

DOI:10.11918/202212045

动态照明对疲劳调度员神经行为反应的影响

李彦洁^{1,2}, 方卫宁¹, 王健新^{1,2}, 鲍海峰¹

(1. 先进轨道交通自主运行全国重点实验室(北京交通大学), 北京 100044;
2. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要:为探讨利用地铁调度中心照明环境辅助性支持设计来缓解调度员脑力疲劳以实现人机增效的可行性,研究了动态照明对疲劳调度员的影响效应及神经机制。基于实验室环境搭建了可见光谱人工照明实验平台并在此基础上调制了两种环境光照参数(常规照明:500 lx,4 000 K;动态照明:500 lx,4 000~12 000 K),采用单因素两水平被试内设计开展人因照明工效学实验。基于地铁调度任务分析设计了分别表征持续注意、工作记忆和执行控制认知功能的 PVT、N-back 和 MABT-II 范式,对比分析了16名被试在不同光暴露期间的主观评估、行为绩效和脑电(electroencephalogram, EEG)指标等神经行为反应差异。结果表明,相较于常规照明,疲劳被试在动态照明下的主观感觉更警觉,情绪更积极,其持续注意、工作记忆和执行控制等认知功能得到显著改善。EEG数据揭示这种疲劳干预机制可能来源于动态光线对大脑额叶区 α 、 θ 和 α - θ 等低频频段活动的有效抑制。当前研究初步验证了动态照明对脑力疲劳的影响效应,为城市轨道交通照明设计和疲劳管理提供依据。

关键词: 地铁调度员; 动态照明; 脑力疲劳; 非视觉生物效应; 脑电信号

中图分类号: TU113.6; U292.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)04-0130-07

Effects of dynamic lighting on neurobehavioral responses of fatigued dispatchers

LI Yanjie^{1,2}, FANG Weining¹, WANG Jianxin^{1,2}, BAO Haifeng¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China;
2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To explore the feasibility of using a support design of lighting environment in subway dispatching centers to alleviate the mental fatigue of dispatchers and thus achieve human-machine efficiency enhancement, the effects and mechanism of dynamic lighting on fatigued subway dispatchers were investigated. We built a visible spectrum artificial lighting experimental platform based on the laboratory environment and modulated two lighting parameters (conventional lighting: 4 000 K, 500 lx; dynamic lighting: 4 000 - 12 000 K, 500 lx). On this basis, an ergonomics experiment was carried out with a single-blind within-subject design. Based on subway scheduling task analysis, PVT, N-back, and MATB-II tasks were designed to characterize continuous attention, working memory, and executive control functions respectively. Sixteen participants' neurobehavioral responses including subjective assessment, behavioral performance, and EEG (electroencephalogram) indicators during different ambient light were collected, compared and analyzed. The results showed that, compared with conventional lighting, fatigued participants feel more alert and have a more positive mood. Furthermore, their continuous attention, working memory, and executive control were significantly improved under dynamic lighting. The results of EEG data revealed that the fatigue intervention mechanism of dynamic lighting may be due to the effective inhibition of α , θ , and α - θ activities in the frontal lobe. The current results have preliminarily discovered the effects of dynamic lighting on mental fatigue, thus providing the basis for the lighting design and fatigue management of urban rail transit.

Keywords: subway dispatchers; dynamic lighting; mental fatigue; non-image forming effect; electroencephalogram (EEG)

地铁调度员负责地铁行车调度系统中各条线路的正常运营与突发事件处理,其调度控制能力直接决定了整条线路的运营安全和运输效率^[1]。由于

超负荷工作、集中封闭环境和昼夜轮班制度等因素的综合影响,调度员面临严重的疲劳问题,其疲劳水平随工作时间的延长而增加^[2-3],严重威胁行车安

收稿日期: 2022-12-14; 录用日期: 2023-03-28; 网络首发日期: 2023-11-13

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20231110.0921.002>

基金项目: 国家自然科学基金(72271015); 教育部产学研合作育人项目(2020025J08)

作者简介: 李彦洁(1992—),女,博士研究生; 方卫宁(1968—),男,教授,博士生导师

通信作者: 方卫宁, wnfang@bjtu.edu.cn

全和调度质量。因此,有必要探讨行之有效的疲劳应对方法来缓解地铁调度员疲劳,保障地铁行车调度安全。

交通运输领域的疲劳干预方法大多集中在物理干预,较少关注工作环境对疲劳的潜在影响。聊天、洗脸、教育等方法在传统疲劳应对措施中较为常见^[4],但这些方法需要调度员不时地从任务中抽离出来,易造成任务中断,影响行车安全。感官环境可能影响人体脑力疲劳程度,人工照明作为全封闭式调度中心视觉感官环境的重要组成部分,已被证明会对人体产生非视觉生物效应^[5-6]。美国照明工程学会(IES)^[7]将这种光效应分类为昼夜节律、神经内分泌和神经行为反应,其中,神经行为反应表示光线-神经系统-人类行为之间的关系,通常包括警觉性、认知和情绪等与疲劳密切相关的生理心理过程。

固态照明在光照强度和光谱特性的快速变化能力使动态照明受到越来越多的关注。相较于单调恒定照明,高度动态化的光线更易被用户感知,进而更能刺激机体觉醒^[8-10]。本文先前通过文献^[11]调研探讨了动态照明作为地铁调度员疲劳干预方法的可行性。尽管部分证据显示动态照明的疲劳干预优势,但对这一结果尚未形成清晰一致的结论,不同研究者对静/动态照明的生物驱动效应存在不同的理解甚至争议^[12]。综上所述,本文通过采集人体心理、行为和生理多模态神经行为响应数据来探讨相关色温(correlated color temperature, CCT)在时间尺度变化的动态照明对疲劳调度员的影响效应及神经机制,为城市轨道交通行业室内照明设计和疲劳干预提供新的思路。

1 实验设计

地铁行车调度实行四班三运转昼夜轮班制,每个班次连续工作 12 h^[1]。为验证日间动态照明对调度员的疲劳干预作用,选取白班调度员较易出现疲劳的时段(13:30 ~ 17:00)^[2]进行测试。基于实验室环境搭建可见光谱人工照明实验平台,设计表征地铁调度工作技能的认知测试范式开展工效学实验,以获取动态照明条件下的疲劳表征数据并进行分析。

1.1 被试

本文共筛选 16 名被试(包括 8 名女性),年龄为 23.63 ± 1.09 岁,本科以上学历,右利手,具有较强的学习、理解和分析判断能力,双眼裸眼视力不低于 0.6(4.8)或矫正视力不低于 1.0(5.0),无吸烟/

酗酒等不良嗜好。为减小基线技能水平对结果的影响,所有被试均为新手(保证基线一致),练习合格后方可参加实验。为控制时差对人体光响应的干扰,所有被试均为中间型睡眠时型,试验前近 3 个月内没有跨时域飞行或昼夜轮班经历,试验前 1 周保证规律作息和良好睡眠,试验前 1 h 不得摄入任何兴奋/镇静类食物或药物。

1.2 实验任务

本试验疲劳诱发时间设定在一天中的午后,借助餐后低谷期和疲劳诱发范式实施疲劳诱发。AX-CPT 范式由线索字母(A)/非线索字母(B)和目标刺激(X)/非目标刺激(Y)两两配对组成 4 项刺激序列:AX、AY、BX、BY,其疲劳诱发原理来源于认知资源耗损。被试需初判线索字母,并基于判断结果对刺激字母做出响应,这种长时间对线索和刺激的持续辨别和响应增加了认知负荷,最终导致认知资源耗竭诱发疲劳,并且能实现较好的疲劳诱发效果^[13]。此外, VAS (visual analog scales) 量表中的“警觉”和“困倦”条目和 BRUMS (The brunel mood scale) 问卷中的“疲惫-惰性”和“抑郁-沮丧”子量表被用来评估疲劳诱发前后的精神和情绪状态来验证疲劳诱发有效性^[13],分数越高表示状态感受越强烈。

当值期间,地铁调度员需长时间集中注意力以保证在高度感知列车运行状况的基础上对任何异常行车事件做出快速精确地响应,因此本文设计 PVT (psychomotor vigilance test) 任务以测试调度员的持续注意力。PVT 任务通过衡量机体对感官刺激感知、理解和判断所需时间有效地评估个体对外界刺激的感知敏感程度,是客观量化人体警觉注意应用最广泛的认知范式^[14]。被试需长时间注视电脑屏幕,并对屏幕上随机出现的刺激物尽可能快地响应,反应时间越长表示响应速度越慢,注意力集中程度和警觉性水平越低。

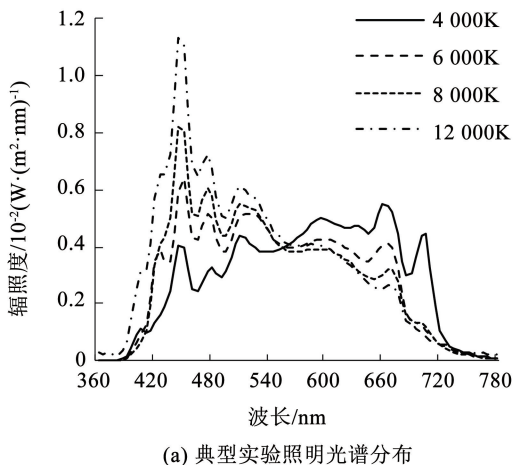
地铁调度工作不仅要求监控和决策能力,还需调度员为复杂任务制定调度计划和策略,同时对列车运行中的不可预见变化做出实时、适时反应,这些对工作记忆和执行控制提出较高要求,但研究表明,这些高级认知能力在疲劳状态下却表现地十分脆弱^[15-16],因此,本文分别设计 N-back 和 MATB-II (The multi-attribute task battery II) 任务测试疲劳群体在不同环境光照下的执行控制和工作记忆能力。为排除声环境对疲劳的干扰,本文只纳入 MATB-II 中的监控、跟踪和油路管理 3 个子任务来评估被试在不同实验条件下的多任务处理表现,并设置 3 种

任务难度等级。同样地,通过设置 N-back 字母匹配任务中“N”参数生成 3 种难度等级,N 的数值越大,任务难度越大^[17]。

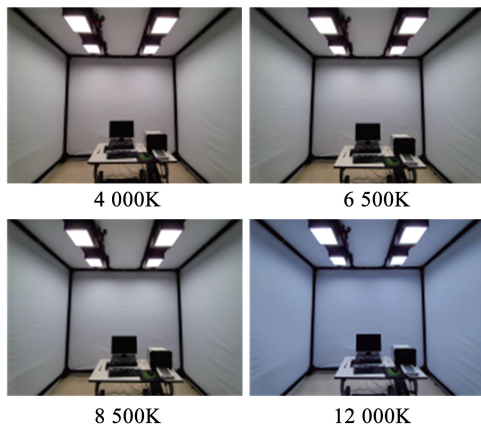
1.3 照明设置

利用 THOUSLITE LEDCube-I14 LED 照明模拟器搭建全封闭环境人工照明实验平台,该平台可复现 380 ~ 730 nm 可见光谱范围内任意光谱分布(spectral power distribution, SPD)以实现任意人工照明实验场景的构建,其余环境要素(如声、热、振动、空气等)均按照 ISO 11064-6:2005《控制中心的人类工效学设计(第 6 部分):控制中心的环境要求》^[18]规定,进行设置以真实模拟地铁调度中心物理环境。依据 GB50034—2013《建筑照明设计标准》^[19]

规定,有关“办公室照明标准值”和“长期工作场所选用 LED 光源色温建议值”设定常规照明参数为 500 lx, 4 000 K。在此基础上,保持照度值 500 lx 恒定,动态照明的变化模式为从 4 000 K 以矩形振荡模式上升至 12 000 K,然后从 12 000 K 下降至 4 000 K 视为一个周期,持续时间为 50 min。从 4 000 ~ 12 000 K 有 16 个 CCT 阶度,每两阶 CCT 之间间隔 500 K,每 94 s 变化一阶。经检验,该动态光昼夜节律刺激值至少为 0.34,满足光警觉效应的最低要求($CS \geq 0.3$)^[20]。利用 CL-500A 手持式分光辐射照度计对所有光源进行测量和校准,保证工作面照度均匀度在 80% 以上,显色指数 Ra 不小于 95%。典型实验照明光谱分布及场景如图 1 所示。



(a) 典型实验照明光谱分布



(b) 典型实验照明场景

图 1 典型的动态照明场景

Fig. 1 Typical lighting scenes in experimental light

1.4 实验设计及流程

采用 2(环境光照:动态照明、常规照明) × 3(任务难度:低、中、高)被试内交叉设计,被试在单次实验中分别在两种环境光照下执行 3 类认知范式,其中 MATB-II 和 N-back 任务被设置为 3 种难度等级。环境光照的顺序在被试间平衡。为避免练习效应, MATB-II 的难度等级以拉丁方顺序呈现且在两种环境光照中保持不变。所有被试按照要求在 13:20 签到,正式实验在 13:30 ~ 17:00 进行。

首先进行基线测量,填写 KSS、VAS 和 BRUMS 量表报告当前精神状态。之后进行 90 min 的 AX-CPT 疲劳诱发任务,结束后填写 VAS 和 BRUMS 量表。关闭灯光,被试在暗光 (< 10 lx) 下静坐 10 min。接着打开灯光,第 I 阶段实验光暴露开始,

被试先静坐 5 min 以适应当前实验光照,期间保持正常眨眼和呼吸,采集 5 min 的静息态 EEG 数据。之后依次完成 PVT、MATB-II 和 N-back 任务,填写 KSS 和 PANAS 量表,再次采集 5 min 的静息态 EEG 数据,第 I 阶段实验结束。之后,被试需要在暗光 (< 10 lx) 下休息 30 min,一方面有利于被试从认知任务中恢复过来,另一方面洗脱上一阶段实验光暴露带来的遗留效应。打开灯光,被试进行 30 min 的 AX-CPT 疲劳诱发任务并填写 VAS 和 BRUMS 量表。关闭灯光,被试在黑暗环境 (< 10 lx) 下静坐 10 min。接着再次打开灯光,第 II 阶段实验光暴露开始,流程与第 I 阶段完全相同,两种实验光暴露顺序经过平衡。基线测量和疲劳诱发阶段均在常规照明下进行。整体实验流程如图 2 所示。

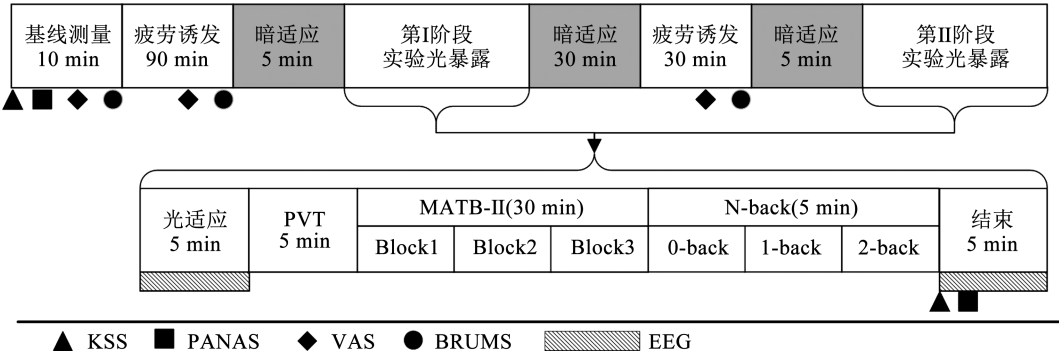


图 2 实验流程

Fig. 2 Overview experimental procedure

2 神经行为响应数据采集及处理

2.1 主观数据采集与处理

采用 KSS 量表 (Karolinska sleepiness scale)^[21] 评估实验光暴露前、后被试主观疲劳水平。该量表将个体主观嗜睡度分成 9 个等级, 分数越高表示困倦程度越高, 警觉性越低。采用单因素重复测量方差分析对比不同环境光照下的主观疲劳水平差异。

PANAS 量表 (positive affect and negative affect scale) 中文版^[22] 评估实验光暴露前、后被试主观情绪变化。该量表包括 10 项积极情绪形容词和 10 项消极情绪形容词, 分数越高表示主观体验越强烈。采用单因素重复测量方差分析对比不同环境光照下的主观情绪差异。

2.2 行为数据采集与处理

PVT 和 N-back 绩效数据通过 E-prime 3.0 软件自动采集记录, 具体指标包括: ① PVT 反应时 (RT); ② N-back 反应时; ③ N-back 准确率。对于 PVT 反应时, 采用单因素重复测量分析对比常规和动态照明暴露后的响应速度差异。对于 N-back 绩效, 采用 2 × 3 双因素重复测量分析方法对反应时和准确率分别进行处理, 以探究不同类型环境光照和难度等级下工作记忆能力的差异性。

MATB-II 数据通过系统自动采集记录, 具体指标包括: ① 监控任务反应时和准确率; ② 跟踪任务平均偏差距离; ③ 油路管理任务目标油泵油量及平均偏差。由于 MATB-II 并不能提供整体任务绩效, 本文采用归一化 (Z-score) 计算综合绩效得分:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \tag{1}$$

式中: x_{ij} 为第 i 个样本进行第 j 个任务时的数据, $\min\{x_{ij}\}$ 为第 j 个子任务的所有样本中的最小值, $\max\{x_{ij}\}$ 为第 j 个子任务的所有样本中的最大值。

2.3 EEG 数据采集与处理

利用美国 NeuroScan 公司的 64 导 Ag/AgCl 电

极帽实时采集 EEG 信号, 采样频率为 1 000 Hz。采用 10-20 国际标准扩展电极系统, 以 REF 参考电极, 左眼眼眶上、下 1 cm 处和左、右外眼角 1 cm 处放置电极记录垂直和水平眼电以便后续进行眨眼矫正, 所有电极的阻抗均降到 5 kΩ 以下。分析时以双侧乳突电极为参考, 进行 0.1 ~ 45.0 Hz 的带通数字滤波, 并对眨眼伪迹进行自动校正。使用 Matlab R2020 (MathWorks Inc, Natick, MA, USA) 的 EEGLAB 工具包降采样至 250 Hz, 将 5 min EEG 信号分成 150 个 2 s 的片段, 选取前 120 段 (即前 4 min) 的数据进行分析, 去除含有伪迹的信号 (绝对信号幅值 > 75 μV)。研究发现, 较低频率的脑电图节律比较高频率的脑电图节律对警觉性的变化更敏感^[23]。因此, 采用 Welch 法计算 θ (4 ~ 7 Hz), α (8 ~ 12 Hz) 和 α - θ (5 ~ 9 Hz) 频带功率谱密度。本文分析了中线电极 (Fz、Cz、Pz) 内各频域平均功率谱密度, 采用 2 (环境光照) × 3 (光暴露时期: 前、后) × 3 (电极位置) 三因素重复测量方差分析方法来探究不同环境光照和任务难度影响下的大脑中枢神经活动差异。

3 结果分析与讨论

3.1 疲劳诱发有效性验证

对疲劳诱发前后精神状态评分的重复测量方差分析发现: 疲劳诱发后, 主观困倦评分显著上升 ($F(2, 30) = 22.13, p = 0.001$), 主观警觉评分显著下降 ($F(2, 30) = 57.75, p < 0.001$)。成对比较结果表明, 两次疲劳诱发后的主观评分之间无显著性差异, 但与基线阶段存在的差异具有统计学意义。对疲劳诱发前后情绪状态评分的重复测量方差分析发现: “疲惫 - 惰性” 和 “抑郁 - 沮丧” 评分在疲劳诱发后显著上升 ($F(2, 30) = 45.31, p < 0.001$; $F(2, 30) = 16.51, p < 0.001$)。成对比较结果表明, 两次疲劳诱发后的主观评分之间无显著性差异, 但均与基线阶段的主观评分存在显著性差异。上述结果说明

AX-CPT 任务成功实现了对疲劳的控制。

3.2 主观评估的光响应差异

KSS 评分的分析结果发现, KSS 评分在基线阶段最低($M \pm SD: 4.25 \pm 1.65$), 常规照明最高($M \pm SD: 6.13 \pm 1.86$), 动态照明次之($M \pm SD: 4.88 \pm 1.54$), 并且基线阶段、常规照明和常规照明、动态照明两个组别的 KSS 评分均存在显著性差异($F(2, 30) = 6.01, p < 0.010$)。该结果表明, 被试在基线阶段主观警觉度最高, 在经历疲劳诱发和长时认知任务后, 其主观警觉性在不同实验光暴露条件下均表现出不同程度的变化。值得注意的是, 疲劳评分仅在常规照明中显著上升, 这说明动态照明在一定程度上抑制了复杂认知范式中的认知资源耗损, 有效缓解了高认知负荷需求带来的警觉性受损, 保证被试在实验结束后仍能保持与基线水平相当的高度警觉状态。

对 PANAS 量表的分析结果发现, 基线阶段、常规照明和动态照明下的主观情绪评分存在显著性差

异(正向情绪中 $F(2, 30) = 13.76, p < 0.001$; 负向情绪中 $F(2, 30) = 10.36, p < 0.010$)。多重比较结果显示, 常规照明下的正向情绪较基线阶段出现显著下降($p < 0.010$), 并且显著低于动态照明($p < 0.001$); 而动态照明下的正向情绪与基线阶段无显著性差异($p = 0.290$)。此外, 常规照明下的负向情绪较基线阶段显著提升($p < 0.010$), 并且显著高于动态照明($p < 0.010$); 而动态照明下的负向情绪与基线阶段无显著性差异($p = 0.190$)。上述结果说明动态照明改善了脑力疲劳伴随的情绪波动问题, 有效抑制了负向情绪累积。

3.3 行为绩效的光响应差异

被试在实验光暴露阶段依次完成 PVT、MATB-II 和 N-back 任务以评估疲劳个体在不同环境光照下的认知行为响应。前期安排 16 位被试参与实验, 但由于设备故障问题导致最终 15 位样本形成的 105 份有效行为数据片段被纳入统计分析, 各项绩效数据的描述性统计如图 3 所示。

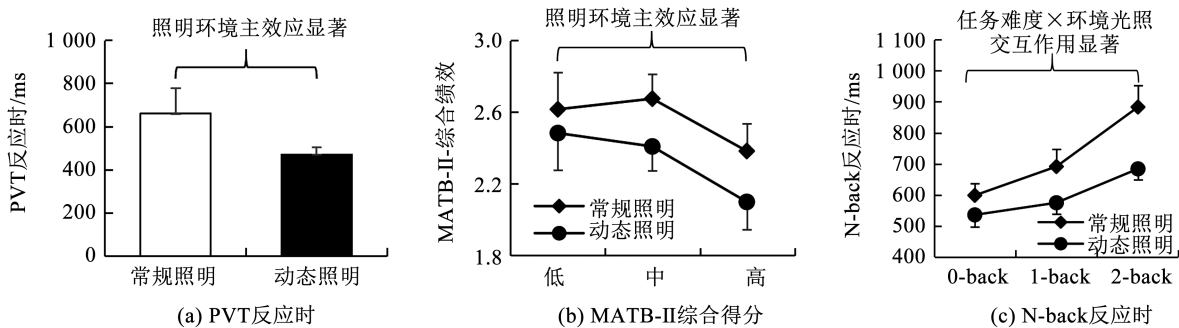


图 3 不同环境光照下的认知绩效

Fig. 3 Cognitive performance under different lighting environments

PVT 任务响应时间结果显示动态照明下的 PVT 反应时显著小于常规照明 ($F(1, 14) = 4.86, p < 0.050$)。该任务被设置在实验光暴露初期 (即光适应后), 上述结果表明个体警觉性和持续注意力在动态光暴露期间发生了即时响应, 这与目前关于急性警觉光效应的研究结果^[24]基本保持一致。

MATB-II 任务综合绩效结果显示环境光照和任务难度显著的主效应 ($F(1, 14) = 5.26, p < 0.050$; $F(2, 28) = 4.53, p < 0.050$)。成对比较结果发现动态照明下的任务表现显著优于常规照明 ($p < 0.050$)。该结果证明动态照明在一定程度上提升了疲劳群体的执行控制能力。

N-back 任务反应时和准确率结果显示“任务难度 $\times$ 环境光照”的交互作用显著 ($F(2, 28) = 6.99, p < 0.050$), 单独效应分析结果显示在 0-back、1-back 和 2-back 任务中, 动态照明下的反应时间均显著低于常规照明 ($p < 0.050$), 常规照明下不同任

务难度对应的反应时表现出显著差异 ($p < 0.050$), 但动态照明下只有 0-back、2-back 和 1-back、2-back 组别内的差异具有统计学意义, 而 0-back、1-back 之间没有显著性差异 ($p = 0.070$)。在准确率上既没有发现“任务难度 $\times$ 环境光照”的显著交互作用, 也没有发现环境光照的显著主效应, 任务难度对准确率具有显著主效应。上述结果表明动态照明对疲劳人群的工作记忆能力有显著的提升作用, 并且受到任务难度的调节。

3.4 EEG 指标的光响应差异

实验过程中采集了 EEG 数据以评估疲劳个体在不同环境光暴露前后下的大脑活动。前期安排 16 位被试参与实验, 其中 2 位被试的 EEG 数据由于受到其他信号的干扰导致后期伪迹难以消除, 故在叠加平均时被剔除, 最终 14 位样本形成的 168 份有效 EEG 片段被纳入分析, 描述性统计见表 1。

表 1 不同环境光照下的 α 、 θ 和 α - θ 频段能量均值 $\pm$ 标准差数据

Tab. 1 α , θ and α - θ band activity under different lighting environments ($\mu\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)

电极位置	环境光照	α 频段		α - θ 频段		θ 频段	
		光暴露前	光暴露后	光暴露前	光暴露后	光暴露前	光暴露后
Fz	常规照明	4.41 $\pm$ 2.21	5.25 $\pm$ 3.05	4.69 $\pm$ 1.68	5.42 $\pm$ 2.81	4.86 $\pm$ 1.52	5.49 $\pm$ 2.41
	动态照明	4.77 $\pm$ 3.03	4.17 $\pm$ 2.61	5.24 $\pm$ 2.96	4.61 $\pm$ 2.48	5.39 $\pm$ 2.51	4.69 $\pm$ 1.99
Cz	常规照明	4.18 $\pm$ 2.04	5.35 $\pm$ 3.58	3.71 $\pm$ 1.64	4.68 $\pm$ 3.70	3.69 $\pm$ 1.37	4.46 $\pm$ 2.84
	动态照明	4.70 $\pm$ 2.99	4.01 $\pm$ 2.69	4.34 $\pm$ 3.73	3.83 $\pm$ 2.91	4.21 $\pm$ 2.93	3.80 $\pm$ 2.40
Pz	常规照明	3.19 $\pm$ 1.65	3.89 $\pm$ 2.99	2.68 $\pm$ 1.88	3.71 $\pm$ 5.23	2.59 $\pm$ 1.49	3.45 $\pm$ 4.05
	动态照明	3.63 $\pm$ 2.74	3.13 $\pm$ 2.69	3.51 $\pm$ 4.98	3.34 $\pm$ 4.75	3.26 $\pm$ 3.86	3.17 $\pm$ 3.84

脑地形图

常规照明

动态照明

1) α 频段分析。“环境光照 $\times$ 光暴露时期”交互作用显著 ($F(1,13) = 9.14, p = 0.010$), 单独效应分析发现光暴露前, 各中线电极的 α 频段能量在环境光照上不存在显著性差异 ($p > 0.050$), 说明被试 α 频段活动基线一致。但光暴露后, 无论何种电极位置的 α 频段均在常规照明上升, 动态光照明下降, 且两者存在的差异具有显著性 ($p < 0.050$)。先前研究表明, EEG 中 α 频段活动与觉醒水平呈负相关^[25]。本文进一步验证了动态照明在下午时段显著降低了 α 频段活动, 该结果与 Ye 等^[26]的发现相一致, 即动态照明对 α 频段有显著抑制作用。

2) α - θ 频段分析。在电极 Fz 点发现了“环境光照 $\times$ 光暴露时期”的显著交互作用 ($F(1,13) = 4.89, p < 0.050$)。单独效应分析发现光暴露前, 被试的 α - θ 频段活动并无显著性差异 ($p > 0.050$), 说明被试 α - θ 频段活动基线一致。光暴露后, α - θ 频段活动在常规照明后上升, 动态照明后下降, 且两者存在的差异具有显著性 ($p < 0.010$)。Askaripoor 等^[27]在报告日间光照对警觉性影响研究中称 α - θ 频段活动的下降 (而非升高) 可以解释为警觉性增加。因此, 本文中 α - θ 频段活动结果证明了动态照明的急性警觉效应。

3) θ 频段分析。在电极 Fz 点发现了“环境光照 $\times$ 光暴露时期”的显著交互作用 ($F(1,13) = 5.63, p < 0.050$)。单独效应分析发现光暴露前, 被试的 θ 频段活动并无显著性差异 ($p > 0.050$), 说明被试 θ 频段活动基线一致。光暴露后, θ 频段活动在常规照

明后上升, 在动态照明后下降, 且两者存在的差异具有显著性 ($p < 0.010$)。据报道, θ 频段活动的增加被标记为低水平的觉醒或警觉^[28]。因此, 动态照明显著提升疲劳群体觉醒水平。

4 结 论

1) 常规照明下的脑力疲劳会导致主观警觉下降、主观情绪紊乱以及认知功能受损, 严重影响个体警觉注意、工作记忆和执行控制能力。

2) 相反, 动态照明下的疲劳症状却得到显著改善, 这表明动态照明能够在一定程度缓解认知耗损任务带来的疲劳加剧, 使个体长时间保持稳定的心理状态和操作技能。

3) 脑电数据显示动态照明的疲劳干预机制主要体现在额叶区的觉醒激活, 尤其是低频频段活动抑制诱发的、与警觉性相关的皮层下结构。

4) 尽管当前证据初步验证了动态照明的疲劳干预效果, 但由于研究有限, 关于这种疲劳干预效果背后的作用机制仍需要进一步研究论证。后续研究须在此基础上深入探讨 CCT 水平、光的动态性以及人体精神状态对光生物效应的潜在调节作用。此外, 未来研究也将考虑结合传统照明灯具和智能控制算法以搭建自适应照明系统, 根据调度员脑力负荷状态动态调节环境光照, 提高人机环适配性。

参考文献

[1] 张嫻. 基于任务分析的地铁行车调度工作负荷研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010

- ZHANG Yan. Research on subway dispatchers' workload based on task analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010
- [2] 杨奎. 铁路列车调度员疲劳机理与发展规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017
YANG Kui. Mechanism and developing law of railway dispatcher's fatigue[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017
- [3] MUSINA A, ABDULDAYEVA A, SULEIMENOV B, et al. The psychophysiological status of rail traffic operators and modern approaches to its correction[J]. *Public Transport*, 2022, 14(3): 635. DOI: 10.1007/s12469-021-00272-2
- [4] HASHEMI NAZARI S S, MORADI A, RAHMANI K. A systematic review of the effect of various interventions on reducing fatigue and sleepiness while driving[J]. *Chinese Journal of Traumatology*, 2017, 20(5): 249. DOI: 10.1016/j.cjtee.2017.03.005
- [5] BERSON D M, DUNN F A, TAKAO M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock[J]. *Science*, 2002, 295(5557): 1070. DOI: 10.1126/science.1067262
- [6] 王立雄, 孔光燕, 张丽娟, 等. 照明环境对交互阅读视觉和认知的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(11): 67
WANG Lixiong, KONG Guangyan, ZHANG Lijuan, et al. Effects of lighting environment on vision and cognition of interactive reading[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(11): 67. DOI: 10.11918/202111087
- [7] FIGUEIRO M G, BRAINARD G C, LOCKLEY S W, et al. Light and human health: An overview of the impact of optical radiation on visual, circadian, neuroendocrine, and neurobehavioral responses; IES TM-18-08[S]. New York: Illuminating Engineering Society Technical Memorandum, 2008
- [8] NIE Jingxin, ZHOU Tianhang, CHEN Zhizhong, et al. The effects of dynamic daylight-like light on the rhythm, cognition, and mood of irregular shift workers in closed environment[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 13059. DOI: 10.1038/s41598-021-92438-y
- [9] 孙玉卿. 符合自然光周期的动态照明对心理健康的作用及设计策略[D]. 哈尔滨工业大学, 2021
SUN Yuqing. Research on the effect of daylight-cycle-synchronized dynamic lighting on mental health and design strategy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.004452
- [10] ARIES M B C, BEUTE F, FISCHL G. Assessment protocol and effects of two dynamic light patterns on human well-being and performance in a simulated and operational office environment[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2020, 69: 101409. DOI: 10.1016/j.jenvp.2020.101409
- [11] 李彦洁, 方卫宁. 动态照明对地铁调度员疲劳干预的可行性探讨[C]//2020年中国照明论坛——半导体照明创新应用暨智慧照明发展论坛论文集. 苏州: 中国照明学会, 2020: 10
LI Yanjie, FANG Weining. Discussion on feasibility of intervention of dynamic lighting on fatigue of metro dispatchers[C]//2020 China Lighting Forum-Semiconductor Lighting Innovative Application and Smart Lighting Development Forum. Suzhou: China Illuminating Engineering Society, 2020: 10. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.030146
- [12] KOMPIER M E, SMOLDERS K C H J, DE KORT Y A W. A systematic literature review on the rationale for and effects of dynamic light scenarios[J]. *Building and Environment*, 2020, 186: 107326. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107326
- [13] SMITH M R, CHAI R, NGUYEN H T, et al. Comparing the effects of three cognitive tasks on indicators of mental fatigue[J]. *The Journal of Psychology*, 2019, 153(8): 759. DOI: 10.1080/00223980.2019.1611530
- [14] HAO Chao, LI Mingzhu, LUO Wei, et al. Dissociation of subjective and objective alertness during prolonged wakefulness[J]. *Nature and Science of Sleep*, 2021, 13: 923. DOI: 10.2147/NSS.S312808
- [15] ZHANG Liwei, SHAO Yongcong, LIU Zhongqi, et al. Decreased information replacement of working memory after sleep deprivation: Evidence from an event-related potential study[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, 13: 408. DOI: 10.3389/fnins.2019.00408
- [16] MOHAMMADZADEH S, FARSI A, KHOSROWABADI R. The effect of cognitive fatigue on the neural efficacy of the executive control network among athletes: dual regulation system model[J]. *Sport Psychology Studies*, 2020, 8(30): 41. DOI: 10.22089/spssj.2019.7301.1778
- [17] MAIMON N, MOLCHO L, INTRATOR N, et al. Single-channel EEG features during n-back task correlate with working memory load[EB/OL]. 2020; arXiv: 2008. 04987. <http://arxiv.org/abs/2008.04987>
- [18] International Organization for Standardization. Ergonomic design of control centres—Part 6: Environmental requirements for control centres: ISO 11064-6[S]. Switzerland: ISO, 2005
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑照明设计标准: GB50034—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for lighting design of buildings: GB50034—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014
- [20] FIGUEIRO M G, KALSHER M, STEVERSON B C, et al. Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers[J]. *Lighting Research & Technology*, 2019, 51(2): 171. DOI: 10.1177/1477153517750006
- [21] AKERSTEDT T, GILLBERG M. Subjective and objective sleepiness in the active individual[J]. *The International Journal of Neuroscience*, 1990, 52(1/2): 29. DOI: 10.3109/00207459008994241
- [22] 黄丽, 杨廷忠, 李忠民. 正性负性情绪量表的中国人群适用性研究[J]. 中国心理卫生杂志, 2003, 17(1): 54
HUANG Li, YANG Tingzhong, LI Zhongmin. Applicability of the positive and negative affect scale in Chinese[J]. *Chinese Mental Health Journal*, 2003, 17(1): 54. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6729.2003.01.018
- [23] PERRIN S L, JAY S M, VINCENT G E, et al. Waking qEEG to assess psychophysiological stress and alertness during simulated on-call conditions[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2019, 141: 93. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2019.04.001
- [24] KOMPIER M E, SMOLDERS K C H J, VAN MARKEN LICHTENBELT W D, et al. Effects of light transitions on measures of alertness, arousal and comfort[J]. *Physiology & Behavior*, 2020, 223: 112999. DOI: 10.1016/j.physbeh.2020.112999
- [25] LIN J, WESTLAND S, CHEUNG V. Effect of intensity of short-wavelength light on electroencephalogram and subjective alertness[J]. *Lighting Research & Technology*, 2020, 52(3): 413. DOI: 10.1177/1477153519872801
- [26] YE M, ZHENG S Q, WANG M L, et al. The effect of dynamic correlated colour temperature changes on alertness and performance[J]. *Lighting Research & Technology*, 2018, 50(7): 1070. DOI: 10.1177/1477153518755617
- [27] ASKARIPOOR T, MOTAMEDZADE M, GOLMOHAMMADI R, et al. The parallel effect of correlated color temperature and illumination level on alertness and cognitive performance: A multi-measure study[J]. *Journal of Health and Safety at Work*, 2021, 11(4): 674
- [28] PETIT G, CEBOLLA A M, FATTINGER S, et al. Local sleep-like events during wakefulness and their relationship to decreased alertness in astronauts on ISS[J]. *NPJ Microgravity*, 2019, 5: 10. DOI: 10.1038/s41526-019-0069-0