



照明参数对不同色调中国绘画的偏好度 影响及计算模型

党睿, 赵芮雪, 谭慧姣

(天津大学 天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室/建筑学院, 天津 300072)

摘要 中国馆藏绘画文物作为中国传统文化的重要载体,是我们坚定文化自信的关键支撑。考虑到绘画文物价值的传递,博物馆照明不仅需要考虑文物保护,还须提升观众视觉体验,尤其是在不同照明条件下对绘画的偏好度感知。该研究在天津大学实验舱模拟博物馆真实光环境,根据中国馆藏绘画特征选取了具有代表性的冷色调、暖色调以及中性色调绘画作为实验对象,从环境照度(E)、光源保真度(R_f)、光源饱和度(R_g)3方面参数设置照明工况,选取30名观察者通过主观评价实验获取了不同照明工况下对不同色调绘画的偏好度评分。结果显示,提高环境照度有利于提升观察者对于3种绘画的偏好度。对冷色调和暖色调绘画而言,当环境照度较低时,绘画的偏好度随 R_f 增加而增加,反之,两者呈负相关。而中间色调绘画的偏好度在3种照明工况下均随 R_f 的增加而降低,相比之下, R_g 对观察者偏好度的影响最低。通过多元线性回归分析,建立针对不同色调绘画的偏好度计算模型,即基于3个照明参数预测中国绘画的偏好度评分,该模型为优化馆内绘画文物的照明设计提供依据。

关键词 博物馆照明;馆藏绘画;偏好度;照明设计

中图分类号: TU113.6 DOI: 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2025-02-015

Calculation model for lighting quality of Chinese paintings in museums

DANG Rui, ZHAO Ruixue, TAN Huijiao

(Tianjin Key Laboratory of Building Physical Environment and Ecological Technology/
School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract As an important carrier of traditional Chinese culture, China's collection of paintings and cultural relics is the key support for our firm cultural confidence. Considering the transmission of the value of paintings and cultural relics, museum lighting not only needs to consider the protection of cultural relics, but also to enhance the visual experience of the audience, especially the perception of the preference of paintings under different lighting conditions. This study simulated the real light environment of the museum in the experimental chamber of Tianjin University, and selected representative cold-tone, warm-tone and neutral-tone paintings as the experimental objects according to the characteristics of the paintings in the Chinese collection, and set the lighting conditions in terms of the environmental illuminance E , the fidelity of the light source R_f , and the saturation of the light source R_g , and selected 30 observers to obtain the preference scores of paintings of different

收稿日期: 2024-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(52078331);天津市杰出青年科学基金(20JCJCJC00200)。

第一作者: 党睿,男,教授,博士生导师,从事建筑光学基础理论、技术创新、工程应用研究, dr_tju@163.com。

通信作者: 谭慧姣,女,博士,助理研究员,从事文化遗产保护性照明研究, jiaovver@163.com。

colours under different lighting conditions through the subjective evaluation experiments. The results showed that increasing the ambient illuminance was favourable to the painting of different hues under different lighting conditions. The results show that increasing the ambient illuminance is conducive to increasing the observers' preference for the three kinds of paintings; for warm and cool paintings, when the ambient illuminance is low, the preference for paintings increases with the increase of Rf value. Conversely, the two were negatively correlated. The preference for mid-tone paintings decreased with increasing Rf for all three lighting conditions; in contrast, Rg had the lowest effect on observer preference. Through multiple linear regression analysis, a preference calculation model for paintings with different colour tones was established, the preference scores of Chinese paintings were predicted based on three lighting parameters. The model provides a basis for optimising the lighting design of paintings and cultural relics in the museum.

Keywords museum lighting; paintings in the collection; visual preference; lighting design

中国馆藏绘画文物存量巨大,内容丰富,是中国文化传承的重要载体^[1]。出于对文物的保护,博物馆绘画展厅的光环境具有色温低、照度低等特点^[2]。随之带来的是展厅空间中昏暗的照明环境,严重降低了观众的体验感,进而影响绘画文物价值的传递。因此,在进行文物保护的前提下,需要以提升观众视觉体验为目,进行馆内照明环境设计^[3]。其中,偏好度是衡量观众对照明条件的重要主观评价标准,反映了观众对照明条件的偏好程度^[4]。目前,量化评估不同照明参数下观众对馆藏绘画的偏好度,是亟待解决的问题。

通过对国内外研究动态梳理得知,Jost-Boissard 采用并列配对比较法^[5],发现 CIECAM02 统一颜色空间可以更有效地评估感知的颜色差异,基于色域的指数能够很好地描述色彩的鲜艳度和饱和度,并且发现偏好度与基于色域的指数之间具有最好的相关性;Bhattacharjee 等研究了在不同照明参数下,观众对馆藏绘画的偏好度变化^[6],实验结果表明,照明参数如色温、照度等对观众的偏好具有显著影响,随着色温的增加,观众的偏好度呈现先增加后降低的趋势;Khanh 研究了在博物馆颜色质量评价指标中的偏好度、生动度和自然度^[7],建立了新的色彩质量公式。然而,现有研究主要由国外学者完成,研究对象为油画等西方文物类型。西方绘画在色彩表达上注重写实,中国馆藏绘画的色彩表达则相对含蓄,注重整体画面颜色的协调统一^[8]。由此可知,中西方绘画在色彩上存在显著差异,相关结论并不相互适用。而现有研究很少从照明参数出发,探讨其对中国绘画的偏好度影响的量化规律。

本研究模拟低照度、低色温的绘画展厅环境,改变照明参数开展中国绘画偏好度评分的主观评

价实验,得到不同照明参数对绘画的偏好度影响规律,并建立能够对上述规律进行数学表征的模型,将数智技术与文物保护相结合^[9],为优化馆内绘画文物的照明设计提供依据。

1 实验概况

1.1 实验光源

馆藏绘画文物的照明环境中包含环境照明和重点照明。考虑到展柜内的重点照明因绘画文物的高光敏感性须不高于 50 lx ^[10],故环境照度(E)是馆内照明设计的重要环节。对于馆内照明光源的选择,美国照明工程学会(Illuminating Engineering Society of North America, IES)提出的颜色质量评价体系 TM-30 标准中,光源保真度(Rg)和光源色域指数(Rf)决定了光源的显色质量^[11]。其中,Rg 指数衡量了颜色色域指数的改变,而 Rf 指数衡量了颜色偏移的改变^[12]。因此,本研究从 E、Rf 和 Rg 这 3 个照明参数的角度开展实验。

由于文物安全等限制,真实展厅中不适合实验。在天津大学全尺寸可调实验舱中,我们搭建了模拟博物馆真实光环境的文物展厅,作为实验环境(见图 1)。该实验区域平面 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$,高度 4.2 m ,仅使用人工照明,不涉及日光。根据中国馆藏绘画保护标准^[13]和 LEDCube 配光阈值,设定重点和环境照明光源的色温为 $3\ 100 \text{ K}$ ^[14]。此外,重点照明照度为 40 lx ,环境照明的照度梯度设置为 0 、 10 、 38.2 lx 。为最大程度地囊括各种颜色质量水平,在 Rf 区间 $[80, 96]$ 、Rg 区间 $[93, 107]$ 内选取均匀梯度分布的 12 种光源光谱参数^[15-18],并通过 THOUSLITE LEDCube 型 LED 光源进行照明工况的输出。



图1 博物馆实验室的整体环境

Fig.1 The overall environment of the museum laboratory

1.2 绘画样本

从精神内涵、文化表达和艺术表现上来看,写意画是中国馆藏绘画的重要组成部分^[19]。在中国写意画作中,基于光谱反射率的色域指数标定

可以帮助区分不同类型的馆藏绘画,即根据光谱位于 555 nm 两侧的面积和谱形来量化地对冷色、暖色、中性色进行区分和定义^[20]。其中,冷色调绘画主要为淡绿,暖色调绘画主要为淡黄,中性色调绘画主要为墨底淡赭石。因此,代表性绘画样本的选择需要满足以下 3 点要求:①涵盖中国馆藏绘画主要色系,保证实验普适性;②包含清晰色块,便于判断颜色差异;③不同创作风格,避免画风影响实验结果^[21]。据此,选择了 3 幅代表性绘画作为本次实验的冷色调、暖色调和中间色调绘画样本(见图 2)。实验时将绘画平放在灯箱中,同时在灯箱底部铺上灰色吸光布以防止灯箱自身材质的颜色及反射性对实验结果造成影响。最后,在累计形成的 108 种评价工况(3 幅典型绘画,3 种环境照度,12 种光源光谱参数)下展开偏好度评价实验。



图2 绘画样本

Fig.2 Paintings sample

1.3 被试选择及问卷

30 名观察者参与了视觉感知评价试验,男女比例为 1:1,均为天津大学在读本科生和研究生,年龄分布在 20~28 岁,平均年龄为 25 岁,均通过了 Ishihara 色盲测试,视力或矫正视力正常。

被试通过观察展柜内绘画,对画面总体颜色外貌进行感知评价。对于每组工况,被试需要进行偏好度的评价。当使用连续量表研究 1 个问题时,只需给定连续数字量表端点的语义反应,就可以通过标度区间模型得到任何数字答案所对应的语义结果,从而有效提高实验结果的准确性和普适性^[22]。Kalmijn 等开发了一个使用不同语言标定的连续[0,10]数字量表端点的语义转换数据库^[23],在本研究中,从中选择了程度词“verybad”和“very good”分别标定端点 0 和端点 10,以设计视觉感受问卷。受试者在完成对每个工作条件的适应后,在印在纸上的上述连续[0,10]刻度上标

记问卷评价价值。

1.4 实验过程

评价过程中,观察者每日上午 8:00—11:00 和下午 2:00—4:00 参与实验,以消除生物节律影响。被试到达博物馆后,先适应低照度低色温环境 10 min,并换上黑色服装减少反射干扰,期间可自由参观。实验步骤如下。

1) 为避免顺序效应,为每位被试制定特定打分顺序。实验前,乱序播放工况以熟悉样本,并展示极端工况明确评价范围。随机抽取 3 个工况练习,确保理解打分要求。工况间休息 2 min,以减轻疲劳。

2) 被试坐至评价点,实验者简述流程及注意事项。

3) 闭眼休息,实验灯箱随机切换光源。

4) 30 s 后睁眼适应,欣赏指定绘画。

5) 60 s 后打分,30 s 内完成。

- 6)重复步骤 2)、3)、4)直至完成所有光源评价。
- 7)为验证可信度,随机选择 4 个工况复评。
- 8)每幅画后休息 5 min,防视疲劳。
- 9)每日完成 1 名被试实验,约 3 h。
- 10)更换被试,重复上述步骤,直至 30 名完成。

2 照明参数对偏好度影响规律

为确定不同风格颜色绘画是否会对评价结果产生影响,对 3 幅画的偏好度评价结果分别进行

表 1 不同类型绘画偏好度相关性
Tab. 1 Correlation of preference for different types of paintings

绘画色调	系数	偏好度 1	偏好度 2	偏好度 3
冷色调绘画	皮尔逊相关性	1	0.748 **	0.591 **
	Sig. (双尾)	—	0.000	0.000
	个案数	36	36	36
暖色调绘画	皮尔逊相关性	0.748 **	10.575 **	—
	Sig. (双尾)	0.000	0.000	—
	个案数	36	36	36
中间色调绘画	皮尔逊相关性	0.591 **	0.575 **	1
	Sig. (双尾)	0.000	0.000	—
	个案数	36	36	36

注: ** 表示该相关系数在 $p < 0.01$ (99% 置信度) 的显著性水平下具有统计学意义。

2.1 冷色调绘画

从图 3 可以看出,偏好度评分随着环境照度的增加呈现明显的上升趋势,即较高的环境照度对于增加冷色调画面的偏好度有利。因此,在博物馆展示场所的照明设计中,适当增加环境照度以降低照度对比度,可以提高文物的展示效果和视觉体验,从而更好地吸引观者的注意力。

Rf 和 Rg 对冷色调绘画偏好度的影响规律如图 4 所示。对于不同的环境照度条件,Rf 与偏好度评分的关系呈现出复杂性。在低环境照度条件下,增加 Rf 可以提高偏好度;而在高环境照度条件下,过高的 Rf 可能导致画面效果寡淡和眩光问题,从而降低偏好度评分^[26]。在 3 种环境照度下,选择 Rg 适中的光源可以更好地还原画面的色彩,提高观察者对冷色调绘画的偏好度评分。

2.2 暖色调绘画

对于暖色调画面来说,随着环境照度的增加,观察者对其偏好度评分呈现出明显的上升趋势

皮尔逊相关性分析(见表 1)。皮尔逊相关系数^[24] (Pearson correlation coefficient) 用来度量 2 个变量 X 和 Y 线性相关性的强弱,取值为 -1 到 1。相关系数大于 0 代表变量之间正相关,小于 0 说明变量之间负相关。当被关联量的皮尔逊相关系数绝对值越接近 1,说明二者相关性越强^[25]。

3 幅典型绘画两两之间皮尔逊相关性指数均在 0.8 以下,证明 3 幅画的评价结果的皮尔逊相关性较低,即对于不同色调类型的绘画,人眼的偏好度感知是不同的。因此,需要将 3 幅画的评价结果进行分开讨论。

(见图 5)。其中,当环境照度从 0 增加到 10 lx 时,暖色调画面的偏好度评分变化不大。然而,随着环境照度的继续增加,暖色调画面的色彩呈现和立体感得到进一步提升,由此提升了观察者的偏好度。

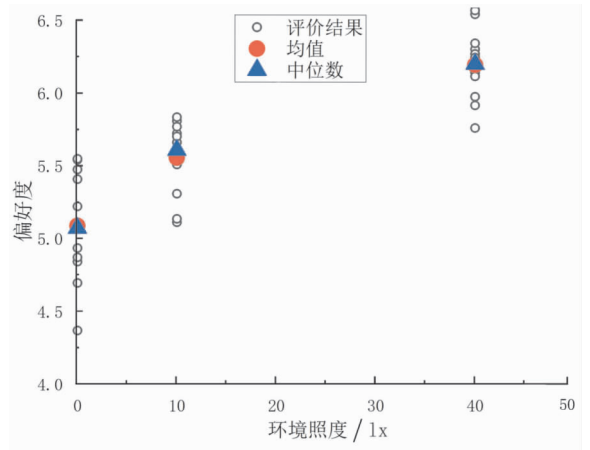


图 3 环境照度对于冷色调绘画偏好度的影响
Fig. 3 Patterns of ambient illuminance on preference for cold-tone paintings

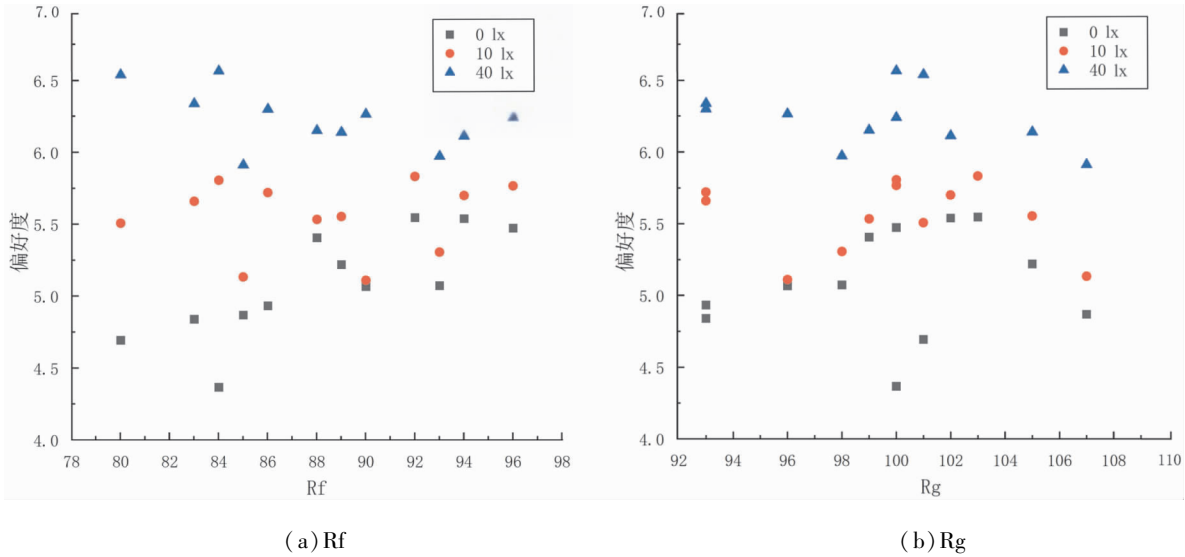


图 4 Rf 和 Rg 对于冷色调绘画偏好度的影响
Fig. 4 Laws of Rf and Rg on the preference for cold-tone paintings

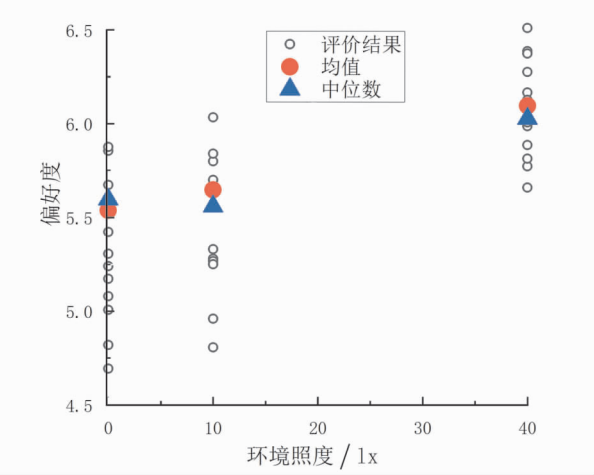


图 5 环境照度对于暖色调绘画偏好度的影响
Fig. 5 Patterns of ambient illuminance on preference for warm-tone paintings

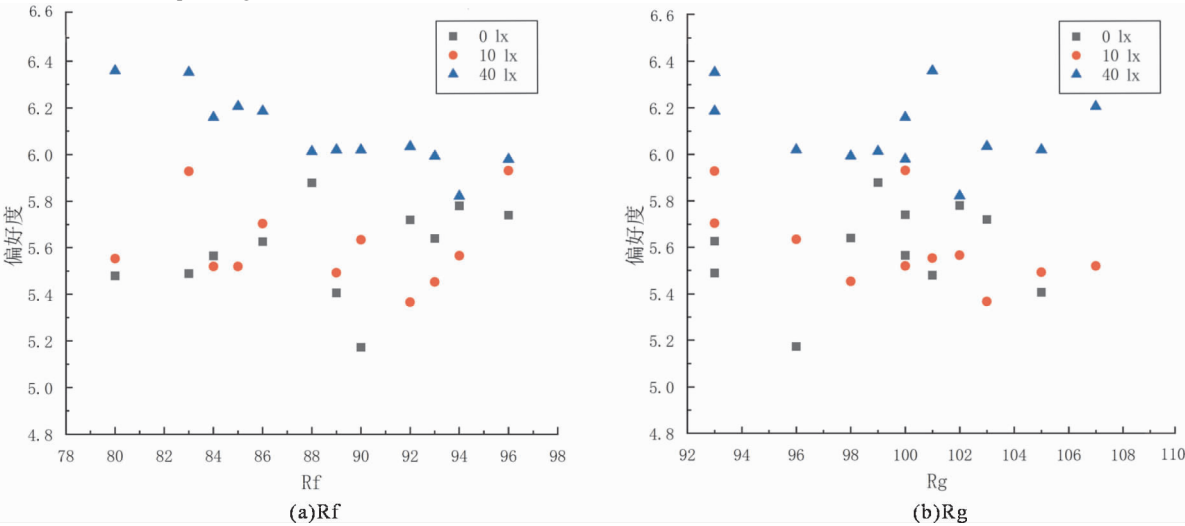


图 6 Rf 和 Rg 对于暖色调绘画偏好度的影响
Fig. 6 Laws of Rf and Rg on the preference of warm-tone paintings

如图 6(a)所示,在低照度条件下,增加 Rf 可以提高画面偏好度;而在高照度条件下,过高的 Rf 会降低偏好度。其原因可能在于,在低照度环境下,暖色调绘画的 Rf 提高,能够掩盖低照度环境中的一些缺陷和不足,进而提高偏好度评分。高 Rf 可能导致画面效果刺眼和颜色过于热烈,从而降低偏好度^[27]。如图 6(b)所示,选择适中的 Rg 能够更好地突出暖色调绘画的色彩和细节,提高画面的自然感和美感,提高观察者对画作的偏好度评分。

2.3 中性色调绘画

对于中性色调画面来说,随着环境照度的增加,观察者对其的偏好度呈现出明显的上升趋势(见图 7)。然而,在 3 种不同的环境照度下,随着 Rf 的增加和 Rg 的降低,中性色调绘画的偏好度降低(见图 8)。其原因可能为,中性色调本身不具有强烈的情感属性,相较于暖色调或冷色调,它们往往不容易引发观众的情感共鸣。随着 Rf 的增加和 Rg 的降低,让画面中的色彩失去平衡,破坏画面的整体和谐度,导致观众眼睛感到疲劳和不适等问题。

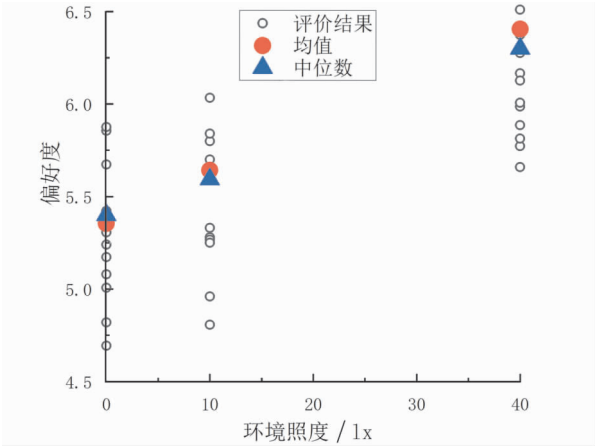


图 7 环境照度对于中性色调绘画偏好度的影响
Fig.7 Patterns of ambient illumination on preference for neutral-tone painting

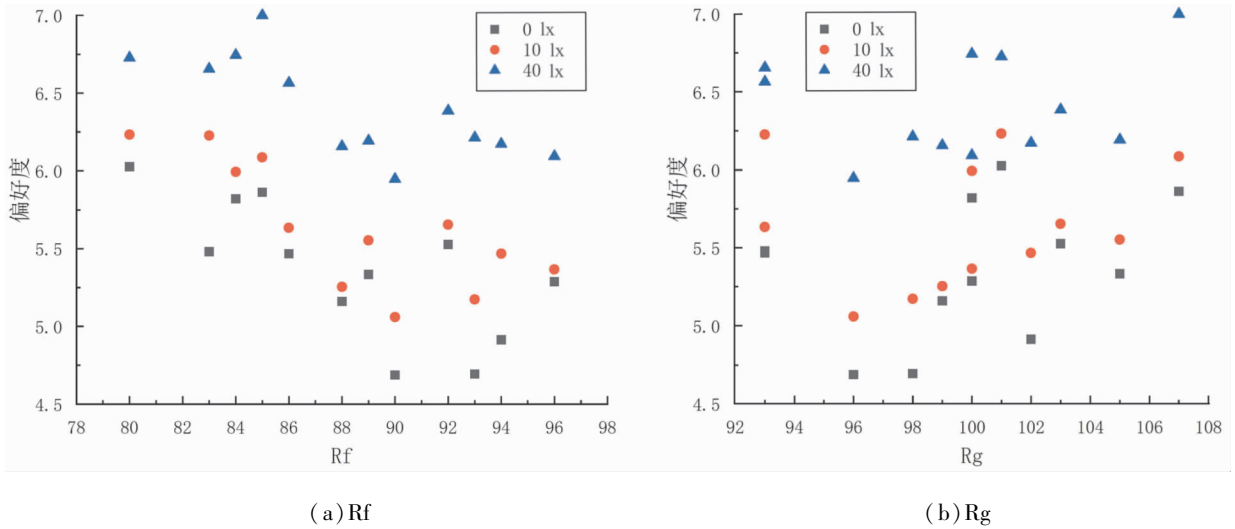


图 8 Rf 和 Rg 对于中性色调绘画偏好度的影响
Fig.8 Laws of Rf and Rg for the preference of neutral-tone paintings

3 偏好度评价的计算模型

通过对照明参数影响偏好度的规律进行分析,发现没有 1 个照明参数能够单独且准确地反映人眼的偏好度感知。因此,选取 E 、 R_f 、 R_g 3 个照明参数作为代表性指标,构建了关于中国绘画偏爱度的计算模型。

$C_p = C_0 + C_1 E + C_2 R_f + C_3 R_g$ (1)
式中: C_p 表示绘画偏好度的预测值; C_0 为常数项; C_1 、 C_2 、 C_3 表示需要拟合的 3 个回归系数。在 SPSS 软件内,通过最小二乘法基于实验光谱的 E 、 R_f 、 R_g 数据和偏好度的主观评价结果,确定模型参数。冷色调、暖色调和中间色调的绘画模型公式

(2)、(3)、(4) 所示,

$$C_{p冷} = 0.027E + 0.016R_f - 0.004R_g + 4.179$$

(2)

$$C_{p暖} = 0.014E - 0.004R_f - 0.009R_g + 6.808$$

(3)

$$C_{p中} = 0.026E - 0.063R_f + 0.028R_g + 8.160$$

(4)

为了验证偏好度评价模型的计算准确性,利用配对 t 检验方法对计算值与评价值进行分析(见表 2)。结果表明,冷色调、暖色调和中间色调绘画的配对数据均未呈现出差异性($p > 0.05$)^[28],这说明在这 3 种色调的绘画中,计算值与评价值的匹配度较高,即模型的计算准确性较高。

表 2 不同类型绘画偏好度模型配对 *t* 检验和相对误差分析结果

Tab.2 Results of paired *t*-tests and relative error analyses for different types of drawing preference models

绘画色调	平均值	标准偏差	标准误差平均	差值 95% 置信区间		<i>t</i>	自由度	Sig. (双尾)
				下限	上限			
冷色调绘画	0.000	0.279	0.047	-0.096	0.096	0.000	34	1.000
暖色调绘画	0.000	0.176	0.030	-0.061	0.061	0.000	33	1.000
中性色调绘画	0.000	0.226	0.038	-0.077	0.077	0.000	35	1.000

4 结语

本研究在模拟博物馆的真实环境中进行主观评价实验。根据中国馆藏绘画特征,选取了 3 种不同色调的代表性绘画,从环境照度(E)、光源保真度(Rf)、光源色域指数(Rg)3 方面参数设置照明工况。通过主观评价实验获取了观察者对于不同照明工况的偏好度评分。基于主观评价实验结果,分析得到了不同照明参数对于不同类型绘画偏好度的影响规律。结果显示,提高环境照度有利于提升观察者对于 3 种绘画的偏好度。对冷色调和暖色调绘画而言,当环境照度较低时,绘画的偏好度随 Rf 数值增加而增加,反之,两者呈负相关。而中间色调绘画的偏好度在 3 种照明工况下均随 Rf 的增加而降低,相比之下,Rg 对于观察者视觉感知的影响最低,选择适中的 Rg 数值可以更好地还原画面的色彩,提高观察者对绘画的偏好度评分。

通过多元线性回归分析,建立了冷色调、暖色调和中性色调绘画偏好度评价模型。可以用于预测给定照明参数对不同色调绘画的偏好度评分,为馆藏绘画文物照明设计提供实用方法。

参考文献

[1] 党睿,刘杰,刘刚,等. 构成白光 LED 的单色光对中国淡彩绘画色彩的影响[J]. 发光学报, 2017,38(11):1545-1552.
DANG R, LIU J, LIU G, et al. Effects of monochromatic light constituting white LED on the color of Chinese pale-colored paintings[J]. Journal of Luminescence, 2017,38(11): 1545-1552.

[2] 王璐. 视觉特性下博物馆空间光环境的应用与研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.

[3] 艾晶. 美术馆照明质量评估方法与体系的研究[J]. 照明工程学报, 2018, 29(5):10-14, 84.
AI J. Research on lighting quality assessment method

and system for art museums[J]. Journal of Lighting Engineering, 2018, 29(5): 10-14, 84.

[4] 孙星灿. 中国绘画照明光源的颜色质量评价方法及参数阈值[D]. 天津:天津大学,2023.

[5] JOST-BOISSARD S, AVOUAC P, FONTOYNONT M. Assessing the colour quality of LED sources: Naturalness, attractiveness, colourfulness and colour difference[J]. Lighting Research & Technology, 2015, 47(7): 769-794.

[6] BHATTACHARJEE A, PAL S. Preferred combination of color temperature and illuminance by the viewers for viewing paintings displayed under LED lighting[J]. Journal of Optics, 2022, 51(1): 115-123.

[7] KHANH T Q, BODROGI P. Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 3: Experiments with makeup products and analysis of the complete warm white dataset[J]. Lighting Research & Technology, 2018, 50(2): 218-236.

[8] 李永清. 当代漆画工艺与绘画性统一的应对策略研究[J]. 包装工程, 2014, 35(24):4.
LI Y Q. Coping strategies of contemporary lacquer painting process and unity of painting[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(24): 4.

[9] 孙满利, 邓凯, 沈云霞, 等. 数智技术在文物预防性保护中的应用现状及前景[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2025,55(1):23-35.
SUN M L, DENG K, SHEN Y X, et al. The application and prospect of digital intelligence technology in the proactive conservation of heritage preservation[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2025, 55(1): 23-35.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 博物馆照明设计规范:GB/T 23863—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社,2009.

[11] Illuminating Engineering society of North America. IES method for evaluating light source color rendition[M]. New York: IESNA, 2015.

[12] DANG R, LIU W, TAN H J. Recommendations on the correlated color temperature of light sources for traditional Chinese paper relics in museums[J]. LEUKOS,

2024, 20(1): 1-8.

[13] 荆其诚. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

[14] DANG R, LIU R, LUO T. Lighting quantity indexes for lighting paintings in museums [J]. Building and Environment, 2020, 182: 107142.

[15] 姚征帆. 论 LED 在博物馆、美术馆照明应用中的重要性[J]. 文艺生活, 2017(7): 127-129.

YAO Z F. On the importance of LED in the application of lighting in museums and art galleries [J]. Literary Life, 2017(7): 127-129.

[16] 周怀东. LED 照明技术在博物馆的应用浅析[J]. 照明工程学报, 2013, 24(5): 45-50.

ZHOU H D. Application of LED lighting technology in museums analyzed [J]. Journal of Lighting Engineering, 2013, 24(5): 45-50.

[17] 黄天宏. LED 照明技术的研究和设计实例[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.

[18] 代丹, 陈寅生. LED 照明技术应用现状与发展趋势[J]. 建筑电气, 2014, 33(12): 14-20.

DAI D, CHEN Y S. LED lighting technology application status and development trend [J]. Construction Electricity, 2014, 33(12): 14-20.

[19] 徐改. 中国古代绘画[M]. 北京: 商务印书馆, 2010.

[20] 王胜军. 中国文人山水画艺术风格简论[J]. 中州学刊, 2009(5): 297-298.

WANG S J. A brief discussion on the artistic style of Chinese landscape painting [J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2009(5): 297-298.

[21] 季晨. 博物馆陈列用光研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.

[22] ALBAUM G, BEST R, HAWKINS D. Continuous vs discrete semantic differential rating scales [J]. Psychological Reports, 1981, 49(1): 83-86.

[23] KALMIJN W M, ARENDS L R, VEENHOVEN R. Happiness scale interval study, methodological considerations [J]. Social Indicators Research, 2011, 102(3): 497-515.

[24] 冷建飞, 高旭, 朱嘉平. 多元线性回归统计预测模型的应用[J]. 统计与决策, 2016, 32(7): 82-85.

LENG J F, GAO X, ZHU J P. Application of multiple linear regression statistical forecasting model [J]. Statistics and Decision Making, 2016, 32(7): 82-85.

[25] 杨奇明, 林坚. 组内相关系数: 定义辨析、估计方法与实际应用 [J]. 浙江大学学报(理学版), 2013, 40(5): 509-515

YANG Q M, LIN J. Intra-group correlation coefficient; Definition identification, estimation method and practical application [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2013, 40(5): 509-515.

[26] 翟其彦, 罗明. 博物馆 LED 照明的显色质量对绘画作品的视觉影响 [J]. 照明工程学报, 2017, 28(4): 13-17.

ZHAI Q Y, LUO M. Visual effects of color rendering quality of museum LED lighting on paintings [J]. Journal of Lighting Engineering, 2017, 28(4): 13-17.

[27] 刘蕊. 基于视觉和保护的博物馆绘画照明 LED 光谱优化[D]. 天津: 天津大学, 2020.

[28] 娄迪. 照度对比度对视觉任务表现和视疲劳影响的实验研究 [J]. 照明工程学报, 2022, 33(6): 35-43.

LOU D. An experimental study on the effects of illumination contrast on visual task performance and visual fatigue [J]. Journal of Lighting Engineering, 2022, 33(6): 35-43.

(编辑 李波)