

# 激光与光电子学进展

## 不同照明环境对声光融合效应的贡献

居家奇, 许珂, 王玥, 刘聚坤, 金妍\*

上海应用技术大学理学院, 上海 201418

**摘要** 利用生理参数变化及情绪变化研究了声光融合效应问题, 系统探讨了西方大调、小调音乐、3 种单色光源(波长分别为 623, 537, 445 nm)与 2 种不同色温(色温分别为 3000, 6000 K)白光对人体的影响。实验结果表明, 人们对音乐的生理响应强于灯光的刺激作用, 双因素刺激下的生理感知度比单因素更强烈, 且音乐在声光融合环境中起主导作用。音乐和灯光双环境因素同时刺激情绪时, 会产生交互作用, 且两情绪正相关的环境刺激叠加可以增强情绪的感知, 为音乐灯光表演秀或沉浸式互动照明的设计提供了理论支撑和意见。

**关键词** 视觉光学; 声光融合; 生理参数; 情绪评价; 照明应用; 灯光; 音乐

中图分类号 TM923

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0733003

## Contribution of Different Lighting Environments to Sound-Light Fusion Effects

Ju Jiaqi, Xu Ke, Wang Yue, Liu Jukun, Jin Yan\*

School of Science, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

**Abstract** In this paper, the sound-light fusion effect has been studied based on physiological parameters and subjective emotional changes. The influence of western major music, western minor music, 3 kinds of monochromatic lighting (wavelengths of 623, 537, 445 nm) and 2 kinds of white lighting with different color temperatures (color temperature of 3000, 6000 K) on the human body is systematically discussed. The experimental results show that people's physiological response to music is stronger than that of the lighting stimulus. The physiological perception under dual-factor stimulation is stronger than that of single-factor, and sound plays a major role in the sound-light fusion environment. Music and light interact when they stimulate emotions at the same time. The superposition of two positively related emotional environmental factors can strengthen the effect on emotions. It provides theoretical support and opinions for the design of music and light show or immersive interactive lighting.

**Key words** visual optics; sound-light fusion; physiological parameter; emotional evaluation; lighting application; lighting; music

## 1 引言

色彩是光线通过刺激眼睛传输到大脑视觉中枢产生的一种感觉, 而颜色的冷/暖和亮/暗属性差异对人们情绪的影响, 是由人类性别、年龄、教育背

景和文化差异等诸多因素决定的<sup>[1]</sup>, 但目前还没有确切的理论依据可以解释颜色对情绪的影响规律, 且早期关于颜色的心理研究受个人颜色偏好等主观方面的影响较大<sup>[2]</sup>。色彩对情绪诱导的影响也较大<sup>[3]</sup>, 一般来说, 颜色样本越鲜艳, 情绪反应越积

收稿日期: 2021-06-23; 修回日期: 2021-07-15; 录用日期: 2021-08-05

基金项目: 上海联盟计划(LM201836)、上海高峰高原计划

通信作者: \*jinyan2467@163.com

极<sup>[4]</sup>,而光照度和颜色饱和度的差异直接影响着个人行为以及心理、生理学<sup>[5-7]</sup>。

通感一词源自希腊语的同义词,意为“联合感官”,被描述为一种感觉的结合<sup>[8]</sup>。对大多数人来说,一种特定的物理刺激会产生单一的、单峰的知觉体验。但对于有罕见通感现象的个体来说,特定的物理刺激会引起不止一种知觉体验。如听到特定的声音可能会引起人们对颜色、味道或气味的生动体验,就像看到视觉符号(如字母或数字)一样<sup>[8]</sup>。通感不受任何自主控制的影响,是一个类似感觉的过程,可解释为大脑特定区域之间的异常沟通<sup>[9-11]</sup>。假设音乐和颜色在同一个个体上激发了相似的情绪,个体就会在情感上将二者联系起来,即声光通感<sup>[12]</sup>。在声光通感方面,部分人的听觉会自动引出一个明确而可靠的视觉体验。如钢琴上的音符“C”可能是红色的,比其高 3 个八度的音符可能是绿色的;桌子上尖锐的敲击声可能引起微弱但清晰的窄闪光<sup>[12]</sup>,这表明唤起积极情绪的音乐与鲜艳颜色有关<sup>[13]</sup>。

已有研究表明,声光通感现象是普遍存在的,但对音乐与灯光颜色的结合使用,即声光融合的研究较少。因此,本文对人体进行了无创生理参数测量及主观问卷调查,研究了基于情绪反应的声光融合效应。而辅助音乐背景下的光照环境是否会比单独使用一种环境刺激更容易引起情绪变化仍是一个经验性问题,因此,进一步通过实验探究了这种组合可能对情绪产生的影响。

## 2 实验设置

### 2.1 受试者

20 名本科生和研究生(男/女各 10 人)自愿参加该实验测试,年龄为 20~27 岁(均值为 22.7,标准差为 1.78),受试者均无听觉问题,且通过了色盲及色弱测试。实验前受试者被告知了完整的实验流程,实验前三天,要求受试者正常有规律的作息并避免接触茶、咖啡、药物等影响血压、心率(HR)的物品。实验时间为每日 13:00—18:00,以保证受试者处在相近的生物节律周期中。

### 2.2 实验室环境

在暗室(已屏蔽噪音)中自行搭建实验环境<sup>[14]</sup>,如图 1 所示。实验区域的尺寸为 1.6 m×2 m×3 m,暗室内壁涂有吸光材料,温度范围为 22~24 ℃,湿度稳定在 74%~78% 范围内。采用可

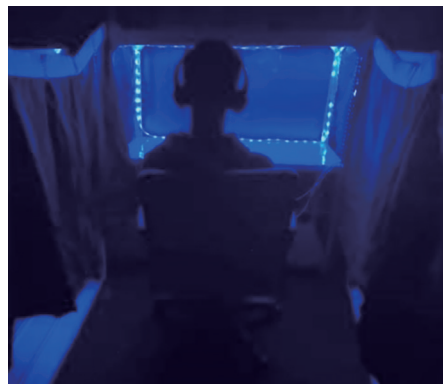


图 1 实验环境

Fig. 1 Experiment environment

控照明系统(飞利浦智能灯带 HUE)建立照明环境,照明装置被安装在测试机架的顶部。为了使受试者不直视光源以避免可能出现的残影效应,利用白色平台形成的漫反射进行瞳孔受光反射实验,同时提升沉浸式氛围感<sup>[15]</sup>。

### 2.3 实验照明条件及音乐片段

在 3 种单色光源(主波长分别为 623, 537, 445 nm)以及 2 种色温(色温为 3000 K 的暖白光和 6000 K 的冷白光)照明条件下进行实验。其中,色温均为色彩相关色温(CCT)。在所有照明条件下,人眼处的照度均为 150 lx,使生理参数的变化仅由光谱功率分布或颜色引起。已有研究表明,即使是昏暗的灯光也会对年轻人的心率造成显著影响<sup>[16]</sup>。用远方公司生产的 HAAS-2000 光色电测试系统测量光源的色温及光谱分布,结果如图 2 所示。

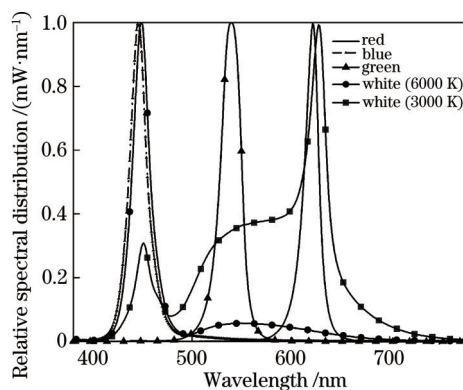


图 2 5 种实验灯光的光谱

Fig. 2 Spectra of 5 experimental lighting

实验前选择大调和小调音乐各 3 首,在单因素刺激下,同时分析了主观情绪效价和唤醒度的变化,从大调和小调中各选出最能引起明显情绪波动且效价差异最大的 1 首音乐进行灯光颜色的匹配,

选取的大调音乐为贝多芬的月光奏鸣曲二,小调音乐为贝多芬的月光奏鸣曲三。每首音乐选取 60 s 作

为刺激片段,每首音乐的分贝值都被设置在相同水平上,如图 3 所示。

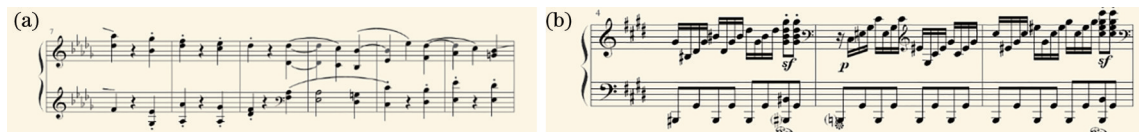


图 3 音乐的节选片段。(a)大调;(b)小调

Fig. 3 Excerpts of the music. (a) Major; (b) minor

### 2.4 主观评价

为了使音乐的情感与灯光色彩相关联,采用了基于 Hevner 模型<sup>[17]</sup>的五维情感空间形容词组,即悲伤(包括沮丧、痛苦、孤独、寂寞)、抚慰(包括懒惰、康复、温暖、怀念、抒情)、幸福(包括欢乐、浪漫、清新、甜蜜、放松)、英勇(包括激情、氛围、鼓舞人心)

和兴奋。主流音乐通常不会引起过于夸张的情绪,如恐惧、惊慌<sup>[18]</sup>,但为了灯光触发情绪实验的完整性,将其中的兴奋选项改为恐惧(包括惊慌、恐怖、不安、紧张)<sup>[19]</sup>。情绪效价由消极到积极分为 5 个离散的情感尺度,每种情绪包括从弱到强共 5 种分值的唤醒度,如表 1 所示。

表 1 主观情绪记录表

Table 1 Record sheet of the subjective emotions

Environment		Fear	Sadness	Soothing	Happiness	Heroism
Music	major	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5
	minor	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5
Lighting	red	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5
	green	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5
	blue	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5
	white (3000 K)	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5
	white (6000 K)	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5	1-2-3-4-5

### 2.5 生理指标

人类对生物信号的敏感性在许多情感理论中起着重要作用,心理感受对身体生物信号的影响能被大脑高精度接收和理解,原因是身体中的重要信号不可能出现错误或隐藏情绪<sup>[20]</sup>,如血压、心率、呼吸频率、皮肤电导的变化<sup>[21-22]</sup>。因此,对内部生物信号的接收和感知在许多情绪理论中起着决定性作用。

心率变化与节律因子具有一定的相关性,心率变化越大,表明音乐或照明产生的生理刺激越强<sup>[23]</sup>。实验的主要生理指标是心率,心率是用于控制反馈信号的生理指标,可用每分钟心跳数(BPM)表示<sup>[24-25]</sup>。缓慢的呼吸与放松相关,而不规则的快速变化和呼吸的停止对应着更高的刺激水平。因此,以每分钟呼吸频率(RESP)为单位测量心率。皮电反射(EDA)也被称为“皮肤上的电现象”,具有一定的心理意义,且能响应汗液分泌导致的皮肤电信号自主性变化<sup>[26]</sup>。当参与者的相位响应高于基线电导时,就会产生 EDA 峰值<sup>[27]</sup>,因此用环境刺激发生后 10 s 内皮肤的电导响应(SCL)峰值作为检验对象。

多个信号的结合可能会提高捕获情绪的准确

性,因此,用心率、呼吸频率及皮肤电的变化情况表征人们对视听环境变化带来的非视觉生物效应,对应数据均由德国 ERGONEERS 公司的无线人体生理数据记录系统 PhysioLab 记录。其中,心率测量采取 3 导联的方式将电极片分别置于图 4(a)所示位置,扫描速度为 1000 Hz。呼吸频率通过放置在胸部的传感器实现测量,皮肤电极位于手掌表面,如图 4(b)、图 4(c)所示。

### 2.6 实验进程

实验的具体进程如图 5 所示。首先,在受试者阅读相关研究信息并签署同意后,为其讲解实验流程,每个参与者都佩戴用于测量生理参数的设备,并填写一份背景信息问卷。然后,为受试者佩戴并调整蓝牙降噪耳机(索尼 WH-H800)。实验开始前,受试者静坐于基线场景 5 min,以记录基线生理反应,捕捉中立情绪。

实验设置的 3 种环境刺激情况:1) 2 种单因素音乐刺激环境(大调音乐及小调音乐各 1 首);2) 5 种单因素灯光颜色刺激环境(红光、绿光、蓝光、暖白光、冷白光);3) 10 种双因素声光融合刺激环境

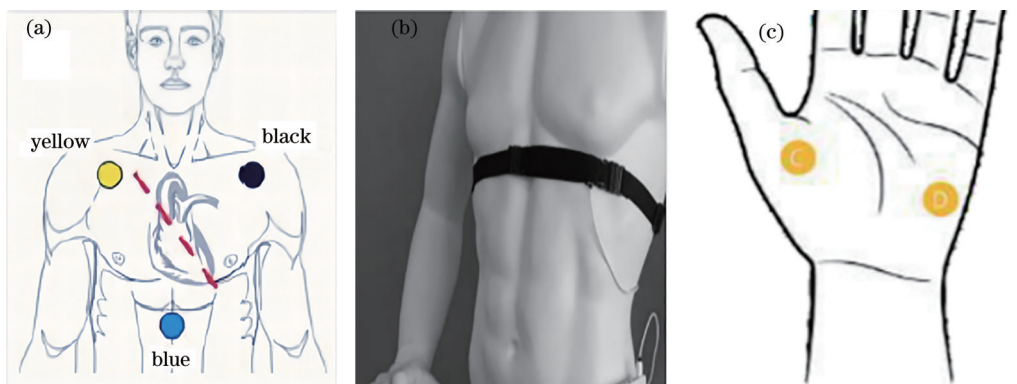


图 4 电极的放置。(a) HR;(b) RESP;(c) EDA

Fig. 4 Placement of electrodes. (a) HR; (b) RESP; (c) EDA

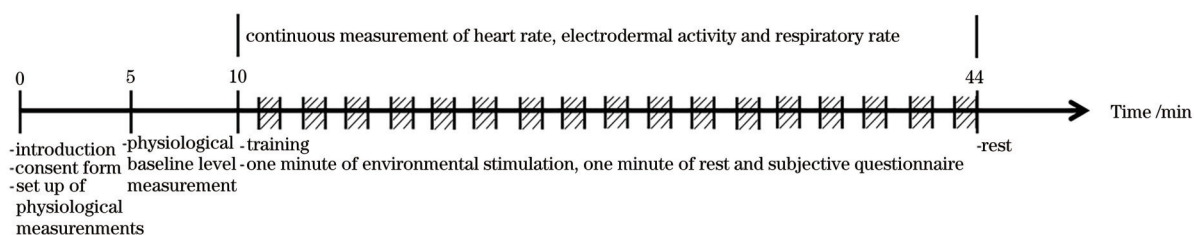


图 5 实验进程概述

Fig. 5 Overview of the experiment process

(音乐与灯光互相匹配)。每种刺激持续时间为 1 min,紧接着进入 1 min 的情绪平复阶段,然后填写主观问卷,且主观问卷只出现在单因素刺激之后。所有受试者均参加了 17 个不同的环境场景,并在光线照射和不受光照条件下睁开眼睛。为了避免潜在的顺序效应,采用随机播放音乐或灯光模式的方式。整个实验过程中持续记录各种生理参数的变化,实验时间约为 50 min。

### 2.7 数据分析

数据分析均使用软件 SPSS 25.0 (IBM, 美国), 根据 Quantile-Quantile (Q-Q) 图和直方图得到主观参数及生理参数值的分布,结果表明,两者均服从正态分布(概率  $P > 0.05$ )。采用单因素方差分析 (ANOVA), 即  $F$  检验对主观评价的情绪效价及唤醒值进行显著性分析,以确定实验采用的环境刺激

因素在情感方面是否具有统计学意义。采用配对  $T$  检验对生理参数及基线值进行对比分析,得到单因素及双因素刺激导致的生理参数变化情况,以确定哪个因素在声光融合效应中更重要。

## 3 数据处理结果及分析

### 3.1 不同单因素环境对主观情绪的影响

情绪是个人心理状态与环境影响相互作用的心理体验<sup>[28]</sup>。情感效价和唤醒度的概念可根据大脑中特定的动机系统解释<sup>[29]</sup>。主观评价数据的 ANOVA 结果如表 2 所示,其中,\*表示  $P < 0.05$ ,\*\*表示  $P < 0.01$ ,\*\*\*表示  $P < 0.001$ 。可以发现,实验采用的刺激环境在效价( $F = 7.419, P = 0.000$ )和唤醒度( $F = 3.344, P = 0.004$ )上都具有统计学意义。

表 2 不同音乐和灯光环境下的 ANOVA 结果

Table 2 ANOVA results under different music and lighting environments

Variable	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	$F$	Significant difference
Valence	52.796	6	8.799	7.419	0.000***
Arousal	24.171	6	4.029	3.344	0.004**

对于每种单因素刺激环境,用其评价指标的平均值除以标准差得到标准化的效价和唤醒度<sup>[30]</sup>。

不同刺激环境下情绪效价-唤醒度的二维坐标如图 6 所示,可以发现,7 种单因素环境的评分很好地

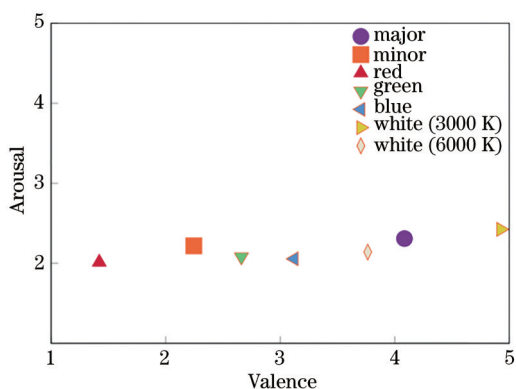


图 6 情绪效价-唤醒度的二维坐标图

Fig. 6 Two-dimensional graph of the emotional valence-arousal covered the dimension of valence, but all were low arousal values. Using valence

分散、唤醒度相似的刺激环境进行实验,以研究相似唤醒程度下不同情绪状态的环境刺激叠加是否可以引起情绪唤醒度的提升或下降。结果表明,小调音乐处于低效价区域,大调音乐处于高效价区域;且不同灯光颜色的情绪标签有明显差异,即三原色偏向于低效价,白光偏向于高效价。

### 3.2 音乐对生理反应的影响

对音乐环境刺激下的生理参数及基线水平下的生理参数进行配对  $T$  检验,结果如表 3 所示。可以发现,所有听觉条件下人体生理参数都有显著变化 ( $P < 0.05$ ),这表明音乐的确能够触发生理反应,且大调音乐刺激下生理参数变化的显著性大于小调音乐刺激下的显著性。

表 3 不同听觉条件下生理参数的统计分析结果

Table 3 Statistical analysis results of physiological parameters under different auditory conditions

Physiological parameter	Environment variable	Mean	$T$	Degree of freedom	Significant difference
HR	major	4.35	4.992	19	0.000***
	minor	4.00	5.627	19	0.000***
RESP	major	1.75	6.723	19	0.000***
	minor	2.00	3.183	19	0.005**
EDA	major	2.31	4.188	19	0.000***
	minor	1.61	3.672	19	0.002**

### 3.3 灯光对生理反应的影响

对灯光环境刺激下的生理参数及基线水平下的生理参数进行配对  $T$  检验,结果如表 4 所示。可

以发现,所有视觉条件下人体心率及皮肤电反应都有显著变化 ( $P < 0.05$ ),但在呼吸频率方面只有暖白光刺激时有显著变化。

表 4 不同视觉条件下生理参数的统计分析结果

Table 4 Statistical analysis results of physiological parameters under different visual conditions

Physiological parameter	Environment variable	Mean	$T$	Degree of freedom	Significant difference
HR	red	2.55	6.831	19	0.000***
	green	2.90	5.966	19	0.000***
	blue	3.70	5.230	19	0.000***
	white (6000 K)	3.20	4.272	19	0.000***
	white (3000 K)	4.05	3.803	19	0.001**
RESP	red	-0.30	-0.468	19	0.645
	green	1.40	1.945	19	0.067
	blue	1.15	1.769	19	0.093
	white (6000 K)	2.00	2.538	19	0.020*
	white (3000 K)	-0.88	-1.131	19	0.272
EDA	red	1.66	4.248	19	0.000***
	green	1.30	4.299	19	0.000***
	blue	1.45	3.676	19	0.002**
	white (6000 K)	1.50	3.917	19	0.001**
	white (3000 K)	1.86	4.134	19	0.001**

### 3.4 声光融合对生理反应的影响

同时给予受试者音乐和灯光的双因素刺激,并

将其生理反应与基线水平进行配对  $T$  检验,结果如表 5 所示。可以发现,所有双因素刺激下的心率都

表 5 声光融合条件下生理参数的统计分析结果

Table 5 Statistical analysis results of physiological parameters under dual-factor stimulation

Physiological parameter	Environment variable	Mean	<i>T</i>	Degree of freedom	Significant difference
HR	major+red	3.80	3.930	19	0.001**
	major+green	4.30	4.729	19	0.000***
	major+blue	4.85	5.585	19	0.000***
	major+white (6000 K)	4.55	7.418	19	0.000***
	major+white (3000 K)	3.05	4.686	19	0.000***
	minor+red	2.85	5.284	19	0.000***
	minor+green	4.50	5.142	19	0.000***
	minor+blue	2.80	6.057	19	0.000***
	minor+white (6000 K)	4.50	4.974	19	0.000***
	minor+white (3000 K)	5.00	5.398	19	0.000***
RESP	major+red	3.70	2.563	19	0.019*
	major+green	1.70	2.138	19	0.046*
	major+blue	-0.15	-0.178	19	0.860
	major+white (6000 K)	0.30	0.188	19	0.853
	major+white (3000 K)	0.65	0.933	19	0.363
	minor+red	2.40	4.366	19	0.000***
	minor+green	2.10	2.666	19	0.015*
	minor+blue	2.05	2.523	19	0.021*
	minor+white (6000 K)	0.95	2.111	19	0.048*
	minor+white (3000 K)	1.75	6.723	19	0.000***
EDA	major+red	1.46	3.547	19	0.002**
	major+green	1.33	3.550	19	0.002**
	major+blue	1.05	3.215	19	0.005**
	major+white (6000 K)	1.59	3.962	19	0.000***
	major+white (3000 K)	1.25	3.559	19	0.002**
	minor+red	0.61	2.976	19	0.008**
	minor+green	0.87	2.630	19	0.017*
	minor+blue	1.01	3.303	19	0.004**
	minor+white (6000 K)	0.71	2.660	19	0.015*
	minor+white (3000 K)	1.43	3.332	19	0.004**

有明显反应,大调音乐与红光及绿光的叠加对呼吸频率有显著影响,小调音乐与所有灯光颜色效应的叠加对呼吸频率都有显著影响。单因素红光和绿光本身对呼吸频率没有显著影响,但叠加音乐刺激后二者均有显著的反应。在皮肤电反应方面,所有

双因素刺激条件下都有显著的反应。

### 3.5 单双因素刺激下的生理反应对比

在刺激环境对人体生理参数有显著影响的基础上,进一步分析了单双因素刺激下生理反应的差异,结果如表 6 所示。灯光颜色刺激与双因素刺激

表 6 灯光环境刺激与双因素环境刺激下的生理参数对比

Table 6 Comparison of physiological parameters between light and two-factor environmental stimulus

Physiological parameter	Single-factor environment variable	Dual-factor environment variable	Mean	<i>T</i>	Degree of freedom	Significant difference
HR	blue	minor+blue	-2.40	-2.239	19	0.037*
	white (6000 K)	major+white (6000 K)	-0.91	-2.535	19	0.020*
EDA	red	minor+red	1.05	3.095	19	0.006**
	white (6000 K)	minor+white (6000 K)	0.79	2.381	19	0.028*

的结果表明,在心率方面,小调音乐与蓝光的叠加效应比单因素蓝光的效应有显著升高;在皮肤电反应方面,大调音乐与暖白光的叠加效应比单因素暖白光的效应有显著升高;小调音乐与红光的叠加效应比单因素红光的效应有显著降低,小调音乐与暖白光的叠加效应比单因素暖白光的效应有显著降低。

### 3.6 数据处理结果的分析

主观调查结果表明,大调音乐的效价明显高于小调音乐;且在低照度下,单色照明激发的情绪不如白光积极。主要结论如下。

#### 1) 音乐比灯光更能引起强烈的生理反应

对单因素刺激下的生理参数测量结果表明,大调音乐更能引起人们情绪的共鸣,唤醒度较高。心率和皮肤电反应对灯光的反应都具有显著性,但在呼吸频率方面仅有暖白光与基线值具有显著差异。对比音乐和灯光对生理参数的影响发现,音乐对人体的影响大于灯光,即同时进行听觉和视觉刺激时,大脑更倾向于先处理听觉上的感受<sup>[31]</sup>。

#### 2) 音乐能提高人们在灯光环境中的情绪感知能力

声光融合刺激下的生理参数变化显示,双因素环境刺激下的心率和皮肤电反应均有显著变化。相比单一照明环境刺激,叠加音乐刺激后的环境对人体的影响更强烈,如大调音乐与暖白光叠加刺激下的皮肤电反应( $P=0.000$ ),小调音乐与蓝光叠加刺激下的呼吸频率( $P=0.021$ ),小调音乐与冷白光叠加刺激下的呼吸频率( $P=0.000$ ),这表明双因素环境会引起更强烈的生理指标波动,且音乐可以增强人们在照明环境中的情绪感知能力。

#### 3) 音乐与灯光环境效应的匹配非常重要

在双因素环境刺激与单因素灯光环境刺激下,小调音乐与冷色调蓝光的叠加刺激比单因素蓝光刺激下的心率更快( $T=-2.239, P=0.037$ ),大调音乐与暖白光的叠加刺激比单因素暖白光刺激下的皮肤电反应更强烈( $T=-2.535, P=0.020$ )。此外,两种正相关的情绪环境刺激叠加对情绪的影响更强烈,受试者生理指标的变化程度大于单因素刺激,即附加在灯光颜色环境下的音乐条件与其情感维度一致时,情感唤醒度可能会增强。

## 4 结 论

对音乐与色彩通感现象进行了研究,并通过声光融合实验清楚解释了该现象,对照明景观的设计

具有一定的理论和实用价值。实验结果表明,音乐可以增强人们对灯光颜色的感知显著性,在感官感受中,人们倾向于先处理听觉上的感受;在灯光环境下叠加音乐刺激会使情绪唤醒度更高,即音乐在声光融合环境中起主效应作用。大调音乐与暖色调白光或小调音乐与冷色调蓝光的环境融合可以提升人们的情绪唤醒程度,增强共情性。音乐和灯光双环境因素对情绪同时刺激时具有交互作用,带有正相关情绪影响的环境刺激叠加时,会加强情绪的感觉作用;相反,则会减弱情绪的感觉作用。此外,该结论还揭示了生理参数作为声光融合感知的可行性,皮肤电反应在捕捉情绪信号强度方面最为敏感,可作为之后研究的重点实验方法。

## 参 考 文 献

- [1] Demir Ü. Investigation of color-emotion associations of the university students[J]. Color Research & Application, 2020, 45(5): 871-884.
- [2] Jacobs K W, Hustmyer F E. Effects of four psychological primary colors on GSR, heart rate and respiration rate[J]. Perceptual and Motor Skills, 1974, 38(3): 763-766.
- [3] Jonauskaitė D, Althaus B, Dael N, et al. What color do you feel? Color choices are driven by mood[J]. Color Research & Application, 2019, 44(2): 272-284.
- [4] Manav B. Color-emotion associations and color preferences: a case study for residences[J]. Color Research & Application, 2007, 32(2): 144-150.
- [5] Babin B J, Hardesty D M, Suter T A. Color and shopping intentions: the intervening effect of price fairness and perceived affect[J]. Journal of Business Research, 2003, 56(7): 541-551.
- [6] Ru T T, de Kort Y A W, Smolders K C H J, et al. Non-image forming effects of illuminance and correlated color temperature of office light on alertness, mood, and performance across cognitive domains[J]. Building and Environment, 2019, 149: 253-263.
- [7] Wang Y J, Huang H J, Chen G. Effects of lighting on ECG, visual performance and psychology of the elderly[J]. Optik, 2020, 203: 164063.
- [8] Curwen C. Music-colour synaesthesia: concept, context and qualia[J]. Consciousness and Cognition, 2018, 61: 94-106.
- [9] Moon C B, Kim H, Lee H A, et al. Analysis of relationships between mood and color for different musical preferences[J]. Color Research & Application, 2014, 39(4): 413-423.

- [10] Merrill J, Omigie D, Wald-Fuhrmann M. Locus of emotion influences psychophysiological reactions to music[J]. *PLoS One*, 2020, 15(8): e0237641.
- [11] Thind N S, Gupta M, Kumar S. Consumer buying decisions: a study on mood buying based on music, lighting and color[J]. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 2020, 7(7): 2199-2205.
- [12] Whipple G M. Two cases of synaesthesia[J]. *The American Journal of Psychology*, 1900, 11(3): 377-404.
- [13] Moon C B, Kim H, Lee D W, et al. Mood lighting system reflecting music mood[J]. *Color Research & Application*, 2015, 40(2): 201-212.
- [14] Tian H J, Guan T, Cai M P, et al. Evaluation model of VDT visual comfort based on pupil diameter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 153301.  
田会娟, 关涛, 蔡敏鹏, 等. 基于瞳孔直径的 VDT 视觉舒适度评价方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 153301.
- [15] Lin J, Westland S. Effect of long-wavelength light on electroencephalogram and subjective alertness[J]. *Lighting Research & Technology*, 2020, 52(6): 763-774.
- [16] Ju J Q, He L, Li Z B, et al. Biological effects of color lighting for different ages[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 236/237: 787-791.
- [17] Hevner K. Expression in music: a discussion of experimental studies and theories[J]. *Psychological Review*, 1935, 42(2): 186-204.
- [18] Jiang Y J, Zhao J W. Subjective evaluation of the correlation of pop music emotion and lighting color [C]//2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), October 19-21, 2019, Suzhou, China. New York: IEEE Press, 2019: 19297163.
- [19] Hanada M. Correspondence analysis of color-emotion associations[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43(2): 224-237.
- [20] Moharreri S, Dabanloo N J, Maghooli K. Modeling the 2D space of emotions based on the Poincare plot of heart rate variability signal[J]. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 2018, 38(4): 794-809.
- [21] Haag A, Goronzy S, Schaich P, et al. Emotion recognition using bio-sensors: first steps towards an automatic system[M]//André E, Dybkjær L, Minker W, et al. *Affective dialogue systems. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2004, 3068: 36-48.
- [22] Kong L Q, Chen F, Zhao Y J, et al. Non-contact psychological stress detection combining heart rate variability and facial expressions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0310003.  
孔令琴, 陈飞, 赵跃进, 等. 融合心率变异性与表情的非接触心理压力检测[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0310003.
- [23] Al-Ayash A, Kane R T, Smith D, et al. The influence of color on student emotion, heart rate, and performance in learning environments[J]. *Color Research & Application*, 2016, 41(2): 196-205.
- [24] Wilms L, Oberfeld D. Color and emotion: effects of hue, saturation, and brightness[J]. *Psychological Research*, 2018, 82(5): 896-914.
- [25] Fatima M, Zafar H, Sana M T, et al. Investigating the effect of different wavelength of light on heart rate variability and perfusion index[C]//2018 2nd International Conference on Biomedical Engineering (IBIOMED), July 24-26, 2018, Bali, Indonesia. New York: IEEE Press, 2018: 16-19.
- [26] Caruelle D, Gustafsson A, Shams P, et al. The use of electrodermal activity (EDA) measurement to understand consumer emotions: a literature review and a call for action[J]. *Journal of Business Research*, 2019, 104: 146-160.
- [27] Bulagang A F, Weng N G, Mountstephens J, et al. A review of recent approaches for emotion classification using electrocardiography and electrodermography signals[J]. *Informatics in Medicine Unlocked*, 2020, 20: 100363.
- [28] Liu T B, Zhang L T, Yu W T, et al. Hierarchical LSTM-based audio and video emotion recognition with embedded attention mechanism[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(2): 0210017.  
刘天宝, 张凌涛, 于文涛, 等. 基于嵌入注意力机制层级 LSTM 的音视频情感识别[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(2): 0210017.
- [29] Lang P J. The emotion probe[J]. *American Psychological Association*, 1995, 50(5): 372-385.
- [30] Soleymani M, Koelstra S, Patras I, et al. Continuous emotion detection in response to music videos[C]//2011 IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG), March 21-25, 2011, Santa Barbara, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 803-808.
- [31] Lee I E, Latchoumane C V, Jeong J. Arousal rules: an empirical investigation into the aesthetic experience of cross-modal perception with emotional visual music [J]. *Frontiers in Psychology*, 2017, 8: 440.