 通信作者:张静(1990—),女,河北张家口人,博士,讲师,从事情感识别、数字内容分析等方面的研究。

restorative experiences, providing an emotional design basis for the window design of rural homestay spaces with restorative orientation.

**Key words:** electroencephalogram; window morphology; CAVE system; rural homestay; natural sound; restorative experience

乡村民宿作为一种新型的休闲场所,已成为人们短途旅行和放松身心的理想选择<sup>[1]</sup>。但随着乡村民宿数量激增,设计同质化、忽略使用者心理需求等问题凸显<sup>[2]</sup>。既削弱了其对青年群体的吸引力,也制约了其恢复性价值的体现,迫切需要从空间核心要素入手,探索贴合青年情感需求的设计路径。窗户作为乡村民宿空间的关键要素,其形状在室内空间对室外景观的感知方面起着重要作用,它影响视觉连接、采光和隐私,更对居住者的心理和生理健康具有深远影响<sup>[3-4]</sup>,是破解上述设计痛点的重要切入点。

现有研究已围绕乡村民宿情感化设计、形态与情感关联、恢复性体验量化等方向展开探索,但针对乡村民宿窗形态结合自然声环境影响青年恢复性体验仍缺乏系统性的研究。Wei等<sup>[5]</sup>聚焦乡村民宿室内彩色照明,探究其对情绪和视觉感知的影响,并建立情感维度量化模型来分析基本情绪。但该研究仅涉及照明要素,未触及窗户这一核心空间载体。在形态与情感关联方面,现有研究多聚焦于城市环境或单一模态刺激。Naghbi等<sup>[6]</sup>发现建筑立面中的矩形、方形、圆形和半圆形拱窗为愉悦刺激,三角形和三角拱窗则为不悦刺激。任文权<sup>[7]</sup>证实圆形、锐角等不同形状对个体情感影响显著。在恢复性体验相关研究中,自然声音作为乡村民宿里的重要组成部分,虽被证实可以缓解压力、恢复注意力、促进情绪恢复和提升幸福感<sup>[8-9]</sup>,但在恢复性体验评估里主观评价仍占主导,缺乏多模态神经心理机制深入探究。从理论与技术结合层面看,感性建筑学把建筑学和感性工学相结合,研究建筑及其环境对人的生理、行为、认知反应影响,为打造满足人的情感需求的建筑空间环境提供了学科交叉框架<sup>[10]</sup>。而脑电图(Electroencephalogram, EEG)技术作为环境心理学与神经科学交叉的重要工具,已被用于量化环境的生理效应,推动恢复性体验的研究中<sup>[11-12]</sup>。Seiz等<sup>[13]</sup>借助EEG对城市自然景观的心理、生理效应予以评估。Ren等<sup>[14]</sup>在虚拟现实环境中,用脑电 $\alpha$ 波来量化人体生理舒适度,同时探讨了主观舒适性评价和脑电实验中 $\alpha$ 波的相关性。Jeon等<sup>[15]</sup>借助虚拟现实技术研究了视听交互对心理生理恢复

的影响,并构建了一个适用于环境设计的恢复模型。范昭诗<sup>[16]</sup>通过虚拟现实与EEG技术研究发现虚拟自然场景的恢复性效益比虚拟抽象场景的恢复性效益好。然而现有技术应用大多集中在自然环境或特定功能空间,融合自然与文化特质、承载特定恢复功能的乡村民宿空间,其独特的情感响应与知觉体验的神经生理基础尚缺乏系统性、多维度的量化研究。

本研究以青年群体为研究对象,把脑电图数据及感知恢复量表的主观评价数据相结合,同时纳入自然声环境变量,系统地分析乡村民宿空间窗形态对青年群体生理放松状态和心理恢复性感知的的影响,通过相关性分析揭示窗形态特征、大脑活动与恢复性感知之间的关联性,为乡村民宿窗户的情感化设计提供神经科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 要素提取与实验场景设计

本研究基于携程、爱彼迎等在线旅游平台数据,以民宿、乡村、评分4.7以上为筛选条件,系统梳理出涵盖中国所有建筑气候分区的70个高口碑民宿样本,提取了14种典型窗形态。分析显示民宿高频设计参数为:房间尺度6.7 m×6.7 m×3.0 m(面积约为45 m<sup>2</sup>),室内视角可见窗大小与窗所在墙面面积比值为0.55。本研究中室内视角可见窗大小与窗所在墙面面积比值特指从室内观察者视角直接可见的窗户投影面积与对应墙面(不含结构柱、保温层等非可见部分)的比值。采用Sketch Up Pro 2023构建1:1三维模型,经Mars 2022实现材质和自然环境美化,构建实验场景以确保接近生活场景,如图1所示。相关研究表明自然声音能显著降低压力和烦躁,其中鸟鸣对缓解压力和烦躁的影响最大<sup>[17]</sup>。基于此,本研究采用剪影专业版音效库中BCD Studio采样的高保真自然声音素材(虫鸣鸟叫),设置自然声音介入与自然声音缺失两种场景,制作沉浸式虚拟环境刺激视频。依据多感官刺激理论,视听通道交互可显著增强情感唤醒强度,故通过声音变量的引入,探究多模态刺激对青年住客生理心理反应的影响差异。

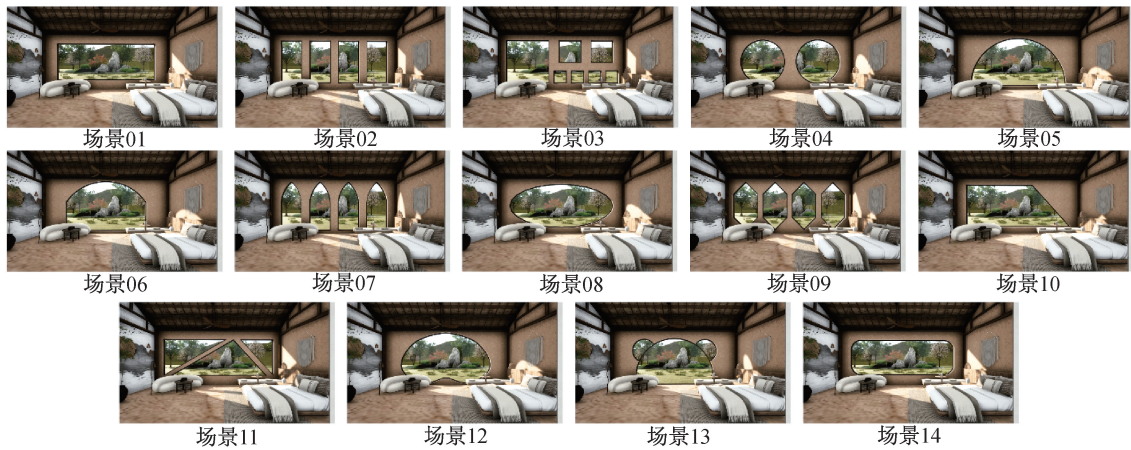


图 1 实验场景

Fig. 1 Experimental scenarios

预实验采用刺激呈现并即时评分的流程,招募 342 名具备乡村民宿居住经历的青年被试者,其中男性 175 名,女性 167 名,年龄(25±5)岁。在实验室电脑屏幕上向被试者依次呈现上述 14 种乡村民宿窗形态静态刺激(27 英寸显示器,分辨率 2 K),每种形态呈现 15 s 以确保被试者充分感知,结束后引导被试者聚焦放松-唤醒维度完成主观评价,使用李克特五级量表来识别被试者对窗形态的情绪反应。评分依次为 1=非常放松,2=放松,3=一般,4=唤醒,5=非常唤醒。采用 K-Means 聚类算法对窗户评分数据进行二元分类,算法通过最小化簇内平方和优化聚类结构,依据评分均值的高低将聚类结果定义为放松组与唤醒组(评分越低表示窗户越具放松属性,反之则为唤醒属性),结果如图 2 所示。

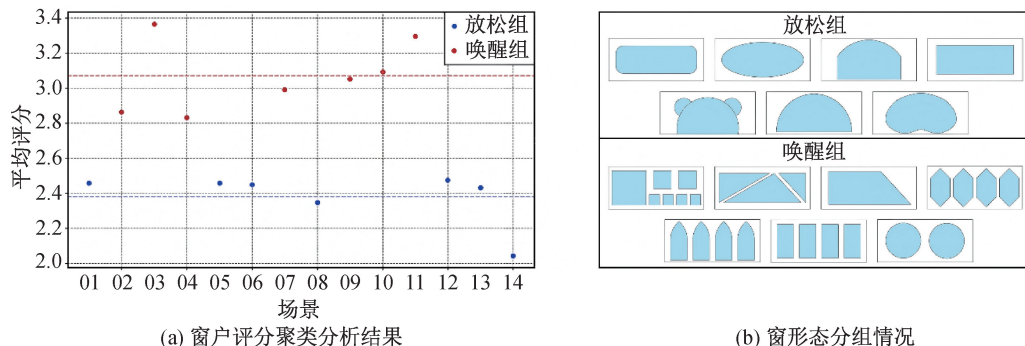
### 1.2 被试者

本研究采用 G \* Power 软件(版本 3.1.9.7)进行样本量估算,研究设计为单因素两水平被试者内实验,探讨两个组别窗形态对被试者的影响。基于配对样本 t 检验,设定显著性水平为 0.05,统

计检验力为 0.80,结果表明所需最小样本量为 34 人。为进一步增强研究结果的稳健性与样本的代表性,本研究最终招募了 60 名具备乡村民宿居住经历的青年被试者,其中男性 33 名,女性 27 名,年龄(25±5)岁。

### 1.3 实验流程

实验在河北工程大学中韩感性建筑国际研究中心沉浸式交互实验室进行,共历时 15 d。本研究运用计算机自动虚拟环境(Computer Automatic Virtual Environment, CAVE)系统构建乡村民宿沉浸式场景,搭配实验室全频环绕音响系统,其优势在于生态效率高,借助无头盔的沉浸式体验,有效避免了头戴设备可能引发的视觉疲劳及模拟晕动症等干扰因素,让用户在更加自然且舒适的虚拟环境里进行感知体验。研究团队对实验环境进行了严格把控,使室内温度稳定在(22±1)℃,相对湿度保持在(50±5)%,控制背景噪声≤20 dB(A),以此为被试者构建稳定的热舒适与听觉基底条件。实验全程按统一规范的操作流程开展,确保所有被试者在相同条件下接受相同视觉与听觉刺激。



(a) 窗户评分聚类分析结果

(b) 窗形态分组情况

图 2 窗户评分聚类分析结果与分组情况

Fig. 2 Results of cluster analysis on window ratings and grouping situation

实验采用双阶段混合研究模式,观察被试者在实验期间的动态情感变化,并分析实验结束后的情绪持续影响,以此搭建闭环数据收集系统。实验包括两部分(图3),总时长约100 min,第一部分,引导被试者进入CAVE系统实验区,说明实验流程与视觉、听觉刺激配合要求,之后佩戴脑电帽,用GT5医用导电膏把电极电阻校准到5 k $\Omega$ 以下,以保证信号采集质量,同时启动音响系统预热。接下来,要求被试者闭目静坐且保持身心放松,同步采集静息态脑电数据。采用随机序列展示14种窗形态以及2类声学条件(有自然声音、无自然声音)组合的28组场景视频(视觉画面内嵌音频的一体化场景视频)。每组刺激前先呈现15 s中央注视点,无音频播放,以稳定注意力,随后播放20 s的场景视频刺激,视频结束后在30 s内完成主观情感问卷。全部观看完28组场景视频并填写完情感问卷后移除脑电实验设备,向被试者讲述后续安排,设置10 min自由休息时间。休息完进行第二部分实验,被试者返回CAVE场景内,无需穿戴脑电设备,延续第一部分的28组场景呈现顺序,采用相同的注意力集中期(15 s)与刺激呈现期(20 s),主观评价期延长至60 s,完成恢复性感知维度主观问卷,由于第二部分实验时间较长,采用分块设计,每完成14个场景后设置10 min休息时间,进一步消除疲劳累积效应,确保问卷数据质量。

两部分的问卷阶段,每一页顶部均嵌入场景专属图像锚点,即该场景在CAVE系统中的高清截图(含场景描述、自然声环境标注,如:场景01+有自然声音),确保被试者快速关联对应刺激,且每5个场景设置1个场景组缩略图页,辅助被试者梳理回忆。

#### 1.4 数据指标提取

本研究提取60个被试者在不同窗形态下的多维指标,因脑电图技术故障排除1名被试者后,最终基于59名有效参与者的生理、心理数据开展分析。

##### 1.4.1 脑电数据指标

本研究运用32导脑电系统,以1 000 Hz采样率,16位精度采集原始脑电信号。使用Python3.13对脑电数据进行预处理,借助1~50 Hz带通滤波去除低频漂移与肌电噪声,利用独立成分分析算法精准剔除眼球伪迹、肌电伪迹等非脑电成分。对预处理信号进行分段处理,利用快速傅里叶变换来计算功率谱密度,进而提取出 $\alpha$ 波段的功率值。运用通道独立处理策略,分别对32个电极的 $\alpha$ 波功率值进行计算,以此保留各电极间的特异性差异。为消除个体间的差异,对每个电极的任务态数据进行基线校正(减去静息态基线的平均功率值),归一化处理后的 $\alpha$ 波功率值被定义为各电极的特征值。

##### 1.4.2 主观问卷指标

本研究分阶段设计实验过程中情感变化、实验结束后恢复性感知两个维度的主观问卷,用李克特五级量表来追踪被试者心理状态并进行量化评估。实验过程中情感变化问卷运用主观情感实时评价范式,借由放松-唤醒、消极-积极状态来评估,实时捕捉场景引发的情感波动。实验结束后恢复性感知影响评估引入了基于Kaplan夫妇的注意力恢复理论(Attention Restoration Theory, ART)的感知恢复量表,从远离性、魅力性、延展性和兼容性这四个维度对乡村民宿窗形态对个体恢复性体验的影响进行量化评估。乡村民宿窗形态是视觉的环境载体,它与恢复性环境理论存在内在联系,为解决通用量表与本研究具体情境的适配性问题,本研究在保留ART核心内容的同时,结合乡村民宿窗形态的场景特点(包括窗景构成、视野范围、乡村氛围营造等要素)优化量表题项。

##### 1.4.3 形式特征提取

窗形态的形式特征受分形维数、开口个数、边框夹角以及弧形轮廓等多种因素影响,这些特征共同决定了窗户的视觉感知和建筑美学价值<sup>[18-20]</sup>。分形维数表征了窗形态占据空间的能力及其结构



图3 实验流程图

Fig. 3 Experimental procedure diagrams

的复杂性与不规则性。视觉复杂度作为核心指标,采用建筑学领域广泛应用且操作直观的计盒维数法进行量化。设定成人标准视线高度为 1.6 m,清晰视域范围界定最大观测视角为 27°,精准识别视角界定最小观测视角为 2°。依据目标建筑实际尺度及最大观测视角确定有效观测视距,进而通过三角关系推导图像分析中匹配人眼感知的最小与最大有效方格边长尺度范围。在此尺度范围内,选取等比数列作为方格边长序列进行计盒维数计算。同时,提取了直接描述窗形态的特征指标,包括:开口个数(由于固定窗户总面积而产生的空间分隔,窗户单元内独立可开启或通透部分的数量)、边框夹角(边框线条相交形成的角度特征,直线边框与直线边框夹角、直线边框与弧形边框外接圆切线的夹角)以及弧形轮廓(整体外轮廓或内部构件是否存在曲线形态)。以上特征值提取均通过 AutoCAD 2021 及 Python 3.13 完成,这些指标共同构成了窗形态特征的量化体系。

### 1.5 数据分析方法

本研究共收集了 59 名被试者的脑电和主观问卷数据。在数据预处理阶段,严格遵循数据清洗规范,识别并剔除因设备故障、电极脱落等技术原因导致的异常数据。数据处理使用 Python 3.13 及 PyCharm 2024.3.5 完成,统计分析在 SPSS 27 中进行。实验具体分析对象包括乡村民宿空间两组不同窗形态的各电极  $\alpha$  波功率值与主观问卷指标。由于样本数量为 59 ( $n=59>50$ ),采用柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫检验对数据正态性进行评估。正态性检验结果显示,所有指标配对差值的 K-S 检验  $p$  值均小于 0.05,表明数据为偏态分布,因此采用威尔科克森符号秩检验对比不同组别窗形态各项指标数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 窗形态的形式特征提取分析

对 14 个乡村民宿空间窗形状的形式特征从分形维数、开口个数、边框夹角以及弧形轮廓四个维度进行定量与定性分析,结果如表 1 所示。以放松组和唤醒组窗形态作为自变量,分形维数、开口个数、是否有锐角以及是否有弧形轮廓作为因变量,由于样本数量为 14 ( $n=14<50$ ),采用夏皮洛-威尔克检验对数据正态性进行评估。正态性检验结果显示,仅分形维数维度 14 组数据  $p$  值 $>0.05$ ,符合正态分布,其余三个维度数据均不符合正态分布。

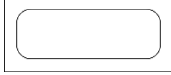


因此对分形维数维度数据采用独立样本  $t$  检验、对开口个数维度数据采用曼-惠特尼  $U$  检验来分析比较两组窗形态的特征差异,针对是否有锐角以及是否有弧形轮廓维度构建  $2\times 4$  联合特征列联表,采用 Fisher-Freeman-Halton 精确检验进行比较分析。结果显示,在分形维数维度,放松组和唤醒组的形式特征存在显著性差异 ( $p=0.048$ ),放松组复杂度(平均数  $M=1.228$ ,标准差  $SD=0.027$ ) 低于唤醒组 ( $M=1.318$ ,  $SD=0.069$ )。在开口个数维度,放松组和唤醒组的形式特征存在显著性差异 ( $p=0.004$ ),放松组开口个数 ( $M=1.000$ ,标准误  $SE=0.000$ ) 低于唤醒组 ( $M=3.571$ ,  $SE=0.719$ ); 是否有锐角以及是否有弧形轮廓维度检验显示两组窗户的锐角-弧形组合分布存在显著关联 ( $p=0.012$ ),效应量 Cramér's  $V=0.63$ ,表示窗形态分组与是否有锐角-是否有弧形轮廓的组合特征之间具有强关联性。放松组显著偏好无锐角与有弧形组合(占比 87.5%),唤醒组显著偏好有锐角与无弧形组合(占比 75.0%),表明弧形轮廓结合无锐角形态是放松组的关键特征,而锐角结合直线轮廓则是唤醒组的关键特征。

### 2.2 主观评价结果

为探究有无自然声音介入对主观情感感知的差异性,以自然声环境(自然声音介入、自然声音缺失)作为自变量,各维度主观评分作为因变量。威尔科克森符号秩检验表明,在放松-唤醒、消极-积极维度的情感体验评分方面,不同声音条件间均存在显著性差异(渐进显著性  $p<0.001$ )。统计分析结果显示:在放松-唤醒维度,自然声音介入条件下的评分 ( $M=2.65$ ,  $SE=0.034$ ) 低于自然声音缺失条件下的评分 ( $M=2.80$ ,  $SE=0.035$ )。在消极-积极效价维度,自然声音介入条件下的评分 ( $M=3.27$ ,  $SE=0.036$ ) 高于自然声音缺失条件下的评分 ( $M=3.14$ ,  $SE=0.034$ ),见图 4(a),这一结果表明,自然声音的介入可适度提升个体的心理放松感和积极情绪。这可能是由于自然声音的引入契合乡村民宿场景中游客对自然休憩的核心预期,通过柔和的听觉体验引发放松反应;而自然声音缺失时产生的场景预期落差,叠加非预期微弱噪声的凸显效应,提高了主观唤醒水平。

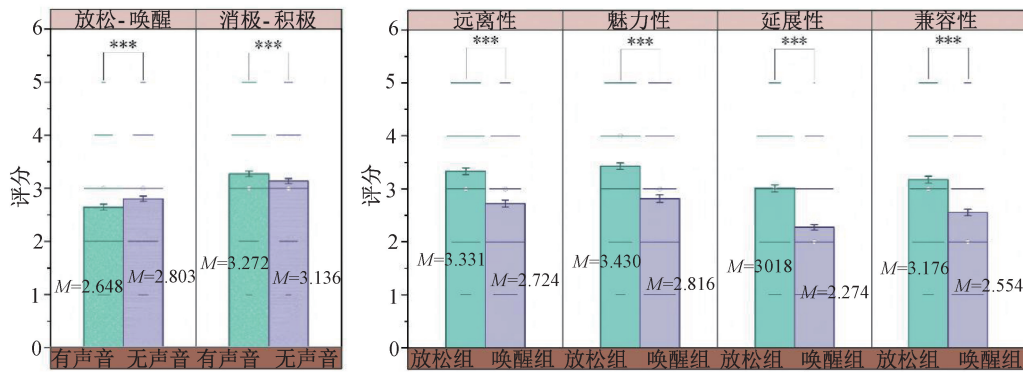
为探究不同窗形态对主观恢复性感知的的影响,以放松组与唤醒组窗形态作为自变量,主观问卷数据作为因变量,采用威尔科克森符号秩检验进行分析。结果显示,两组窗形态的主观问卷

表1 窗形态的形式特征提取  
Tab.1 Form feature extraction of window morphologies

实验组别	窗形态	分形维数	开口个数	是否有锐角 (0表示无,1表示有)	是否有弧形轮廓 (0表示无,1表示有)
放松组		1.193 9	1	0	1
放松组		1.195 2	1	0	1
放松组		1.227 3	1	0	1
放松组		1.225 6	1	0	1
放松组		1.232 2	1	0	1
放松组		1.267 9	1	0	1
放松组		1.252 1	1	0	0
唤醒组		1.369 3	7	0	0
唤醒组		1.354 4	4	1	0
唤醒组		1.334 6	4	1	1
唤醒组		1.326 8	4	0	0
唤醒组		1.393 1	3	1	0
唤醒组		1.245 4	2	0	1
唤醒组		1.202 8	1	1	0

评分存在显著性差异(渐近显著性  $p$  值 $<0.001$ )。具体来看,放松组的主观评价中的远离性( $M = 3.33, SE = 0.042$ )高于唤醒组( $M = 2.724, SE = 0.042$ ),魅力性( $M = 3.430, SE = 0.041$ )高于唤醒组( $M = 2.816, SE = 0.047$ ),延展性( $M = 3.018, SE = 0.039$ )高于唤醒组( $M = 2.274, SE = 0.036$ ),兼容性( $M = 3.176, SE = 0.040$ )高于唤醒组( $M = 2.554, SE = 0.041$ ),见图4(b),结果表明放松组窗

形态能显著提升主观恢复性感知水平,符合个体心理恢复需求。这一结果可能源于放松组窗形态的低分形维数、少开口个数设计增强了室内外自然景观的视觉连通性,帮助个体脱离日常压力场景,进而提升远离性感知;同时低复杂度的设计减少了视觉干扰,更易引发无需刻意投入的自发注意力,凸显魅力性优势。无锐角-有弧形轮廓的设计符合视觉舒适特性,满足了个体对环境的探索



(a) 有无自然声音介入主观评价得分 (b) 窗形态的恢复性感知主观评价得分

图 4 主观评价得分直方图

Fig. 4 Histograms of subjective evaluation scores

需求,推动延展性评分提升;同时与游客寻求放松、恢复体验的核心需求高度匹配,有效降低了环境与需求的冲突感,最终带来更高的兼容性评价。

### 2.3 脑电图数据处理结果

#### 2.3.1 有无自然声音介入对生理反应的影响

以自然声环境(自然声音介入、自然声音缺失)作为自变量,各脑区电极的 $\alpha$ 功率值作为因变量,探究自然声音对大脑活动的影响。采用威尔科克森符号秩检验进行分析,结果显示(图 5),对比自然声音介入和自然声音缺失条件下的 $\alpha$ 功率值,有显著性差异的电极在各脑区均有分布,包括枕叶的 O1、Oz、O2 电极,额叶的 Fp1、F3、Fz、F4、FC1、FC2、FC5、FC6 电极,颞叶的 T7、T8 电极,顶叶的 P3、P4、P7、P8、Pz、CP2、CP6、POz 电极,中央叶

的 Cz 电极,运动皮层的 M1 和 M2 电极。且上述电极自然声音介入组的 $\alpha$ 功率值均高于自然声音缺失组,这表明自然声音可一定程度上促进大脑进入放松状态、舒缓神经活动。可能由于自然声音减少了大脑对乡村民宿场景中非预期人工微弱刺激的警觉性监测,降低认知负荷,又能通过唤起对自然环境的安全信号联想,抑制交感神经兴奋,进而促进大脑各脑区进入低唤醒的休息状态,最终表现为 $\alpha$ 功率值的升高。

#### 2.3.2 自然声环境下窗形态的生理数据

本研究聚焦于自然声环境下不同窗形态的差异化影响,这一分析策略旨在直接回应多模态交互环境设计(视觉窗形态+听觉自然声)的核心问题,优先考察在生态效度更高的真实声背景下视觉窗形态的调节作用,从而避免在非典型的无声

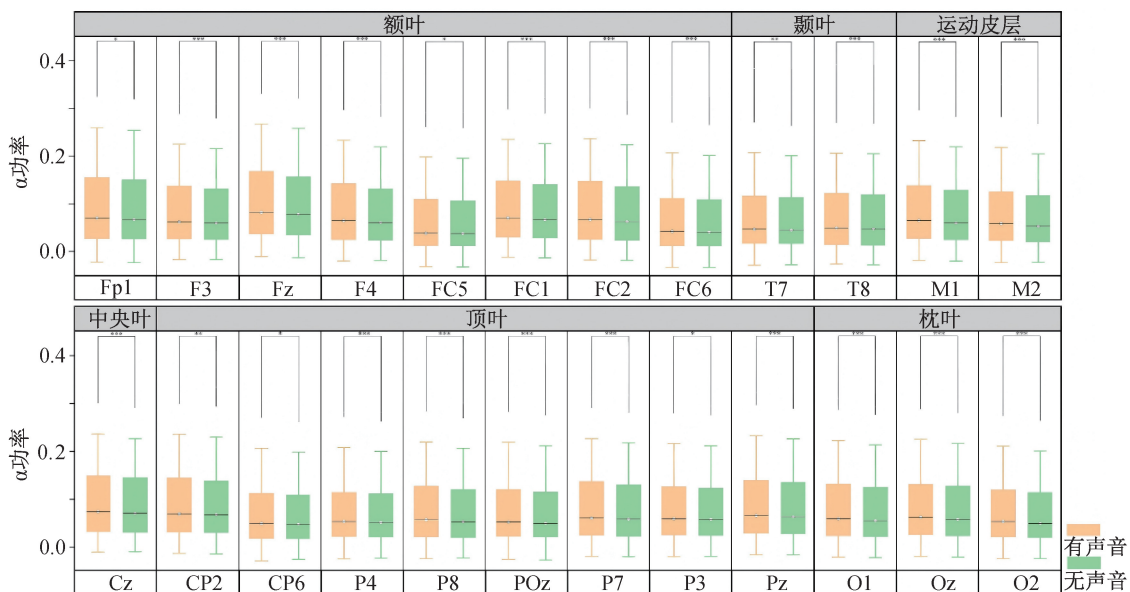


图 5 有无自然声音介入的各电极 $\alpha$ 功率值比较

Fig. 5 Comparison of  $\alpha$ -power across electrodes with versus without natural sound intervention

环境中分析视觉因素可能引入的干扰效应,确保研究结论对于乡村民宿实际场景设计的直接指导价值。为考察不同窗形态对大脑活动的影响,在自然声环境下,以放松组与唤醒组窗形态作为自变量,各脑区电极的 $\alpha$ 功率值为因变量,采用威尔科克森符号秩检验进行分析。结果显示(图6),额叶 Fp1、F3、FC1、FC6 电极,顶叶 P4、CP2、CP5、CP6 电极,中央叶 C4 电极,在放松组和唤醒组窗形态条件下的 $\alpha$ 功率值存在显著性差异,放松组窗形态在额叶、顶叶和中央叶的9个电极的 $\alpha$ 功率值均高于唤醒组,提示窗形态对额叶、顶叶及中央叶的 $\alpha$ 波活动具有特异性调控作用。这一结果可能与 $\alpha$ 波的生理特性相关, $\alpha$ 波功率升高通常伴随大脑皮层兴奋性降低、情绪放松,而放松组窗形态减少了视觉层面的冗余刺激性信息,这种低负荷视觉输入降低了大脑对外部环境的警觉需求,进而促进 $\alpha$ 波的产生与维持。同时,额叶、顶叶及中央叶是视觉-情绪-警觉性整合的核心脑区,对视觉环境特征的敏感性更高,因此窗形态的设计差异可直接作用于该类脑区的信息加工过程,而其他功能特异性脑区未表现出显著效应。

## 2.4 多维相关性分析

为深入探究不同窗形态对个体情感体验的影响,系统分析窗形态特征、脑电生理数据与主观评价之间的相关性。考虑到指标数据均不符合正态分布特征,因此采用斯皮尔曼相关性检验得出相关性系数,结果见图7。窗形态特征与主观体验方面,分形维数、开口个数、是否有锐角三个维度均与恢复性体验各维度及消极-积极效价呈负相关,与放松-唤醒呈正相关,而是否有弧形轮廓维度的关联趋势与前述三个维度相反。这表明低复杂度、少开口、无锐角且有弧形轮廓的窗形态,更利于提升乡村民宿场景的主观恢复性感知与积极情

绪,同时降低唤醒水平。前述三个维度多与脑电 $\alpha$ 功率值呈负相关,仅是否有弧形轮廓与少数电极的 $\alpha$ 功率呈正相关,但与其他多个电极呈负相关,未形成统一关联规律。整体来看,窗形态的低复杂度、少开口、无锐角特征更易促进 $\alpha$ 功率升高,反之则可能抑制 $\alpha$ 功率提升。此外,恢复性体验各维度与积极情绪呈正相关,与唤醒度呈负相关,且远离性、延展性、兼容性维度与额叶、中央叶、顶叶等关键脑区的 $\alpha$ 功率值呈正相关。这验证了主观层面的放松与恢复性体验,与生理层面大脑低唤醒的 $\alpha$ 功率变化具有一致性,说明窗形态通过影响视觉体验,同步调控个体主观感受与生理状态。

## 2.5 讨论

### 2.5.1 自然声环境与窗形态的协同效应

研究显示,在乡村民宿里自然声音被介入后,个体的放松状态和积极情绪明显增强,同时伴随多个脑区 $\alpha$ 波功率的上升,证实了自然声环境在促进心理生理恢复方面有积极作用。这一发现与Nisar等<sup>[21]</sup>的研究相符,也就是说自然声音能有效调节自主神经系统活动,引发放松反应。自然声音作为促进听觉恢复的背景音,显著增强了不同窗形态对神经放松效果的差异影响。在自然声环境中,放松组窗形态相较于唤醒组窗形态更能显著促进 $\alpha$ 波的增强,此现象在额叶、中央叶及顶叶区域尤为明显。这一结果可能表明,窗形态的影响不是单独作用在视觉系统上的,而是嵌入到多模态情境里被整体加工的。弧形轮廓和低复杂度可减轻视觉认知负担,其与自然声音的舒缓特性感知一致,能共同激发放松反应。而高复杂度、多锐角的窗形态可能会因视觉冲突而降低自然声音带来的积极作用。

### 2.5.2 窗形态影响恢复性体验的神经认知路径

研究发现放松组窗形态显著激活额叶、顶叶

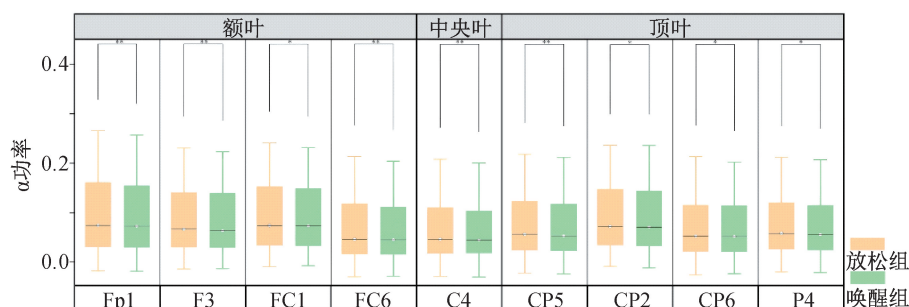


图6 放松组和唤醒组窗形态各电极 $\alpha$ 功率值比较

Fig. 6 Comparison of  $\alpha$ -power across electrodes between the relaxation and arousal groups under different window morphology conditions

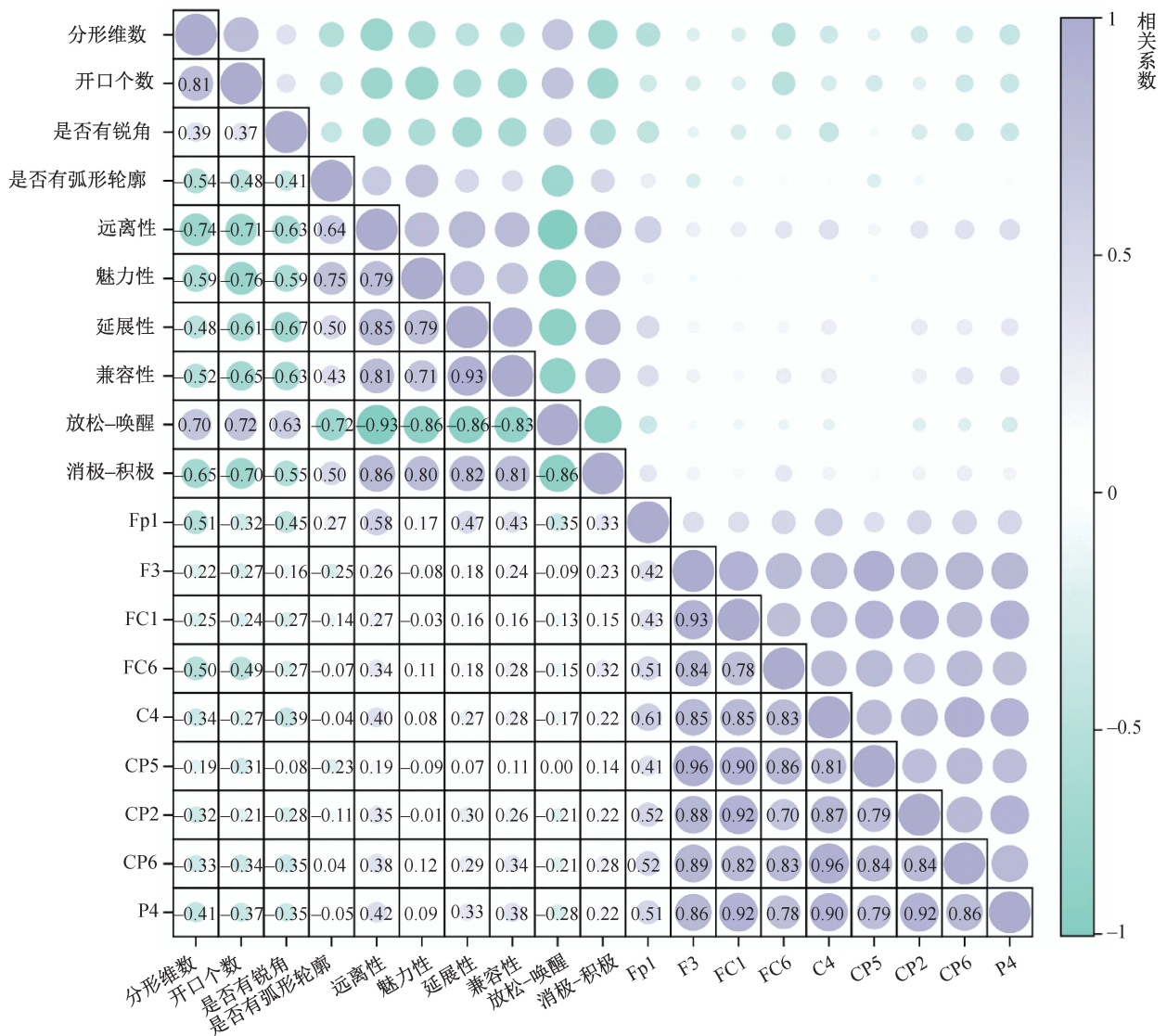


图 7 相关性分析 Fig. 7 Correlation analysis

及中央叶等脑区,而且形成与主观恢复性评价高度相关的响应网络。这印证了窗形态不但对初级视觉加工有影响,还参与了对高级认知与情绪调节的活动。凭借特定的视觉-神经-认知路径调节被试者恢复性体验,具体来讲,额叶的α波活动与远离性呈现显著正相关,在视觉空间感知与恢复性体验里有着复杂的作用,它包含注意分配、感觉信息整合、情绪调节等多种认知过程<sup>[22]</sup>。顶叶与中央叶响应加强了对视觉-空间信息的整合,进而促进心理放松。弧形轮廓凭借增强魅力性与兼容性来促进恢复,锐角和多开口结构会因引入感知冲突而抑制α波活动,阻碍恢复进程。额-顶叶网络通常被视作执行控制网络,它能灵活地跟其他功能脑网络相互作用,还能对其进行调整<sup>[23]</sup>。这些结果共同勾勒出形态特征-脑区响应-主观体验的

级联通路,表明窗形态能借助调节额-顶叶网络活动来影响认知情绪状态,最终促进恢复性体验的形成。

### 2.5.3 多维度关联的整合

窗形态的物理特征和主客观指标间表现出稳定且一致的关联模式,视觉复杂度(分形维数、开口数量、锐角轮廓)和α波功率值及恢复性评价各维度数据呈负相关,印证了视觉复杂度对恢复性体验的抑制作用。弧形轮廓与FP1、CP6等电极的α波功率值及魅力性维度评价呈正相关,但与其他多个电极呈负相关,说明它能通过调节特定脑区活动来促进放松,而不是全脑范围。这些发现都印证了窗形态的视觉属性对调控环境恢复性效能的关键作用,复杂性与尖锐性会带来负向作用,而形态柔和会发挥正向作用。恢复性体验的各个维度与放松-唤醒、消极-积极情绪之间呈现一致性,

此结果验证了 ART 理论框架下四维度结构的整体有效性,表明它们共同指向积极且放松的心理状态。关键在于,远离性、延展性及兼容性与 FP1、C4、P4 等脑区的  $\alpha$  功率值呈正相关,这一结果把主观感知和神经活动有效关联起来,这表明,当个体主观评价恢复性高时,其大脑会有放松的生理表征( $\alpha$  波功率值增强),从神经科学层面证实恢复性体验并不只是主观心理的建构,而是具有客观、可测量的神经基础。

### 3 结论

1) 相较于自然声音缺失组,自然声音介入能够使个体的主观积极情绪与放松感显著提升,且伴随多个脑区  $\alpha$  波功率值升高。

2) 在自然声环境下,窗形态特征对恢复性体验的调控作用显著,低复杂度、少开口数量、弧形无锐角的窗形态可引发更高的主观恢复性评价,引发神经放松状态的  $\alpha$  波功率增强,其主要分布在前额叶、中央叶和顶叶等脑区。高复杂度、多开口、锐角直线轮廓的窗形态会抑制  $\alpha$  波活动,使恢复性体验相应减弱。

3) 窗形态、脑电活动与恢复性体验之间具有相关性,从神经层面验证了注意力恢复理论的生理基础,表明恢复性体验不只是主观心理构建,而有可客观测量的神经活动表征, $\alpha$  功率值指标可作为量化恢复性体验的生理指标。

4) 在实践层面,本研究为乡村民宿窗形态的恢复性体验设计提供了建议:应优先采用弧形轮廓、低复杂度及少开口的形态设计,借助柔和线条弱化视觉张力,减少环境对感知系统的压迫性刺激,降低视觉噪声与认知负荷,促进脑电放松反应;在材质与隔音设计上保留自然声音传入通道,让鸟鸣、风声等听觉刺激与视觉信息形成协同,增强多感官协同恢复效应。

#### 参考文献:

- [1] 李东和,谢珍珍. 乡村民宿的场景要素识别及环境恢复性功能研究——基于旅游者环境恢复性感知视角[J]. 安徽大学学报(哲社版),2024,48(6):176-188.
- LI D H, XIE Z Z. A research on the identification of scene elements and environmental restorative function of rural homestay from the perspective of tourists' restorative perception of environment[J]. Journal of Anhui University (Philosophy and Social Sciences Edition),2024,48(6):176-188.
- [2] YAN Y Y, TAN H J. Research on rural lodging design under the concept of culture and ecology[J]. SHS Web of Conferences,2025,219:01006.
- [3] ABD-ALHAMID F, KENT M, WU Y P. Assessment of window size and layout impact on a view quality perception in a virtual reality environment[J]. Leukos,2024,20(3):239-260.
- [4] KO W H, SCHIAVON S, ALTOMONTE S, et al. Window view quality: why it matters and what we should do[J]. Leukos,2022,18(3):259-267.
- [5] WEI Y Y, ZHANG Y, WANG Y H, et al. A study of the emotional impact of interior lighting color in rural bed and breakfast space design[J]. Buildings,2023,13(10):2537.
- [6] NAGHIBI RAD P, ALI SHAHROUDI A, SHABANI H, et al. Encoding pleasant and unpleasant expression of the architectural window shapes: an ERP study[J]. Frontiers in Behavioral Neuroscience,2019,13:186.
- [7] 任文权. 情感之形:视觉设计中的图形表现对情感的引导研究[J]. 绥化学院学报,2024,44(12):91-93.
- REN W Q. The shape of emotion: a study on the guidance of graphic expression to emotion in visual design[J]. Journal of Suihua University,2024,44(12):91-93.
- [8] SUKO Y, KORPELA K M. Accumulation of self-reported restorative effects of natural sounds: a seven-day intervention indoors[J]. Journal of Environmental Psychology,2024,98:102388.
- [9] BENFIELD J A, TAFF B D, NEWMAN P, et al. Natural sound facilitates mood recovery[J]. Ecopsychology,2014,6:183-188.
- [10] REN H G, SHI M Q, ZHANG J. Research contents, methods and prospects of emotional architecture based on a systematic literature review[J]. Buildings,2024,14(4):997.
- [11] GRASSINI S. EEG for the study of environmental neuroscience[M]//Environmental neuroscience. Cham: Springer Nature Switzerland,2024:547-561.
- [12] CHEN Z, HE Y J, YU Y G. Attention restoration during environmental exposure via alpha-theta oscillations and synchronization[J]. Journal of Environmental Psychology,2020,68:101406.
- [13] SEIZ A, KWEON B S, ELLIS C D, et al. Exploring the psychophysiological effects of viewing urban nature through virtual reality using electroencephalography and perceived restorativeness scale measures[J]. Sustainability,2023,15(17):13090.
- [14] REN H G, ZHENG Z M, ZHANG J, et al. Electroencephalography (EEG)-based comfort evaluation of free-form and regular-form landscapes in virtual reality[J]. Applied Sciences,2024,14(2):933.
- [15] JEON J Y, JO H I, LEE K. Psycho-physiological restora-

- tion with audio-visual interactions through virtual reality simulations of soundscape and landscape experiences in urban, waterfront, and green environments[J]. *Sustainable Cities and Society*,2023,99:104929.
- [16] 范昭诗. 养老服务驿站内室内交互界面对老年人情绪及恢复性效益的影响研究[D]. 北京:北京建筑大学,2024.
- FAN Z S. A study of the effects of indoor interactive interfaces on the mood and restorative benefits of older adults in a senior care station [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2024.
- [17] BUXTON R T, PEARSON A L, ALLOU C, et al. A synthesis of health benefits of natural sounds and their distribution in National Parks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,2021,118(14):e2013097118.
- [18] 徐婧雯,方旭艳. 基于分形理论的传统商肆建筑的形态对比分析[J]. *华中建筑*,2024,42(12):89-94.
- XU J W, FANG X Y. Comparative morphological analysis of traditional commercial buildings based on fractal theory[J]. *Huazhong Architecture*,2024,42(12):89-94.
- [19] SUN B. The analysis of synchronous and influencing factors on building facade opening and architectural design [J]. *Applied Mechanics and Materials*,2012,174/175/176/177:1619-1622.
- [20] LIANG Z Q, CHO T Y. A study on effects of architectural surface characteristics on sharp shape threat perception[J]. *Korea Institute of Design Research Society*, 2022,7(3):46-60.
- [21] NISAR H, ONG Y N, MAHMOOD D. Analyzing the effect of relaxing natural sounds on the human brain during alpha up-regulation neurofeedback training [C]//2024 IEEE 8th International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA). Kuala Lumpur, Malaysia:IEEE,2024:1-5.
- [22] HELFRICH R F, HUANG M, WILSON G, et al. Prefrontal cortex modulates posterior alpha oscillations during top-down guided visual perception[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,2017,114(35):9457-9462.
- [23] MAREK S, DOSENBACH N U F. The frontoparietal network: function, electrophysiology, and importance of individual precision mapping [J]. *Dialogues in Clinical Neuroscience*,2018,20(2):133-140.

(责任编辑 唐彦彦)

(上接第60页)

- [13] 李建康. 粉煤灰再生混凝土护坡砌块的设计与应用研究[D]. 济南:山东大学,2020.
- LI J K. Design and application of fly ash recycled concrete revetment block[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [14] 姜健. H型重力互助式钢渣芯混凝土护岸砌块的设计与应用研究[D]. 济南:山东大学,2018.
- JIANG J. The design and application of H gravity mutual aid steel slag core concrete revetment block[D]. Jinan: Shandong University,2018.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 堤防工程设计规范:GB 50286—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of levee project: GB 50286—2013[S]. Beijing: China Planning Press,2013.
- [16] 戎伟,吴跃东,刘坚,等. H型预应力混凝土护岸桩现场试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2023,40(1):15-20.
- RONG W, WU Y D, LIU J, et al. Research on field test of H-type prestressed concrete revetment piles[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*,2023,40(1):15-20.
- [17] 潘军宁,王登婷,吴美安,等. 波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2005(4):476-481.
- PAN J N, WANG D T, WU M A, et al. Experimental study on stability of concrete block revetment under wave action [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2005(4):476-481.
- [18] 毛昶熙. 堤防工程手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- MAO C X. Dikes engineering manual [M]. Beijing: China Water & Power Press,2009.
- [19] 蒋宗燕,潘宝雄. 船行波的研究和研究趋势[J]. *中国港湾建设*,2000(6):34-38.
- JIANG Z Y, PAN B X. Study on ship waves and tendency of study [J]. *China Harbour Engineering*,2000(6):34-38.
- [20] 张玉清. 铰接式混凝土砌块护坡稳定性数值分析及应用研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2011.
- ZHANG Y Q. A study on numerical analysis of joint concrete block for slope protection and its application research[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2011.

(责任编辑 王利君)