

DOI:10.11918/202111087

照明环境对交互阅读视觉和认知的影响

王立雄^{1,2},孔光燕^{1,2},张丽娟^{1,2},于 娟^{1,2},吴雨婷^{1,2}

(1. 天津大学 建筑学院,天津 300072;2. 天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室(天津大学),天津 300072)

摘 要: 视觉显示终端(visual display terminal,VDT)和纸质文稿共同成为人们生活和学习中不可或缺的阅读媒介,提供适宜的 VDT 与纸质交互阅读照明环境是提升室内照明环境质量、满足人民健康需求的重要发展方向。为探讨照明环境对交互阅读的视觉和认知的影响,采用主观评价、视觉任务绩效和生理指标测量相结合的方法,开展照明环境主客观评价实验。搭建了交互阅读照明环境实验平台,研究了水平照度、照度配比、色温、屏幕亮度 4 项照明参数对交互阅读视觉舒适、视觉功效、视觉疲劳 3 种视觉感知,认知效率和情绪唤醒 2 种认知表现的影响。实验结果显示,水平照度对视觉疲劳影响最大;照度配比主效应对交互阅读的视觉感知和认知表现均有显著影响;光源色温对交互阅读视觉舒适和视觉功效影响最大;VDT 屏幕亮度对交互阅读视觉疲劳、认知效率和情绪唤醒影响最大。根据各相关要素对评价指标的影响分析,得出高视觉舒适且高情绪唤醒的交互阅读最佳照明环境参数为水平照度 750 lx、垂直照度 300 lx(照度配比 2.5)、色温 4 000 K,最佳屏幕亮度为 100 cd/m²;高视觉功效以及高认知效率、低视觉疲劳的交互阅读最佳照明环境参数为:水平照度 300 lx、垂直照度 200 lx(照度配比 1.5)、色温 5 000 K,且屏幕亮度建议为 100 cd/m²。研究结果为交互阅读的照明设计和优化提供依据。

关键词: 照明环境;交互阅读;视觉显示终端;视觉感知;认知效率;照度配比

中图分类号: TU113.6 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2022)11-0067-11

Effects of lighting environment on vision and cognition of interactive reading

WANG Lixiong^{1,2}, KONG Guangyan^{1,2}, ZHANG Lijuan^{1,2}, YU Juan^{1,2}, WU Yuting^{1,2}

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Architectural Physics and Environmental Technology (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: Visual display terminal (VDT) and paper are indispensable reading mediums in people's life. Providing suitable lighting environment for VDT and paper interactive reading is an important development direction to improve the quality of indoor lighting environment and meet public health needs. In order to explore the impact of lighting environment on the vision and cognition of interactive reading, we conducted subjective and objective evaluation experiments by using a combination method of subjective evaluation, visual task performance, and physiological index measurement. An experimental platform was established to study the effects of four lighting parameters (horizontal illuminance, illuminance ratio, color temperature, and screen brightness) on the visual perception (visual comfort, visual efficacy, and visual fatigue) and cognitive performance (cognitive efficiency and emotional arousal) of interactive reading. Experimental results show that for interactive reading, horizontal illuminance had the greatest impact on visual fatigue. Illuminance ratio had a significant impact on visual perception and cognitive performance. The color temperature of the light source had the greatest impact on visual comfort and visual efficacy. The brightness of the VDT screen had the greatest impact on visual fatigue, cognitive efficiency, and emotional arousal. According to parameter analysis, the optimal lighting environment parameters for interactive reading with high visual comfort and high emotional arousal are horizontal illuminance 750 lx, vertical illuminance 300 lx (illuminance ratio 2.5), and color temperature 4 000 K, and the best screen brightness is 100 cd/m². The optimal lighting environment parameters for interactive reading with high visual efficiency, high cognitive efficiency, and low visual fatigue are horizontal illuminance 300 lx, vertical illuminance 200 lx (illuminance ratio 1.5), and color temperature 5 000 K, and the recommended screen brightness is 100 cd/m². The results can provide basis for the lighting design and optimization of interactive reading.

Keywords: lighting environment; interactive reading; visual display terminal (VDT); visual perception; cognitive efficiency; illuminance ratio

收稿日期: 2021-11-18
基金项目: 国家自然科学基金(51678399);
“十三五”国家重点研发计划(2018YFC0705100)
作者简介: 王立雄(1963—),男,教授,博士生导师;
孔光燕(1992—),女,博士研究生
通信作者: 于 娟,601463949@qq.com

数字化媒体的迅猛发展使阅读方式改革进一步深化。《第十八次全国国民阅读调查报告》显示数字化阅读方式和综合阅读方式接触率分别已经达到

79.4% 和 81.3%, 且呈上升态势。视觉显示终端 (visual display terminal, VDT) 与纸质交互阅读是日常学习和工作中不可或缺的阅读模式。VDT 屏幕和纸质文稿分别通过自发光和光线反射实现信息可读, 而交互阅读时视线在 VDT 与纸质文稿之间频繁移动, 对光环境提出了更高的要求。

目前国内外针对照明环境对 VDT 作业的影响展开了大量研究, 主要集中在照明要素对视觉舒适、视觉疲劳和视觉绩效等感知层面的影响。文献[1]通过实验验证了进行 VDT 作业时, 高色温下的视觉舒适性及表现均优于低色温; 文献[2]研究了色温和照度水平对学生短时记忆再认和脑疲劳的影响; 文献[3]通过主观评价实验得出屏幕中心垂直照度为 163 ~ 300 lx 时, 屏幕阅读舒适性最佳; 文献[4]指出光源光色会影响 VDT 阅读时的视觉功效; 文献[5]研究得出工作面照度均匀度、光源色温、阅读背景面反射系数、阅读背景面亮度及 VDT 屏幕亮度对交互阅读舒适的影响; 文献[6]研究得出可通过调节 VDT 背景饱和度提高视觉绩效。除主观评价之外, 部分学者通过客观指标的测量, 研究照明与视觉的关系。文献[7]研究瞳孔变化与视觉适应的函数关系; 文献[8]研究表明最小瞳孔直径可有效评估 VDT 作业视觉疲劳; 文献[9]通过主观舒适评分和脑电信号, 建立数学模型对 VDT 视觉舒适度进行客观描述。现有主要研究多集中在水平照度、色温、屏幕亮度等单一光参数对阅读视觉感知的影响, 未考虑水平纸面照度与垂直视屏面照度比例关系。认知心理学中解释认知效率是采用最佳的心理资源达到学习和解决问题的能力^[10], 应用心理学中提到高

情绪唤醒状态带来的自我认识更清楚^[11]。对于交互阅读来说, 认知效率可看做是学习和记忆能力的体现, 高唤醒程度可使人们对作业内容有更好的反应和清晰的自我认识, 从而提高认知表现。因此交互阅读照明环境设计, 除应关注人的视觉感知外, 更应该了解照明环境对人的认知表现影响。

故本文采用主观评价、视觉任务绩效与生理测量相结合的方法, 在实验室内开展交互阅读照明环境视觉感知和认知评价实验。探讨水平纸面照度与垂直视屏面照度的配比关系, 研究水平照度、照度配比、色温、屏幕亮度多参数, 对视觉舒适、视觉功效、视觉疲劳、认知效率和情绪唤醒 5 种不同生理和心理需求的影响, 得出优选照明参数, 改善 VDT 与纸质交互阅读照明环境。

1 交互阅读照明环境评价实验

1.1 实验设置

为实现照明参数的调控, 综合考虑了灯具配光、灯具与作业面的距离, 并通过 DIALux evo 软件模拟得出灯具布置方案, 兼顾实用性和人体工学, 搭建了交互阅读照明环境研究实验平台, 见图 1(a)。该平台通过调整两个光源的光通量, 实现照度和照度配比的调节。实验空间见图 1(b), 包括实验区和控制区。实验区由低透光率、低反光率的黑丝绒布围合而成, 尺寸为 2.4 m × 1.8 m × 2.4 m, 水平和垂直背景面由低反射系数(0.4)的黑卡纸覆盖。控制区内的照明控制器可实现阅读环境照度配比 1.5 ~ 5.5 范围内的调节, 水平照度 0 ~ 1 000 lx 范围内无极调节, 色温 3 500、4 000、5 000 K 分档调节。

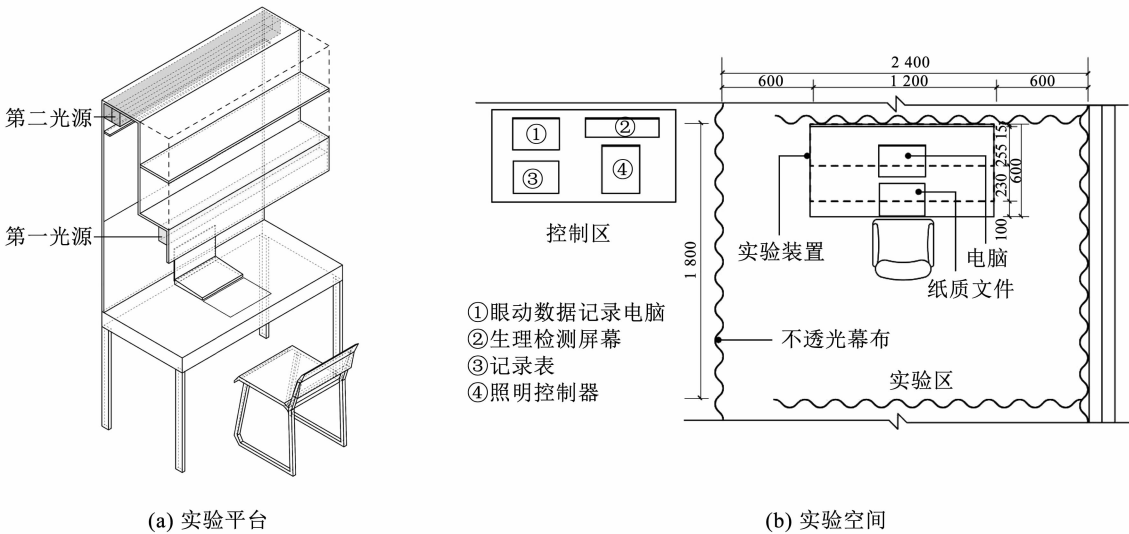


图 1 交互阅读照明环境研究实验平台和空间 (mm)

Fig. 1 Experimental platform and space of interactive reading lighting environment (mm)

根据团队已有研究^[3,5], 水平照度选取 300、500、750 lx, 光源色温选取 3 500、4 000、5 000 K; CIE 标准 S 008/E-2001《室内工作场所照明》中指出主观效果明显可感觉到照度最小变化的照度差约为 1.5 倍, 依据此原则, 照度配比选取 1.5、2.5、5.5; 电脑屏幕亮度根据实际亮度选取 100、180、260 cd/m²。

表 1 实验工况设置
Tab. 1 Experimental conditions setting

组别	编号	照度 配比	水平 照度/ lx	色温/ K	组别	编号	照度 配比	水平 照度/ lx	色温/ K	组别	编号	照度 配比	水平 照度/ lx	色温/ K
组 1 VDT 屏幕 亮度/ (100 cd·m ⁻²)	1-1	1.5	300	3 500	组 2 VDT 屏幕 亮度/ (180 cd·m ⁻²)	2-1	1.5	300	4 000	组 3 VDT 屏幕 亮度/ (260 cd·m ⁻²)	3-1	1.5	300	5 000
	1-2	1.5	500	4 000		2-2	1.5	500	5 000		3-2	1.5	500	3 500
	1-3	1.5	750	5 000		2-3	1.5	750	3 500		3-3	1.5	750	4 000
	1-4	2.5	300	3 500		2-4	2.5	300	4 000		3-4	2.5	300	5 000
	1-5	2.5	500	4 000		2-5	2.5	500	5 000		4-5	2.5	500	3 500
	1-6	2.5	750	5 000		2-6	2.5	750	3 500		3-6	2.5	750	4 000
	1-7	5.5	300	3 500		2-7	5.5	300	4 000		3-7	5.5	300	5 000
	1-8	5.5	500	4 000		2-8	5.5	500	5 000		3-8	5.5	500	3 500
	1-9	5.5	750	5 000		2-9	5.5	750	3 500		3-9	5.5	7 500	4 000

实验设置了抄写和数字串核对任务。抄写任务, 被试需在纸上抄写电脑屏幕上显示的文字, 并在抄写结束后对当前照明环境进行 -3 ~ 3 的舒适度评价; 数字串核对任务, 被试需在屏幕上勾选出与纸质材料不同的数字串, 后台统计正确率。实验过程中被试佩戴生理测量设备。眼动仪记录瞳孔直径、眨眼频率, 评估视觉疲劳^[12]; 无线皮电 (electrodermal activity, EDA) 传感器记录被试的皮电水平 (skin conductance, SC); 无线血容量脉搏 (photoplethysmograph, PPG) 传感器记录被试的心率变异性 (heart rate variability, HRV) 时域分析的两个指标, 分别为相邻心跳间期差值均方的平方根 (root mean square of successive differences, RMSSD) 和平均心率 (average heart rate, AVHR)。其中, SC 和 RMSSD 均可反映交感神经和副交感神经的平衡状态, SC 越低、RMSSD 越高, 副交感神经越活跃, 认知效率较强^[13], 故采用两个生理参数同时作为认知效率的评估指标; AVHR 可表征人的情绪唤醒程度, HR 升高, 个体情绪唤醒增加^[14]。为了排除被试的个体差异, 对 3 项数据进行标准化处理, 均选用变化率为最终评估指标, 变化率公式为

$$\Delta R = \frac{R_{\text{实验测量}} - R_{\text{基线}}}{R_{\text{基线}}} \quad (1)$$

1.2 实验流程

将实验加载于 ErgoLAB 人机环境同步平台, 实

为减少实验次数并避免被试的练习效应, 采用正交实验, 在 Minitab 软件中生成正交实验表, 最终得到 27 种实验工况。为避免因屏幕亮度的更换增加实验复杂程度, 按照屏幕亮度, 将实验工况分为 3 组, 同时被试以 3 种拉丁方组间顺序进行实验, 降低被试在实验过程中的疲劳, 实验工况设置见表 1。

时采集实验过程中被试的生理指标, 实现不同工况下生理数据的自动记录和同步。具体实验包括以下两个阶段:

1) 准备及测试阶段: 保证被试熟知实验流程和注意事项、正确佩戴生理指标测量仪器, 并在全黑环境下对被试进行 5 min 的生理指标基线采集。

2) 视觉任务实验阶段:

工作人员在实验平台输入被试名称和实验组编号, 进行第一组正式实验;

工作人员调节照明环境、屏幕亮度参数, 使实验环境达到相应工况的参数值。被试根据实验平台指示, 依次进行抄写—视觉舒适评价—数字串核对任务, 完成后示意并闭眼休息。调整照明参数, 重复上述步骤, 直至完成第一组的 9 种工况实验, 时长约 22 min。

第二、三组的实验重复以上步骤, 每组实验中间, 被试休息 3 ~ 5 min, 避免视觉疲劳; 工作人员检查仪器, 并调整 ErgoLAB 平台上的设计程序。

1.3 实验结果

共计 30 位 (15 男、15 女) 被试参与实验, 年龄在 18 ~ 30 岁之间, 被试视力 (校正后) 正常、身心健康且无眼部疾病。实验结束后对数据进行滤波和分段, 并进行指标的变化率计算, 共获得 810 组实验数据。取实验数据平均值, 利用极值对数据进行趋同归一化处理, 其中主观舒适评分、核对得分、平均瞳

孔直径、RMSSD 变化率、AVHR 变化率 5 项指标,值越大表明对应评价项越好,将其赋为正值;眨眼频率、SC 变化率指标值越小,对应评价项越好,将其赋

为负值,结果见图 2,照明环境对不同的评价指标有不同程度的影响。

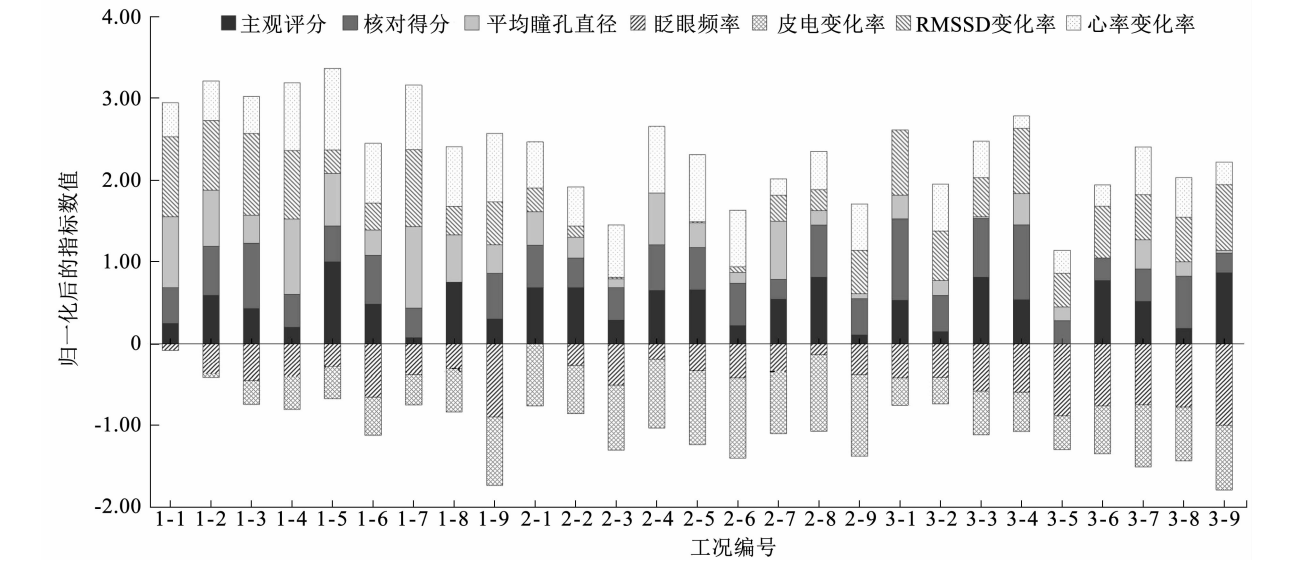


图 2 实验结果直方图

Fig.2 Histogram of experimental results

2 主客观数据分析

2.1 各评价指标的相关影响要素及重要性

通过方差分析和极差分析,分别得出交互阅读视觉感知和认知表现的显著影响因素及重要性排序,结果见表 2。由表 2 可得出:

1)水平照度对交互阅读的视觉感知和认知表现均有影响,对视觉疲劳的影响较大,但对视觉功效和情绪唤醒无显著作用。

2)照度配比主效应对交互阅读的视觉功效、视

觉疲劳和认知表现均有显著影响。

3)照度配比与屏幕亮度的交互作用对视觉舒适有显著影响,照度配比与光源色温、屏幕亮度的交互作用对认知表现有显著影响。

4)光源色温对视觉感知影响较大,尤其是对视觉舒适和视觉功效影响最大,对认知表现无显著影响,而对视觉疲劳的影响有待讨论。

5)VDT 屏幕亮度对认知表现影响最大,对视觉疲劳影响也较显著。

表 2 交互阅读视觉感知和认知表现显著影响因素分析结果									
Tab.2 Significant influencing factors of visual perception and cognitive performance in interactive reading									
评估项	评价指标	水平照度	照度配比	色温	屏幕亮度	照度配比 * 水平照度	照度配比 * 色温	照度配比 * 屏幕亮度	水平照度 * 色温
视觉感知	视觉舒适	舒适主观评分	0.355	0.145	2.145 *	0.239	0.258	0.245	0.361
	视觉功效	核对得分	0.085	0.163	0.204 *	0.067	0.119	0.137	0.070
	视觉疲劳	平均瞳孔直径	0.172 *	0.013	0.039	0.167	0.029	0.010	0.014
		眨眼频率	0.038	0.028	0.010	0.055 *	0.014	0.008	0.010
认知表现	认知效率	SC 变化率	0.099	0.192	0.042	0.272 *	0.038	0.041	0.074
		RMSSD 变化率	0.258	0.222	0.115	0.558 *	0.133	0.117	0.249
	情绪唤醒	AVHR 变化率	0.387	0.604	0.304	1.285 *	0.344	0.661	0.964

注:1. 加粗表示经方差分析得出,该要素对评价指标的影响显著,即 $P < 0.05$;2. 表中数据即极差大小,可代表因素的主次顺序,其中“*”为该因素对评价指标重要性最大;3. A * B 表示 A 与 B 的交互效应。

2.2 各要素对不同评价指标的影响

基于方差分析结果,对相关要素不同水平之间进行多重比较,进一步分析各显著影响要素的主效

应和交互效应对交互阅读视觉感知和认知表现的影响规律,得出交互阅读单一需求指标的最佳照明参数。

2.2.1 视觉舒适主观评分

结合多重比较和图 3 可知,3 个色温水平的舒适评分差异显著($P<0.05$),4 000 K 时舒适评分显著高于 5 000、3 500 K 的舒适评分。舒适主观评分在水平照度为 500 lx 时,与 300、700 lx 差异显著($P<0.05$),但 300 lx 与 750 lx 之间无显著差异。500 lx 时舒适主观评分均值最高,但整体差距不大。从水平照度和色温的交互效应来看,同等照度水平下,4 000 K 下的主观评分最高,且视觉舒适主观评分随水平照度的增加而上升;经过极差分析,

5 000 K 时水平照度对交互阅读的主观舒适评分影响效应最大。从照度配比和屏幕亮度的交互效应来看,屏幕亮度为 100 cd/m^2 、照度配比为 2.5 时,舒适主观评分最高,与屏幕亮度为 180 cd/m^2 、照度配比为 1.5 时的工况相差不大。结合要素的重要性排序,得出以舒适主观评分为评价指标时的最优照明环境为:色温 4 000 K、水平照度 750 lx,当屏幕亮度 100 cd/m^2 时,垂直照度为 300 lx(照度配比 2.5),当屏幕亮度 180 cd/m^2 时,垂直照度为 500 lx(照度配比 1.5)。

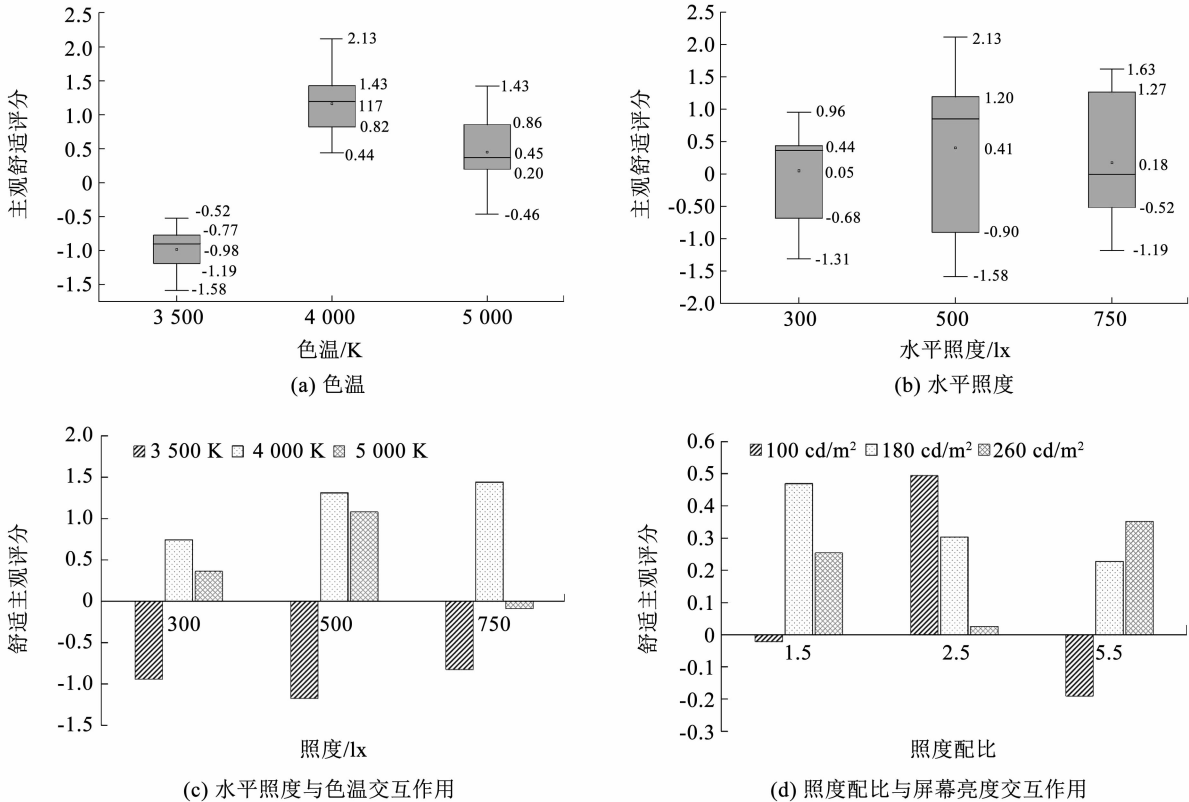


图 3 相关要素对视觉主观舒适的影响

Fig. 3 Influence of relevant factors on visual subjective scores

2.2.2 核对得分

结合多重比较和图 4 可知:色温 5 000 K 环境下的核对得分与 3 500、4 000 K 差异显著($P<0.05$),但在 3 500 K 与 4 000 K 下无显著差异;核对得分均值和最高值均在 5 000 K 色温。核对得分在照度配比 1.5 和 5.5 时差异显著;随着照度配比的增加,核对得分逐渐下降,表明视觉功效随之下降。综上,以核对得分为评价指标时的最优照明环境为色温 5 000 K、照度配比 1.5。

2.2.3 平均瞳孔直径

结合多重比较和图 5 可知:水平照度、屏幕亮度不同水平之间的平均瞳孔直径差异性显著($P<0.05$),随着水平照度、屏幕亮度的增加,平均瞳孔直径均逐渐变小。色温各水平之间,5 000 K 环境下的平均瞳孔直径与 3 500、4 000 K 下差异显著($P<$

0.05),但 3 500 K 和 4 000 K 无显著差异;就分布状态看,色温对平均瞳孔直径的影响程度较弱。从照度配比与水平照度的交互效应看,通过极差分析后,可得出 300 lx 时照度配比对交互阅读平均瞳孔直径的影响效应最大;水平照度 300 lx、照度配比 5.5 时,平均瞳孔直径最大;中、高照度(500、750 lx)下,照度配比对瞳孔直径无明显影响。综上,以平均瞳孔直径为视觉疲劳的评价指标时,低视觉疲劳的最佳参数组合为:水平照度 300 lx、屏幕亮度 100 cd/m^2 、照度配比 5.5,色温 3 500 K/4 000 K。

2.2.4 眨眼频率

结合多重比较和图 6 可知:屏幕亮度 3 个水平下的眨眼频率均表现出显著差异($P<0.05$),屏幕亮度为 180 cd/m^2 时眨眼频率最小,但与 100 cd/m^2 时差异不大。水平照度在 750 lx 时,与 300、500 lx

有显著差异($P < 0.05$),但 300 lx 与 500 lx 之间无显著差异;就分布状态和平均值来看,中低水平照度(300、500 lx)下,眨眼频率较小。眨眼频率在照度配比为 1.5 时,与 2.5 和 5.5 差异性显著,照度配比为 2.5 和 5.5 时无显著差异;从分布状态看,眨眼频率的平均最低值、最低值均在照度配比为 1.5 的环境下。综上,以眨眼频率为视觉疲劳的评价指标时,低视觉疲劳的最佳参数组合为:屏幕亮度 180 cd/m²、水平照度 300 lx/500 lx、照度配比 1.5。

2.2.5 SC 变化率

结合多重比较和图 7 可知:屏幕亮度 3 个水平下,SC 变化率差异性显著($P < 0.05$),100 cd/m² 时

变化率最小。3 个照度配比水平下的 SC 变化率差异性显著($P < 0.05$),从分布状态看,随着照度配比增加,SC 变化率均逐渐上升。水平照度为 750 lx 时与 300、500 lx 的 SC 变化率差异性显著($P < 0.05$),但 300 lx 与 500 lx 之间相差不大;SC 变化率平均值和最低值均在 300 lx 下。从因素的交互效应看,在不同屏幕亮度下,随着照度配比的增加,SC 变化率呈不同趋势的递增状态;屏幕亮度为 100 cd/m² 时极差值最大,照度对比对 SC 变化率影响效应量最大。综上,以 SC 变化率为评价指标时,得出高认知效率的最佳参数组合为:屏幕亮度 100 cd/m²、照度配比 1.5、水平照度 300 lx。

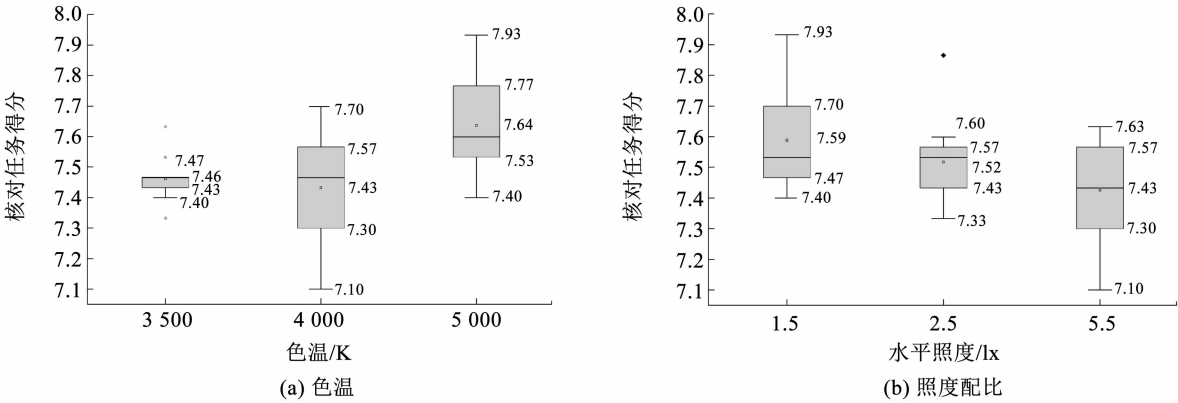


图 4 相关要素对核对得分的影响
Fig. 4 Influence of relevant factors on check score

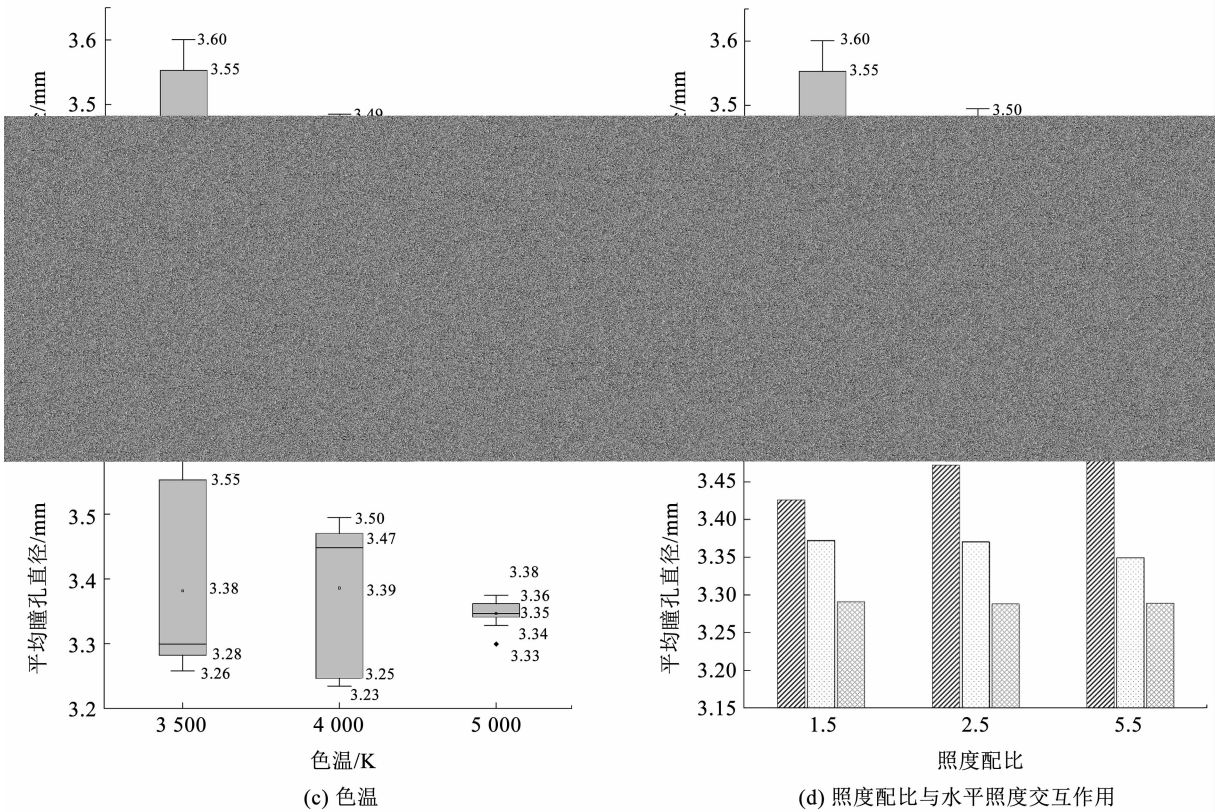


图 5 相关要素对平均瞳孔直径的影响
Fig. 5 Influence of relevant factors on mean pupil diameter

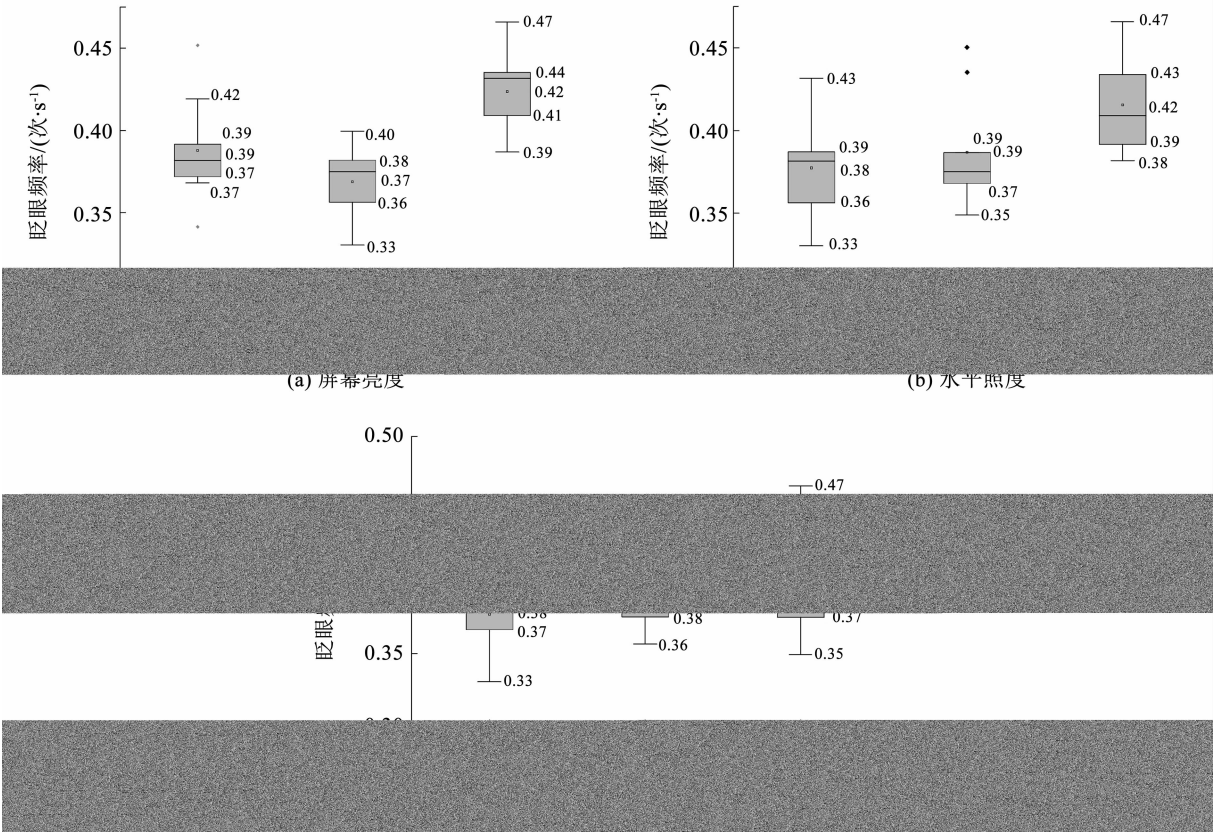


图 6 相关要素对眨眼频率的影响

Fig. 6 Influence of relevant factors on blink frequency

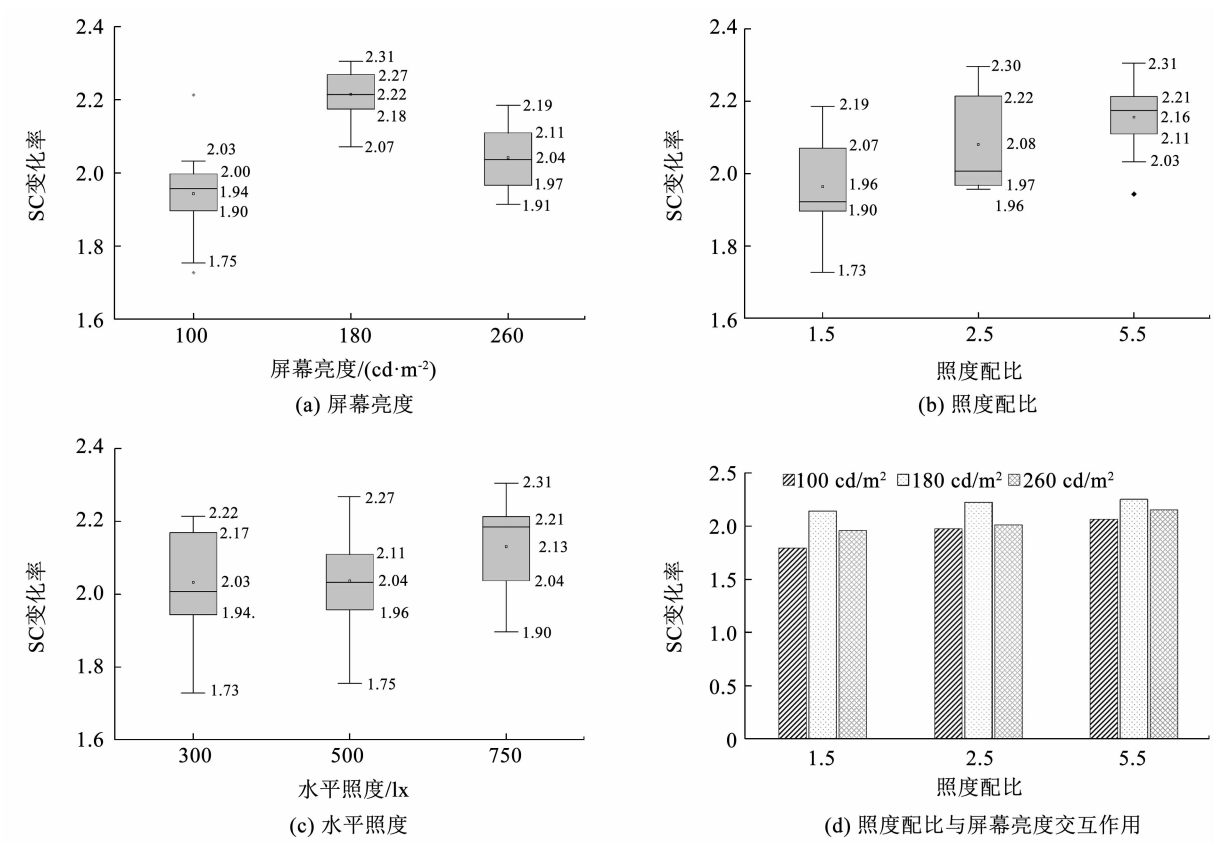


图 7 相关要素对 SC 变化率的影响

Fig. 7 Influence of relevant factors on SC change rate

2.2.6 RMSSD 变化率

结合多重比较和图 8 可知:屏幕亮度 100 cd/m² 与 260 cd/m² 时 RMSSD 变化率无显著差异,但从分布状态看,100 cd/m² 时的 RMSSD 变化率均值、上四分位数和上边缘均优于 260 cd/m²。300 lx 与 500 lx 水平下 RMSSD 变化率差异显著 ($P < 0.05$),而 500 lx 与 750 lx 无显著差异;从分布状态看,当水平照度为 300 lx 时,RMSSD 变化率最大。照度配比为

1.5 和 5.5 时,RMSSD 变化率无显著差异。分析屏幕亮度和照度配比的交互效应,屏幕亮度为 100 cd/m²、照度配比 1.5 的 RMSSD 变化率最大;屏幕亮度为 100 cd/m² 时,照度对比对 RMSSD 变化率影响效应最大。综上,以 RMSSD 变化率为评价指标时,得出高认知效率的最佳参数组合为:屏幕亮度 100 cd/m²、照度配比 1.5、水平照度 300 lx。

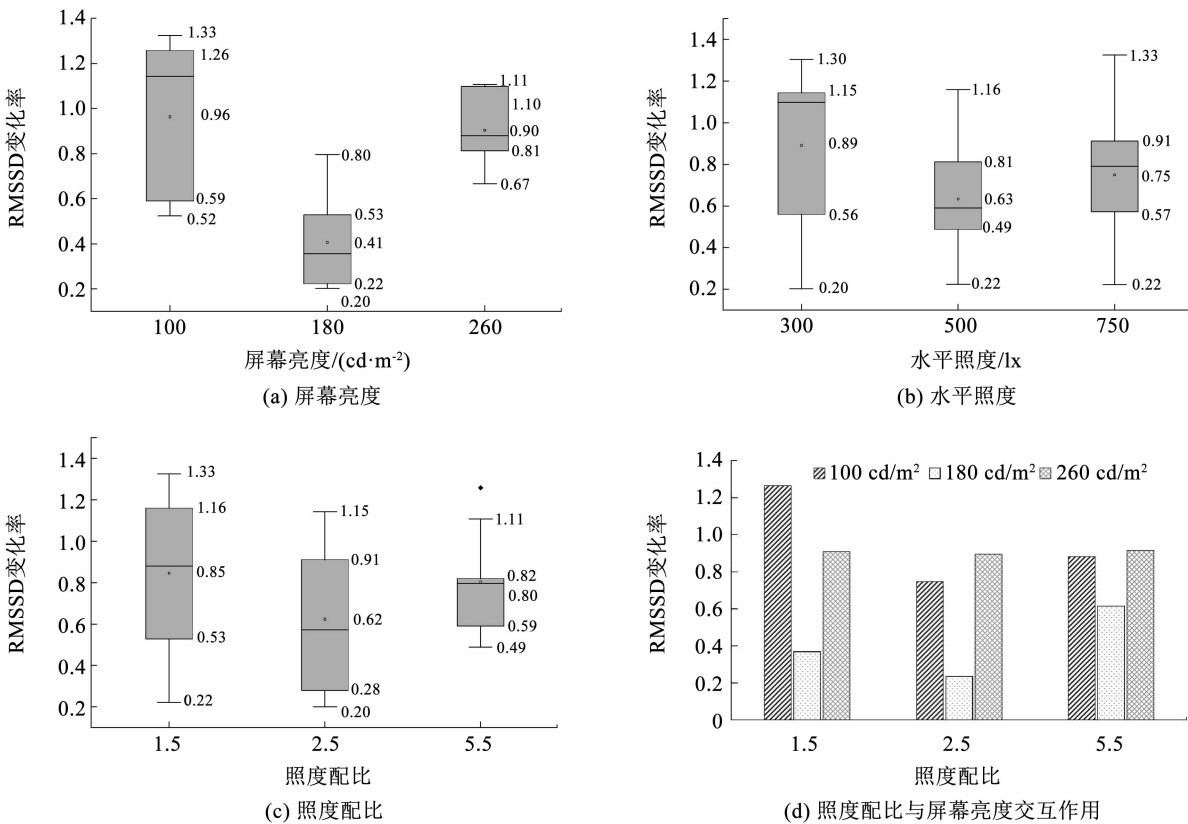


图 8 相关要素对 RMSSD 变化率的影响

Fig. 8 Influence of relevant factors on RMSSD change rate

2.2.7 AVHR 变化率

结合多重比较和图 9 可知:屏幕亮度不同水平下,AVHR 变化率差异性显著 ($P < 0.05$),AVHR 变化率随着屏幕亮度的增加逐渐下降。照度配比为 1.5 时,与 2.5 的 AVHR 变化率差异性显著 ($P < 0.05$);照度配比为 2.5 时,AVHR 变化率平均值最大,但较为分散,需结合其他要素综合考虑。从照度配比分别与屏幕亮度、色温的交互效应来看,屏幕亮度越小,照度对比对 AVHR 变化率的影响效应越大,屏幕亮度 100 cd/m²、照度配比 2.5 组合下的交互阅读 AVHR 变化率最大。色温 4 000、5 000 K 时,照度对比对交互阅读 AVHR 变化率影响效应量均较大;色温 4 000 K、照度配比 2.5 组合下的交互阅读心率变化率最大。综上,结合要素重要性排序,以心率变化率为情绪唤醒的评价指标时,高情绪唤醒

的最佳参数组合为:屏幕亮度 100 cd/m²、照度配比 2.5、色温 4 000 K。

3 讨 论

研究以水平照度、照度配比、光源色温、VDT 屏幕亮度为主要变量,重点探讨了照明环境对交互阅读视觉和认知的综合影响作用和各要素对不同指标的影响规律两个方面。实验结果得出:

1) 水平照度对交互阅读的视觉舒适和疲劳有显著影响,但对视觉功效和情绪唤醒无显著影响。究其原因,可能为研究选取的 300、500、750 lx 3 个照度值均为满足视觉作业基本需求的较优范围,而水平照度与色温的主效应对人的 AVHR 生理响应无显著影响与文献[15]的研究结论一致。

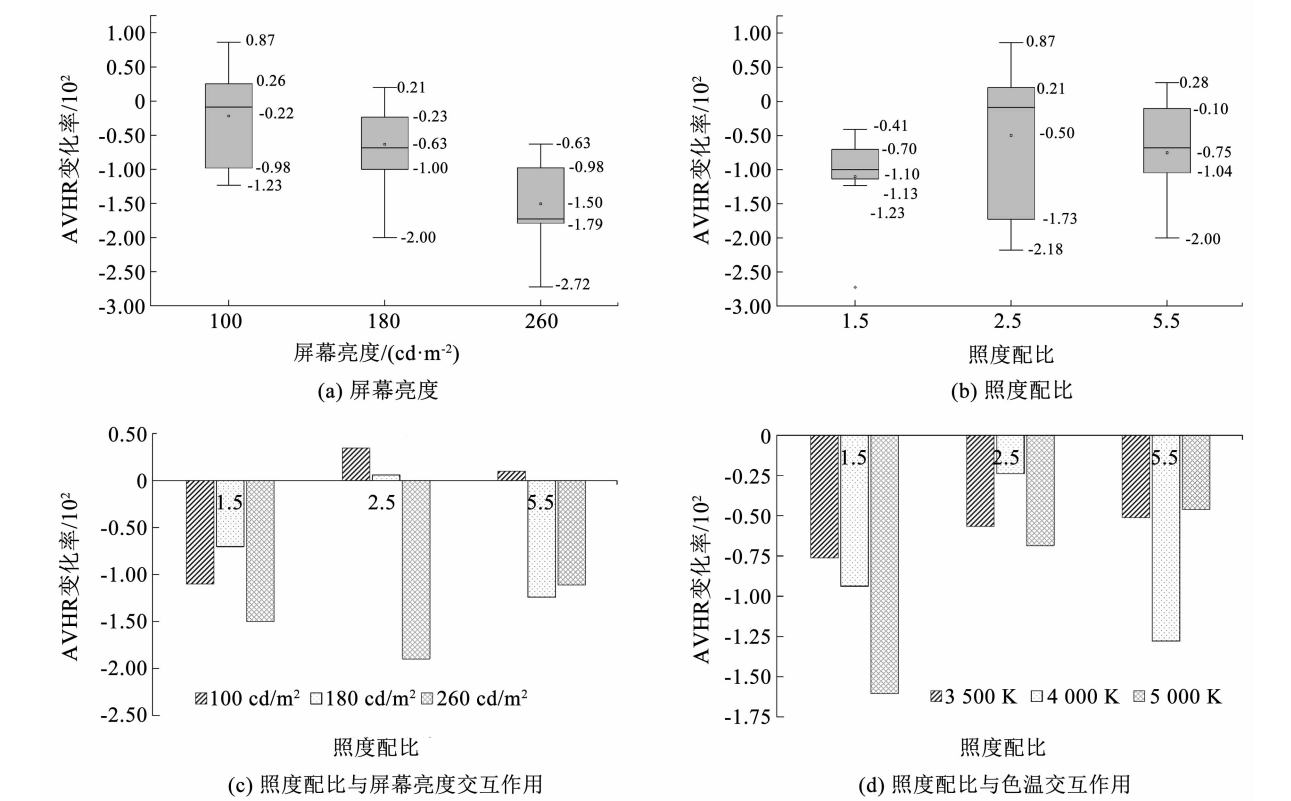


图 9 相关要素对 AVHR 变化率的影响
Fig. 9 Influence of relevant factors on AVHR change rate

2) 分析各评估项的影响要素(表 3),交互阅读的视觉感知和认知表现不仅受水平照度、照度配比、色温、屏幕亮度的单一影响,还受到要素之间的交互效应影响,且权重较高。

3) 照度配比的主效应虽然对视觉舒适无影响,但照度配比与屏幕亮度的交互效应对视觉舒适有显著影响;照度配比主效应对认知表现的重要程度虽较低,但是照度配比与屏幕亮度、色温的交互效应对认知表现的影响更为显著。因此,针对交互阅读的照明环境设计,需平衡水平与垂直照度之间的关系。

实验还发现,选取不同指标作为交互阅读视觉感知和认知表现评估项时,其要素及规律具有差异性和统一性。研究选取平均瞳孔直径和眨眼频率来

表征视觉感知中的视觉疲劳,但两者的显著影响因素(表 3)和规律未表现出完全一致的趋势,实验得出色温对平均瞳孔直径影响显著,而不影响眨眼频率。究其原因,瞳孔的收缩与观察者“感觉”到的光照亮度有关,也有研究指出色温的增加会导致人眼感知到的亮度增加^[16],本研究得出的结论与之相符。因此瞳孔直径的变化是否能准确反映由照明引起的视觉疲劳需进一步探索。同时研究选取了 SC 变化率与 RMSSD 变化率共同评估交互阅读认知效率,实验结果表明两者显著影响因素相同,因此将两者共同作为交互阅读认知效率的评价指标,具有较强的可行性。

表 3 不同评价指标下的最优照明环境						
Tab. 3 Optimal lighting environment under different evaluation indicators						
评估项	评价指标	水平照度/lx	照度配比	色温/K	屏幕亮度/(cd·m ⁻²)	垂直照度/lx
视觉舒适	舒适主观评分	750	1.5	4 000	180	500
		750	2.5	4 000	100	300
视觉功效	核对得分		1.5	5 000		
视觉疲劳	眨眼频率	300/500	1.5		180	200/333
认知效率	SC 变化率	300	1.5		100	200
	RMSSD 变化率	300	1.5		100	200
情绪唤醒	AVHR 变化率		2.5	4 000	100	

根据数据分析结果,总结出单一评价指标下的最优照明环境。如表 3 所示,舒适主观评分为评价指标的最佳视觉舒适参数与以 SC 变化率为评价指标的高情绪唤醒参数相同,即高视觉舒适且高情绪唤醒的最佳照明环境参数为:水平照度 750 lx、垂直照度 300 lx(照度配比 2.5)、色温 4 000 K,最佳屏幕亮度为 100 cd/m²。同理,高视觉功效结合低视觉疲劳高认知效率的最佳照明环境参数为:水平照度 300 lx、垂直照度 200 lx(照度配比 1.5)、色温 5 000 K,而屏幕亮度可根据实际阅读需求进行调整,100 cd/m²时认知效率最高,180 cd/m²时视觉疲劳程度最低。

4 结 论

本研究通过对主观评价和生理指标监测数据的分析,得出各照明要素对交互阅读视觉舒适、视觉功效、视觉疲劳、认知效率和唤醒程度的相关性和重要性;并分析要素不同水平之间对评估指标的差异性,结合数据分布状态,得出本研究范围内的最优照明环境,为交互阅读照明环境设计提供思路。具体结论如下:

1) 水平照度对视觉感知和认知表现均有显著影响,尤其是对视觉疲劳影响最大。

2) 照度配比主效应对交互阅读的视觉功效、视觉疲劳和认知表现均有显著影响,对视觉舒适无显著影响。但照度配比与屏幕亮度的交互作用对视觉舒适有显著影响,同时照度配比与光源色温、屏幕亮度的交互作用对认知表现有显著影响。因此,在进行交互阅读空间照明设计时,应考虑照度配比对作业者的生理及绩效影响;且两因素之间存在交互作用时,需综合考虑对评估指标的效应量大小。

3) 光源色温对交互阅读视觉舒适和视觉功效影响最大;VDT 屏幕亮度对交互阅读视觉疲劳、认知效率和情绪唤醒影响最大。

4) 高视觉舒适且高情绪唤醒的交互阅读最佳照明环境参数为:水平照度 750 lx、垂直照度 300 lx(照度配比 2.5)、色温 4 000 K,最佳屏幕亮度为 100 cd/m²。高视觉功效以及高认知效率、低视觉疲劳为交互阅读最佳照明环境参数为:水平照度 300 lx、垂直照度 200 lx(照度配比 1.5)、色温 5 000 K,且屏幕亮度建议为 100 cd/m²。

5) 针对交互阅读行为认知表现的两个不同评价指标(SC 变化率和 RMSSD 变化率),虽在不同照明参数下变化趋势有差异,但得出高认知效率和高视觉功效的环境相同,即低屏幕亮度、低照度配比、低水平照度、高色温。

6) 交互阅读中,VDT 屏幕亮度不宜过高($\leq$

180 cd/m²),有助于提高认知效率并降低视觉疲劳。

本文在已有研究基础上,选取了典型的变量水平,但取值数量较少,因此有待增加变量取值范围,进一步研究各要素对交互阅读的影响规律。同时应优化组内变量水平顺序,以避免被试在实验过程中形成练习效应,提高实验结果的准确性。

参考文献

- [1] KAZEMI R, CHOUBINEH A, TAHERI S, et al. Comparing task performance, visual comfort and alertness under different lighting sources: an experimental study[J]. EXCLI Journal, 2018(17): 1018. DOI:10.17179/excli2018-1676
- [2] 严永红, 田海, 关杨, 等. 荧光灯光谱、光强对辨别力的影响[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(1): 141
YAN Yonghong, TIAN Hai, GUAN Yang, et al. The influence of fluorescent lamps with different color temperatures and luminance levels on discrimination[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(1): 141
- [3] 张敬怡, 吴雨婷, 王立雄, 等. VDT 阅读照明环境视觉舒适性研究[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 68
ZHANG Jingyi, WU Yuting, WANG Lixiong, et al. Visual comfort study of the lighting environment for VDT reading [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(2): 68. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-440X. 2020. 02. 015
- [4] 黄彦, 杨春宇. 光源光色对明视觉功效影响的模拟实验研究[J]. 灯与照明, 2015, 39(3): 1
HUANG Yan, YANG Chunyu. The simulative experimental analysis of the effect of light color on photopic visual performance[J]. Light & Lighting, 2015, 39(3): 1
- [5] 孔光燕, 吴雨婷, 王立雄, 等. 图书馆交互阅读空间的舒适性照明环境[J]. 室内设计与装修, 2021(6): 122
KONG Guangyan, WU Yuting, WANG Lixiong, et al. A comfortable lighting environment for the library's interactive reading space[J]. Interior Design Construction, 2021(6): 122
- [6] 胡志刚, 王卉, 乔现玲, 等. 照明环境与 LCD 界面背景饱和度的交互效应对视觉绩效的影响[J]. 心理科学, 2017, 40(4): 801
HU Zhigang, WANG Hui, QIAO Xianling, et al. The interaction effect of ambient illumination and background color saturation on visual performance with LCD screens[J]. Journal of Psychological Science, 2017, 40(4): 801. DOI: 10.16719/j. cnki. 1671-6981. 20170405
- [7] 杜志刚, 潘晓东, 郭雪斌. 高速公路隧道进出口视觉适应实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(12): 1998
DU Zhigang, PAN Xiaodong, GUO Xuebin. Experiment studies of visual adaptation on driving through freeway tunnel's entrance and exit[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007(12): 1998
- [8] MURATA A, UETAKE A, OTSUKA M, et al. Proposal of an index to evaluate visual fatigue induced during visual display terminal tasks[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2001, 13(3): 305. DOI:10.1207/S15327590IJHC1303_2
- [9] 姜颖, 洪军, 王威, 等. 面向 VDT 显示界面的视觉舒适度客观描述方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 77
JIANG Ying, HONG Jun, WANG Wei, et al. An objective description method of visual comfort for VDT display interface[J].

Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(1): 77. DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2017.01.011

[10] LÜ Ming, LIU Hao, ZHOU Wenwen, et al. Efficiency model of micro-course study based on cognitive psychology in the college[J]. Computers in Human Behavior, 2020, 107: 106027. DOI: 10.1016/j.chb.2019.05.024

[11] TYNG C M, AMIN H U, SAAD M N M, et al. The influences of emotion on learning and memory[J]. Frontiers in Psychology, 2017 (8): 1454. DOI:10.3389/fpsyg.2017.01454

[12] WANG Kun, HO C H, TIAN Chunpeng, et al. Optical health analysis of visual comfort for bright screen display based on back propagation neural network[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2020(196): 105600. DOI:10.1016/j.cmpb.2020.105600

[13] 陈了一, 郭小玉, 袁晓春, 等. 心悸寒证与热证心率变异性 (HRV) 与自主神经张力 (交感和迷走) 相关分析[J]. 实用中医内科杂志, 2019, 33(1): 10

CHEN Liaoyi, GUO Xiaoyu, YUAN Xiaochun, et al. Correlation analysis between autonomic nerve tension (the sympathetic nerve and vague nerve) and heart rate variability (HRV) of cold syndrome and heat syndrome[J]. Journal of Practical Traditional Chinese Internal Medicine, 2019, 33 (1): 10. DOI:10.13729/j.issn.1671-7813.20190040

[14] BALCONI M, VANUTELLI M E, FINOCCHIARO R. Multilevel analysis of facial expressions of emotion and script: self-report (arousal and valence) and psychophysiological correlates [J]. Behavioral and Brain Functions, 2014, 10 (1): 32. DOI: 10.1186/1744-9081-10-32

[15] 黄海静, 王雅静, 陈纲. 不同 LED 照明参数对老年人心电生理响应的影响[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(3): 13

HUANG Haijing, WANG Yajing, CHEN Gang. The effect of different LED lighting parameters on ECG response of the elderly [J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(3): 13. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.03.002

[16] VIENOT F, DURAND M L, MAHLER E. Kruithof's rule revisited using LED illumination[J]. Journal of Modern Optics, 2009, 56 (13): 1433. DOI:10.1080/09500340903151278

(编辑 苗秀芝)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“考虑时变气象参数的输电导线覆冰数值仿真”,是浙江大学建筑工程学院结构工程专业楼文娟教授课题组提出的一种关于考虑时变气象参数的输电导线覆冰数值仿真计算理论的原理示意图。空气中的过冷却水滴撞击输电导线,凝结后形成覆冰。在这个过程中微气象条件(温度、风速、湿度、降雨、液态水含量、水滴中值体积直径)起着至关重要的作用,其中的风速等主要影响空气流动,温度、湿度等主要影响水滴冻结和覆冰增长。引入 N-S 方程计算空气流场进而计算水滴的运动轨迹;同时建立了导线覆冰表面微元的质量守恒方程和能量守恒方程来计算水滴冻结的过程和覆冰的增长。在此基础上采用 FENSAP-ICE 软件进行多时间步的导线覆冰增长仿真计算。在每个时间步内依次开展 FLUENT 流场计算、FENSAP-ICE 水滴碰撞及冻结仿真和基于网格置换的覆冰边界自动更新;最后,分析多个时间步后的网格大小及纵横比,当网格质量降低而无法满 足计算精度时,输出覆冰导线形状重新划分网格,然后继续计算直至达到预计的覆冰时间,有效地预测导线实时覆冰形状和质量,可为输电线路冰灾风险分析和预警提供参考。

(图文提供:王强,楼文娟,徐海巍,王礼祺。浙江大学建筑工程学院结构工程专业)