

# 动态光照对密闭空间人员睡眠节律和警觉性的长期影响

汪统岳<sup>1,2,3</sup>, 邵戎镝<sup>3,4</sup>, 王燕尼<sup>3,4</sup>, 李娟洁<sup>3,4</sup>, 代书剑<sup>3,4</sup>, 于 闯<sup>3,4</sup>, 郝洛西<sup>3,4</sup>

(1. 同济大学附属养志康复医院, 上海 201619; 2. 同济大学 医学院, 上海 201619; 3. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092; 4. 同济大学 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为研究人在长期缺乏采光的密闭空间内容易发生昼夜节律紊乱和睡眠障碍的问题, 对 20 名被试者在地下密闭空间内进行了连续 4 周的光照实验, 且每周采用一种光照模式, 测量睡前的褪黑素、皮质醇、主观困倦度和核心体温, 监测睡眠主观评价得分、入睡潜伏期、夜间反应时间和错误率等指标, 由实验可知, 第 1 周采用恒定光照模式, 睡前褪黑素浓度和困倦度逐天降低, 核心体温逐天增加; 第 2 周作息时间强制前移了 2 h; 第 3 周采用动态光照模式, 在夜间采用强光刺激, 睡前核心体温和皮质醇浓度提高, 褪黑素浓度和主观困倦度下降, 睡眠得分和睡眠潜伏期逐天增加, 睡眠质量逐天变差, 反应时间变短、错误率降低; 第 4 周采用晨间强光刺激和夜间暗光保护的动态光照模式, 睡前褪黑素浓度和困倦度显著提升、核心体温和睡眠潜伏期逐天降低, 睡眠质量逐渐改善。光照对昼夜节律和睡眠质量的影响存在逐天累积的效应, 通过动态光照模式可针对性地帮助密闭空间内的人员保持昼夜节律的稳定性和适应各自的轮班作业时间。

**关键词:** 建筑光学; 密闭空间; 健康照明; 昼夜节律; 睡眠质量

中图分类号: TU113

文献标志码: A

## Long-Term Effects of Dynamic Lighting on Sleep, Circadian Rhythms, and Alertness of Individuals in Confined Spaces

WANG Tongyue<sup>1,2,3</sup>, SHAO Rongdi<sup>3,4</sup>, WANG Yanni<sup>3,4</sup>, LI Juanjie<sup>3,4</sup>, DAI Shujian<sup>3,4</sup>, YU Chuang<sup>3,4</sup>, HAO Luoxi<sup>3,4</sup>

(1. Shanghai Yangzhi Rehabilitation Hospital, Tongji University, Shanghai 201619, China; 2. School of Medicine, Tongji University, Shanghai 201619, China; 3. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key

Laboratory of Ecology and Energy-Saving Study of Dense Habitat of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Individuals who spend long periods of time in confined spaces that lack light are prone to problems such as circadian rhythm disruption and sleep disorders. This paper investigates the impact of lighting on 20 subjects in an underground confined space over 4 consecutive weeks, with different lighting pattern applied each week. Melatonin, cortisol, subjective sleepiness, and core body temperature are measured at bedtime, while metrics such as subjective sleep scores, sleep onset latency, nocturnal reaction time, and error rate are monitored. The results show that a daily decrease in melatonin concentration and sleepiness at bedtime and a daily increase in core body temperature under the constant lighting pattern in the 1st week. In the 2nd week, the routine is advanced by 2 hours. In the 3rd week, a dynamic lighting pattern with bright light stimulation at night led to an increase in core body temperature and cortisol concentration at bedtime, a decrease in melatonin concentration and subjective sleepiness, as well as a daily increase in sleep scores and sleep latency. Additionally, sleep quality deteriorated daily, with shorter reaction times and lower error rates. In the 4th week, a dynamic lighting pattern of strong lighting stimulation in the morning and dim light protection at night resulted in a significant increase in melatonin concentration and sleepiness at bedtime, as well as a day-by-day decrease in core body temperature and sleep latency. Sleep quality gradually improved over the week. These findings suggest that the effects of lighting on

收稿日期: 2023-07-27

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3805300); 上海市科学技术委员会科技创新行动计划(20dz1207200, 22dz1202400)

第一作者: 汪统岳, 博士后, 工学博士, 主要研究方向为建筑光学、医养建筑的健康照明。

E-mail: wangtongyue@tongji.edu.cn

通信作者: 郝洛西, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为人居健康光环境与半导体照明创新应用。

E-mail: haoluoxi@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

circadian rhythms and sleep quality cumulate over time. Dynamic lighting patterns can be strategically used to help people in the confined spaces maintain stable circadian rhythms and adapt to respective shift work schedules.

**Keywords:** architecture lighting; confined spaces; healthy lighting; circadian rhythm; sleep quality

人体的生物钟受天然光明暗周期的影响,与自然界的日出日落保持同步<sup>[1]</sup>。光照作为重要的节律授时因子,通过内在光敏视网膜神经节细胞<sup>[2]</sup>(ipRGCs)感知光刺激,经过神经通路传导至下丘脑处的视交叉上核(Suprachiasmatic nuclei, SCN),再经由脑室外神经核(Paraventricular nucleus, PVN)和上颈神经节(Superior cervical ganglia)到松果体(Pineal gland),进而控制褪黑素(Melatonin)和皮质醇(Cortisol)等激素的分泌<sup>[3]</sup>,调节人体的核心体温和主观警觉性,调控生物节律和睡眠觉醒周期<sup>[4]</sup>,也会造成认知能力和情绪的变化<sup>[5]</sup>。

但是在潜艇、航天器、地下控制中心和南极科考站极夜期间等缺乏天然光的极端密闭环境下(Isolated and confined extreme environments, ICE)<sup>[6]</sup>,人工照明的场景相对固定,缺乏动态变化。人员难以感知时间的变化,容易导致昼夜节律紊乱和睡眠障碍等问题。随着密闭时间的延长,入睡潜伏期和反应时间会逐渐增加,睡眠质量和认知能力逐渐恶化<sup>[7]</sup>。由于人体生物钟的周期约为 24.2 h,节律相位也会逐渐后移<sup>[8-9]</sup>。长期在地下洞穴中生活的人员入睡和觉醒时间逐渐发生推迟,但始终保持着 24 h 左右的睡眠觉醒周期<sup>[10]</sup>。Mars 500 项目进行了连续 520 d 的火星旅行模拟实验,发现 6 名被试的睡眠和休息的时间比例增加,睡眠质量逐渐变差,睡眠一觉醒时间也发生了变化,且认知能力和积极的情绪均有所降低<sup>[11-12]</sup>。Chen 等在“月宫 365 实验”中发现 4 名被试的尿液褪黑素浓度峰值普遍发生了延迟,并建议采用模拟日光的动态光照方式对身心健康进行主动干预<sup>[13]</sup>。相对于地面公交上能够接触天然光的工人,在地铁内工作的人员失眠、嗜睡和睡眠障碍的比例更高<sup>[14]</sup>。无窗空间内的办公人员比有窗空间的人员睡眠匹兹堡得分更高,睡眠质量更差<sup>[15]</sup>。可见传统的密闭空间光环境对人员的激素节律、睡眠质量和认知能力均产生了不利影响。

密闭空间相对封闭压抑,与外界联系较少,缺少亲情关怀和社交活动,加剧了人员抑郁、焦虑等负面

情绪的风险,造成人员的作业能力和记忆力等认知表现变差<sup>[16]</sup>,甚至导致意外事故<sup>[17]</sup>。南极科考站的极夜期间与之类似,长期的日光缺乏会导致昼夜节律的稳定性下降、节律相位延迟和睡眠质量下降<sup>[18-19]</sup>,引发孤独感、认知下降和人际关系紧张、季节性情感障碍亚症状<sup>[20]</sup>、紧张和焦虑情绪增加<sup>[21]</sup>等越冬综合征、T3 综合征问题<sup>[22-24]</sup>。此外,在新冠疫情居家隔离的情况下,室外天然光暴露的大幅减少诱导了睡眠时间的延迟、睡眠质量下降和身心健康的恶化<sup>[25-26]</sup>,并建议白天在尽量在户外接受更多的天然光刺激,以减轻隔离导致的负面影响<sup>[27-28]</sup>。此外,密闭空间内普遍存在的轮班工作制度导致睡眠剥夺和加剧了睡眠紊乱问题<sup>[29]</sup>。轮班工作期间不当的光照刺激容易导致入睡困难、睡眠不足<sup>[30]</sup>、情绪恶化<sup>[31-32]</sup>,增加心脏的代谢压力,导致短期的记忆力下降<sup>[33]</sup>,也与体重、BMI 指数(Body Mass Index)增加、肥胖风险和葡萄糖耐受量降低有关<sup>[34-35]</sup>,容易诱发冠心病和中风等心血管疾病<sup>[36]</sup>。

考虑到密闭空间的健康光照需求,不少研究者尝试采用符合人体生理需求的动态光照模式对地下空间、缺乏采光的办公室和工厂等空间进行了光照刺激,取得了较好的健康干预效果。高色温、高照度值的照明方案在地下空间的照明环境中很受欢迎<sup>[37]</sup>。Young 等<sup>[38]</sup>对 29 名艇员在潜艇任务中分别采用了 13 500 K 的高色温光照和 4 100 K 的低色温光照刺激,结果发现人员偏好高色温产生的生理节律刺激,行为表现和睡眠质量更好。Nie 等<sup>[39]</sup>让 3 名受试者在地下密闭环境中轮班工作了 38 天,采用色温(Correlated Color Temperature, CCT)和昼夜节律因子(Circadian action factor, CAF)可调的 LED 动态照明来模拟天然光变化,结果表明受试者的节律保持稳定并有所增强,血液褪黑素的峰值浓度明显增加,模拟日光的 LED 动态照明方式在密闭环境中有效地诱导和增强了昼夜节律。Lowden 等<sup>[40]</sup>在没有窗户的核电站控制室中对 7 名轮班工人采用动态照明模式进行研究,相对于传统恒定的光照模式而言,适当的动态照明可以提高警觉性、促进睡眠和更好地适应快速轮班工作。因此,白天和夜间适宜的动态光照模式可以有效改善人体的昼夜节律,使其与 24 h 的昼夜周期保持同步。

由于长期密闭环境下的人体实验开展难度较大,需要满足被试的日常生活需求,且风险较大,对被试的身体和心理素质要求较高。目前针对密闭空间的光照研究较少,且多为小样本的实验,短期的光

照实验在前往实验室的过程中难免受到外界天然光的影响,也缺乏长期的效应验证。密闭空间屏蔽了天然光的影响,是理想的光照研究环境。因此,本研究在地下实验室中对20名被试进行了连续4周的密闭人因实验,分别采用静态和动态的光照模式,评价其昼夜节律和睡眠质量的长期变化趋势。首先在第1周采用模拟现状的恒定光照模式,观察密闭环境对人体睡眠和节律的影响。然后在第2周人为调整作息规律形成新的节律相位。第3周和第4周分别采用不同的动态光照模式对节律相位进行主动干预,帮助密闭空间内的人员调整节律相位,并评价其节律指标、睡眠质量和工作绩效在每周内的变化趋势,旨在得出适宜的动态光照参数组合,帮助人员调整“社会时差”,尽快适应新的轮班工作时间。

## 1 实验方法

### 1.1 被试筛选

考虑到密闭空间的作业人员多为男性,对身体

和心理素质要求较高。此外,考虑到实验的周期较长、实验室空间有限,且女性的生理因素对褪黑素分泌的影响,本次实验选择了相同性别和年龄相近的男性受试者,以尽量减少个体差异对昼夜节律的影响。最终招募了20名大学生被试,年龄为 $22.60 \pm 1.88$ 周岁,BMI指数为 $23.74 \pm 3.32$ ,身体健康,矫正视力正常,无色盲、色弱、青光眼等眼部疾病,无酗酒、抽烟等习惯。平时作息规律,均在学校住宿,习惯了集体宿舍和上下铺的睡觉方式。

本研究通过了同济大学医学与生命科学伦理委员会的审查(编号:2021tjdx069),所有被试均签订了知情同意书,并获得了一定的实验酬劳。

### 1.2 实验场景

(1)实验室搭建。密闭实验室由地下室改造而成,内部办公室、会议室、展览室、健身房、卫生间、淋浴间等生活设施齐全,将其中4间改造成睡眠舱室,每间舱室可住5人(见图1)。此外,配有仪器设备室1间、活动室2间,硬件设施良好,可满足日常生活需求。

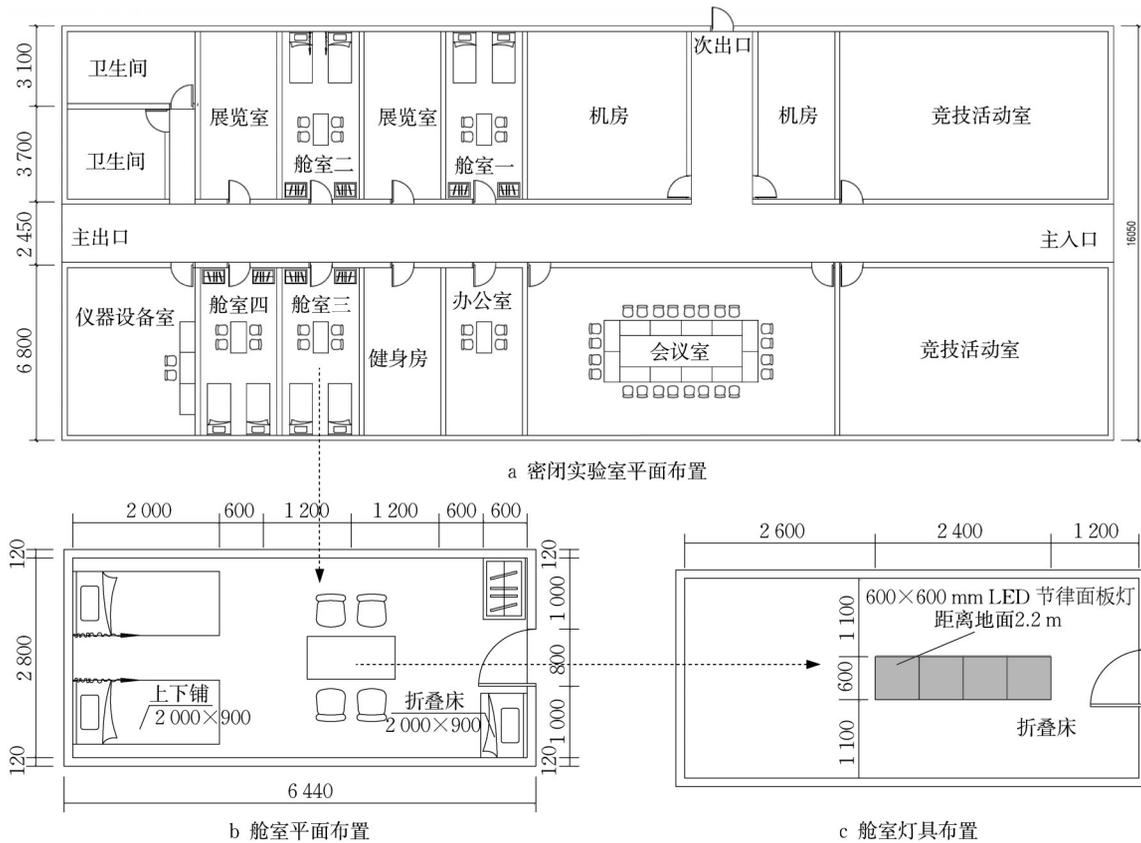


图1 地下实验室平面和灯具布置(单位:mm)

Fig. 1 Layout of underground confined laboratory and lamps (unit: mm)

(2)光照参数。暗光褪黑素初始释放时间(Dim light melatonin onset, DLMO)作为内在昼夜节律相

位的标志物,是评价人体节律相位延迟或提前的有效方法<sup>[41]</sup>。具体指褪黑素相对于白天的低浓度水平

明显升高的时间点,通常在睡前的5 h连续测定褪黑素浓度水平来确定DLMO。由于暴露在光线下会抑制褪黑素的自然分泌,因此需要在暗光环境下(低于30 lx)进行测定<sup>[42-43]</sup>。分别在实验开始第一天和每周的最后一天,睡前5 h内采用暗光模式进行DLMO的测量,整个夜间的桌面照度为29.39 lx,眼部照度为10.61 lx,生理等效照度(melanopic equivalent daylight illuminance, *melanopic* EDI)为9.75 lx。桌面照度为每个房间距离地面0.75 m工作面的水平照度平均值,眼部照度为被试坐立时视线朝向的方向在距离地面1.2 m高度的眼部位置的垂直照度的平均值,采用柯尼卡美能达分光辐射照度计(CL-500A)进行测量,每个房间取4个点,计算出每个点的EDI照度、等效节律照度( $C_{LA}$ )、等效节律刺激值( $C_s$ ),最后取平均值。

共设置4种光照模式(见图2),分别为模拟现状的恒定光照模式、相位前移模式、相位后移模式和

DLMO光照模式(见表1)。第1周采用模拟现状模式,参照地下密闭空间的照明现状和照明设计标准,选取6 000K的常用色温和300 lx的工作面照度进行恒定光照。第2周和第4周均采用诱导相位前移的人因照明模式,早晨醒后的1 h采用中等白光模式进行唤醒照明,上午工作时段(醒后的1~4 h)采用强白光模式,下午采用模拟现状模式,傍晚(睡前2~5 h)采用中等黄光模式逐步减少节律刺激,睡前2 h采用光照刺激值最低的睡前黄光模式。为减少第1周的光照模式对被试节律的影响,第2周对被试的作息时间进行人为干预,每2天强制提前30 min,并利用光照进行辅助调节。第3周采用诱导节律相位后移的光照模式,早晨醒后的1 h采用光照刺激较低的中等黄光模式,白天采用模拟现状模式,傍晚(睡前3~5 h)逐渐提高光照刺激的强度,睡前的3 h采用强白光模式。

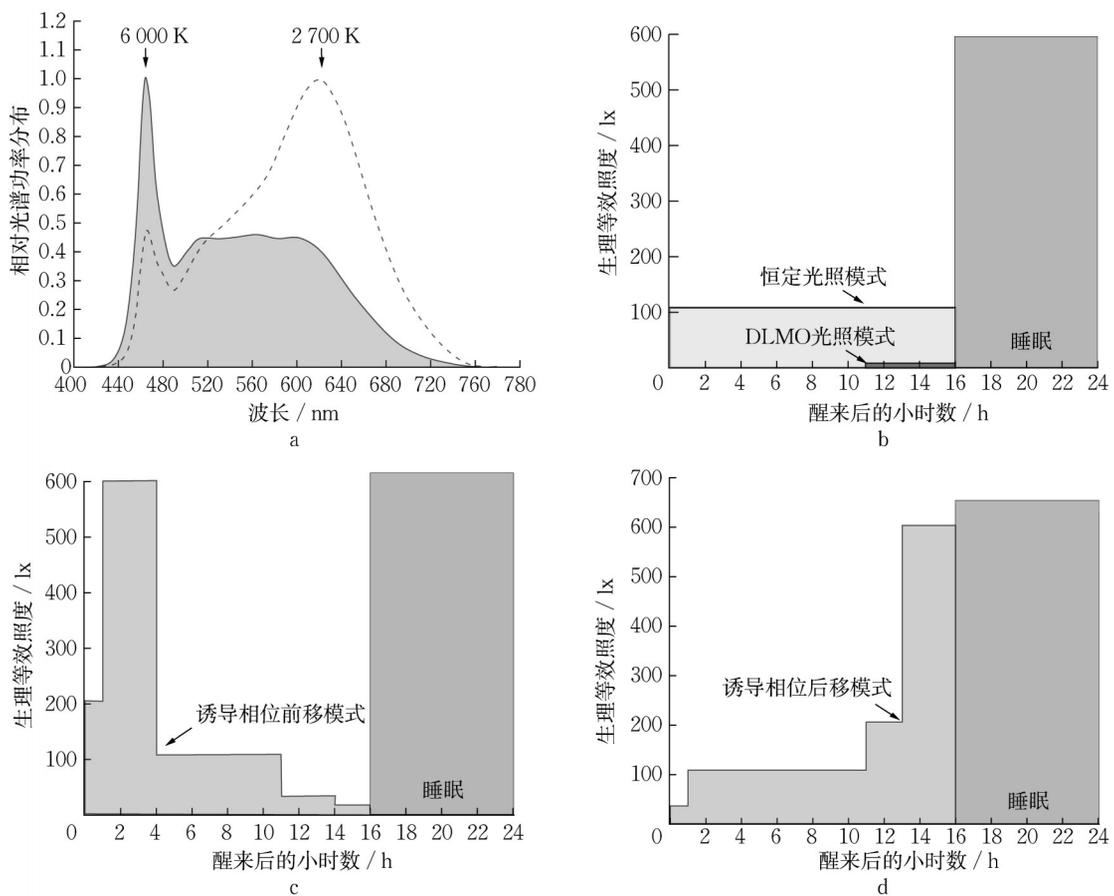


图2 不同光照模式的相对光谱功率分布和生理等效照度变化

Fig. 2 Relative SPD and *melanopic* EDI of different lighting patterns

### 1.3 实验流程

被试在实验前一周开始佩戴睡眠手环,监测睡

眠数据,保证规律作息。在正式进舱前3天可以睡在实验室适应环境,白天可自由出入。7月30日上

表1 不同光照模式下的光照参数

Tab. 1 Lighting parameters of different patterns

| 光照场景     | 桌面照<br>度/lx | 眼部照<br>度/lx | Melanopic<br>EDI/lx | $C_{LA}/$<br>lx | $C_S$ | 色温/<br>K |
|----------|-------------|-------------|---------------------|-----------------|-------|----------|
| 模拟现状模式   | 310.76      | 121.38      | 109.45              | 168             | 0.21  | 6 000    |
| 强白光模式    | 1 547.28    | 637.70      | 603.57              | 917             | 0.52  | 6 000    |
| 中等白光模式   | 606.76      | 220.60      | 205.50              | 307             | 0.32  | 6 000    |
| 中等黄光模式   | 162.80      | 74.04       | 37.12               | 74              | 0.10  | 2 700    |
| 睡前黄光模式   | 86.68       | 35.75       | 17.24               | 36              | 0.05  | 2 700    |
| DLMO光照模式 | 29.39       | 10.61       | 9.75                | 12              | 0.02  | 6 000    |

午8:00在同济大学校医院统一进行体检,7月31日下午3:00举行入舱仪式,实验正式开始,全程在地下实验室密闭29天;直到8月29日上午10:00结束测试,完成出舱仪式后,统一离开实验室;8月30日上午8:00在同济大学校医院再次进行体检。

第1周采用模拟现状的固定光照模式,被试8:00起床,24:00结束工作后立即上床睡觉。考虑

到密闭1周后的节律自然偏移效果,第2周进行作息的人为干预,每2天强制提前0.5 h,同时采用诱导节律相位前移的光照模式进行辅助干预,最终将作息时间整体提前了2 h,即6:00起床、22:00睡觉。第3周采用诱导节律相位后移的人因照明模式,第4周则采用诱导节律相位前移的人因照明模式,每天均在22:00结束光照刺激。

实验期间全程佩戴睡眠手环以监测睡眠质量,每天早晨起床后填写睡眠日志,记录主观觉醒次数和睡眠质量等参数,计算匹兹堡睡眠质量指数(Pittsburgh sleep quality index, PSQI)。睡前采集唾液,检测褪黑素和皮质醇浓度,测量核心体温(鼓膜温度)和卡罗琳斯卡量表(Karolinska Sleepiness Scale, KSS得分),评价主观警觉性和兴奋度的变化(见图3)。

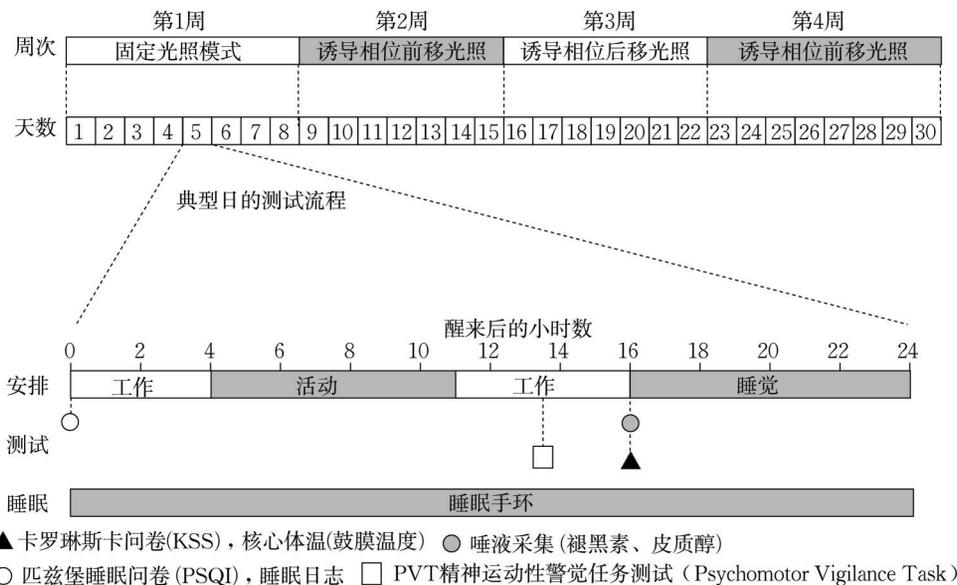


图3 实验流程和测试时间

Fig. 3 Experimental schedule and testing time

#### 1.4 测试方法和指标

(1)褪黑素和皮质醇浓度。为评价被试睡前的褪黑素浓度变化,每天晚上光照结束时,利用唾液采集管采集唾液样本,采前15 min内禁止饮食,采集后立即离心5 min,取上清液1 ml,保存在 $-40^{\circ}\text{C}$ 的低温冰柜中待测。委托专业的生物公司(上海华盈生物医院科技有限公司 Wayen Biotechnologies (Shanghai), Inc)采用IBL International GmbH公司的saliva ELISA试剂盒进行测量,唾液褪黑素的检测范围为 $0\sim 50\text{ pg}\cdot\text{ml}^{-1}$ ,批内差(the intra-assay coefficient of variation (CV))小于10.8%,批间差(the inter-assay CV)小于13.0%。唾液皮质醇的检

测范围为 $0.005\sim 3\text{ ug}\cdot\text{dl}^{-1}$ ,批内差(the intra-assay coefficient of variation (CV))小于4.3%,批间差(the inter-assay CV)小于13.2%。

(2)核心体温。鼓膜温度测量方便,是衡量核心体温的良好指标<sup>[44]</sup>。采用博朗红外线电子耳温计(IRT6520)进行测量(精度为 $0.1^{\circ}\text{C}$ ),利用鼓膜温度为核心体温的近似值,以评价核心体温的变化趋势。每晚光照结束的时刻进行测量,每次均测量同一侧的耳朵。

(3)睡眠质量。被试在实验过程中全程佩戴智能睡眠手环(华为B4 Pro),记录每天的睡着时间和醒来时间。被试每天起床后立即填写融合了匹兹堡

睡眠量表的睡眠日志,记录每晚的觉醒次数和上床时间,计算得出睡眠主观评价得分(每天的匹兹堡睡眠问卷得分)和睡眠潜伏期。

(4)主观警觉性。采用卡罗琳斯卡嗜睡度(KSS)量表对此时的警觉度进行主观打分<sup>[45]</sup>,分数越高表示警觉性越低,困倦度越大。每晚睡前填写一次问卷,与鼓膜温度的测量时间相同。

(5)PVT警觉性任务。PVT精神运动性警觉任务测试(Psychomotor Vigilance Task)在多项研究中被用作注意力评价的方法,可将警觉性和认知反应的速度进行量化研究<sup>[46-47]</sup>。在夜间光照刺激2.5 h后,进行连续5 min的PVT测试,受试者通过注视iPad屏幕,每次出现数字时立即点击屏幕,记录从数字出现到点击屏幕的反应时间(以ms为单位),如果提前点击屏幕,将会被记录错误数。通过平均反应时间和错误率表征被试的警觉性和注意力集中能力。

### 1.5 统计分析方法

首先对实验数据进行正态分布检验,如果符合正态分布,采用配对T检验的方法进行统计分析。如果不符合正态分布,则采用非参数检验的Wilcoxon符号秩检验方法进行分析。如果统计结果 $p < 0.05$ ,表示差异具有统计学意义。实验数据用平均数加减标准差(Mean $\pm$ SD)表示,统计分析软件为IBM SPSS Statistics 23.0。

## 2 结果

### 2.1 光照模式对节律指标的影响

(1)睡前褪黑素浓度。由于DLMO的测量需要

在暗光环境下进行,夜间的褪黑素浓度整体升高,不能反映正常光照模式下的褪黑素水平,因此将测量DLMO的5个夜晚睡前褪黑素浓度数据单独进行分析(见图4b)。其余24 d的睡前褪黑素浓度存在波动性变化,由于每周的光照模式不同,且测量时间存在差异,将睡前褪黑素浓度按照周次进行分段,分别评价每周特定的光照模式下一周内的睡前褪黑素逐天变化情况(见图4a)。第1周为恒定光照模式,睡前的褪黑素浓度整体呈现降低趋势,其中第7天显著低于第2天( $p=0.014$ )和第5天( $p=0.037$ ),第3天显著低于第2天( $p=0.028$ ),第8天相对于第1天有所降低,但不显著( $p=0.191$ )。第2周采用诱导节律相位前移的光照模式,但作息时间每2天强制提前0.5 h,最终提前至22:00。第2、4和6晚为作息调整的第一天,测量时间相对于前一晚提前了0.5 h,浓度明显低于前一晚。经过了后续一天的动态光照后,第3、5晚的睡前褪黑素浓度明显升高,总体呈现上升趋势。第3周的夜间采用强光刺激,睡前的褪黑素浓度被显著抑制,始终处于低浓度水平,第22天睡前的褪黑素浓度相对于第15天显著降低( $p=0.001$ ),与相位后移的趋势一致。第4周的夜间均采用逐渐变暗的光保护模式,睡前的褪黑素浓度逐渐升高,第29天睡前的褪黑素浓度相对于第22天显著升高( $p=0$ ),与节律相位前移的趋势吻合。因此可知,有针对性的动态光照模式对睡前的褪黑素浓度的干预效果显著。

为评价各周的光照模式对褪黑素浓度的影响,以周为单位,将每周同一天的睡前褪黑素浓度进行对比(见图4b),第3周的睡前褪黑素浓度水平显著低于其他周( $p < 0.05$ ),第4周的睡前褪黑素浓度明

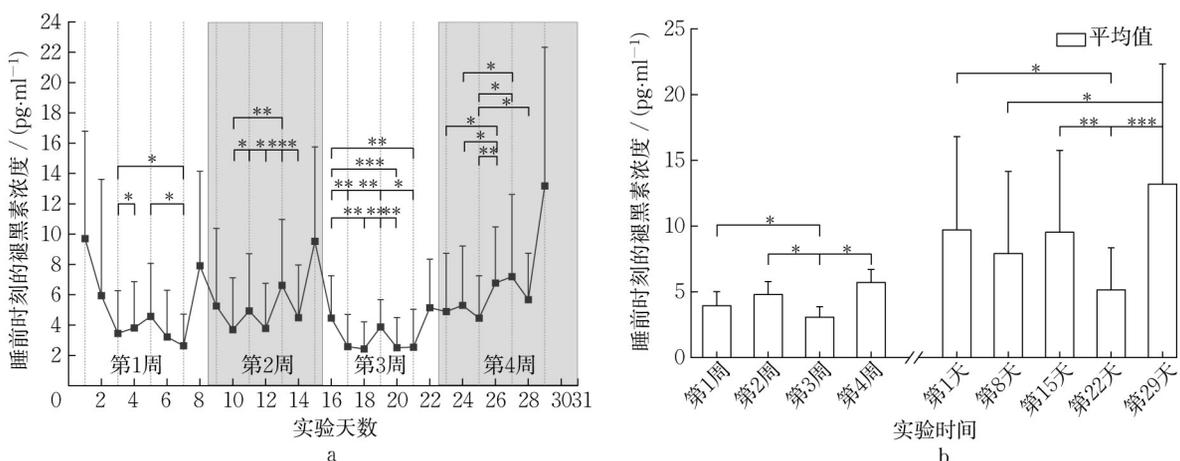


图4 睡前褪黑素浓度的逐天和逐周变化

Fig. 4 Changes in melatonin concentrations at bedtime each night and week

显提高,诱导节律相位偏移的动态照明模式起到了良好的干预效果。第2周的测量时间虽然早于第1周,但夜间采用了较低的光照刺激模式,睡前的褪黑素浓度仍高于第1周,但不显著。

(2)睡前皮质醇浓度。第1周的睡前皮质醇浓度总体呈现升高趋势(见图5a),第2周与之类似,表明被试在睡前的兴奋度逐渐提高。第3、4周的采样时间均为22:00,第3周的睡前皮质醇浓度呈现下降趋势,睡前的兴奋度降低,可能是夜间长期的强光照

射导致疲劳程度增加,警觉性下降。第4周的夜间采用了逐渐变暗的光保护模式,皮质醇浓度也是先降低后升高,但整体呈现升高趋势,睡前的兴奋度缓慢提高。图5b表明第3周的睡前皮质醇浓度最高,显著高于第1周( $p=0.003$ ),第22晚的睡前皮质醇浓度显著高于第1、8和29晚( $p<0.05$ ),强光刺激总体提高了夜间的警觉性和兴奋度水平。第2、4周在暗光刺激模式下,皮质醇浓度均低于第3周,其中第29晚显著低于第22晚( $p<0.05$ )。

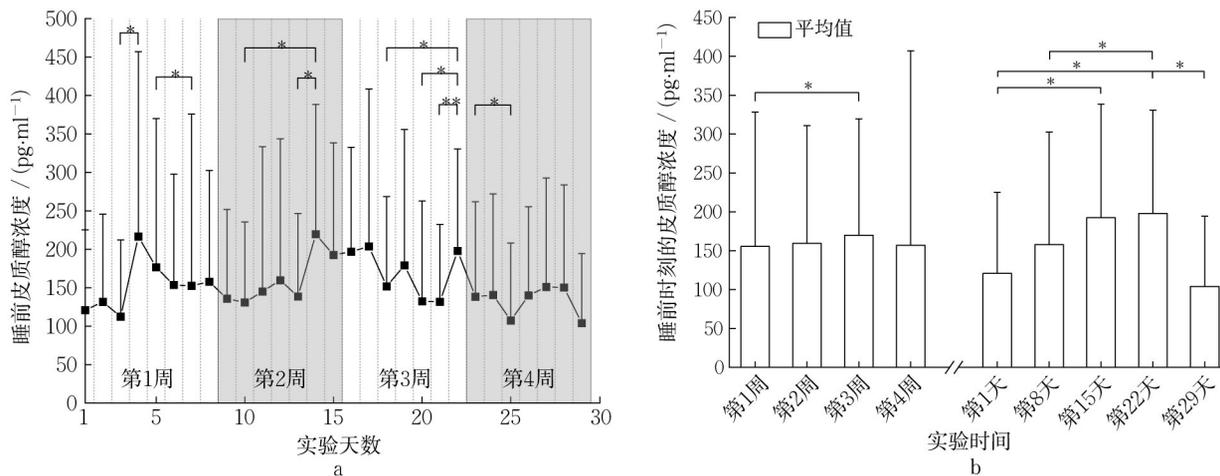


图5 睡前唾液皮质醇浓度的逐天和逐周变化

Fig. 5 Changes in cortisol concentrations at bedtime each night and week

(3)睡前核心体温。在第1周的固定光照模式下,第1、8天的夜间光照刺激最低,睡前的核心体温始终保持在较低水平。图6a表明第2晚的睡前24:00核心体温显著低于第3~6天( $p<0.05$ ),第5天显著高于第2天( $p=0.011$ ),睡前的核心体温总体呈现逐天增加的趋势,被试夜间的兴奋度逐渐提高,但第6、7天有所降低。

即使每周的光照模式相同,同一周内也存在逐天累积的变化趋势。第1周24:00的睡前体温存在先升高后降低趋势。第2周由于作息的调整,导致测量时间提前,夜间采用较低的光照刺激,睡前体温逐天降低,但在10、12和14天的夜间由于提前了0.5h测量,温度数据明显升高,随后的第2天夜间被试已适应了新的作息规律,体温数据降低到正常水平。第3周的夜间采用强光刺激,睡前22:00的核心温度呈现上升趋势,与节律后移的趋势吻合,但最后2天的温度有所降低,可能与人体对环境的适应性有关。第4周的夜间采用较低的光照刺激,睡前22:00的鼓膜温度呈现逐天降低的趋势,表明兴奋度逐渐降低,与节律相位前移的趋势一致。

图6b表明,在第3周夜间的强光刺激下,睡前的核心体温显著提高,而第2、4周夜间较低的节律激光照有效降低了睡前的核心体温。因此,夜间降低光照刺激的强度可有效地诱导睡前核心体温逐渐降低,而强光刺激的效果正好相反。

## 2.2 光照模式对睡眠质量的影响

(1)睡眠主观评价得分。每天的睡眠质量主观评价得分存在波动变化(图7a),第1周的得分相对稳定,略有下降的趋势,表明被试逐渐适应环境。第2周的得分随着作息时间的调整,作息强制前移的第1晚(10、12和14天)得分均明显升高,睡眠质量降低,随后第二晚的得分很快恢复正常水平。第3周的睡眠得分逐天增加,睡眠质量逐渐变差,睡前的强光刺激会导致睡眠质量的逐步恶化。第4周采用利于睡眠的暗光保护模式,睡眠主观评价得分逐天降低,表明睡眠质量越来越好,光照对睡眠质量的影响存在累积效应,可以实现逐步改善和主动干预的作用。

图7b表明第3周的睡眠主观评价得分最高,且显著高于第4周( $p=0.048$ ),表明第3周的睡眠质量

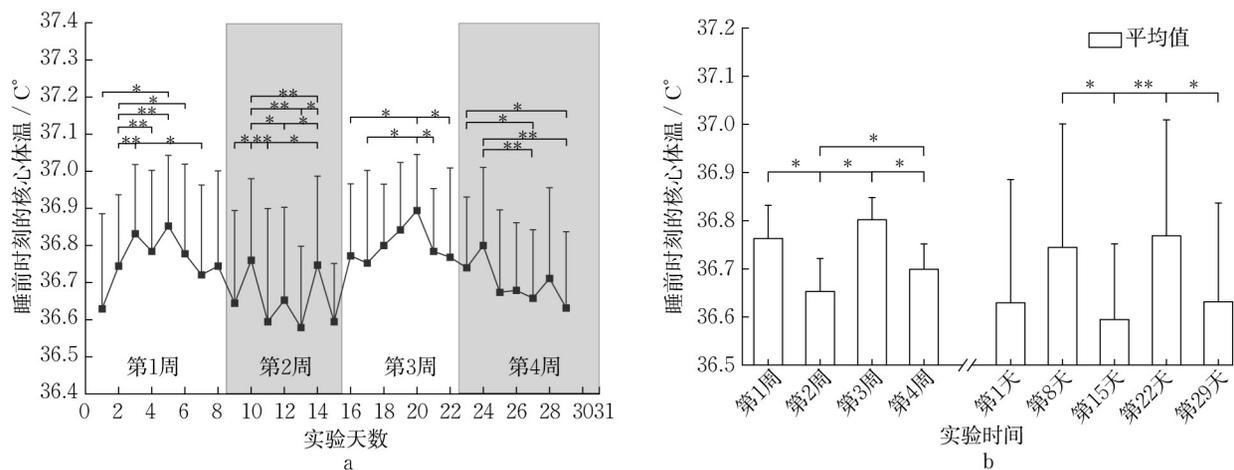


图6 睡前核心体温的逐天变化和逐周对比

Fig. 6 Changes in core body temperature at bedtime each night and week

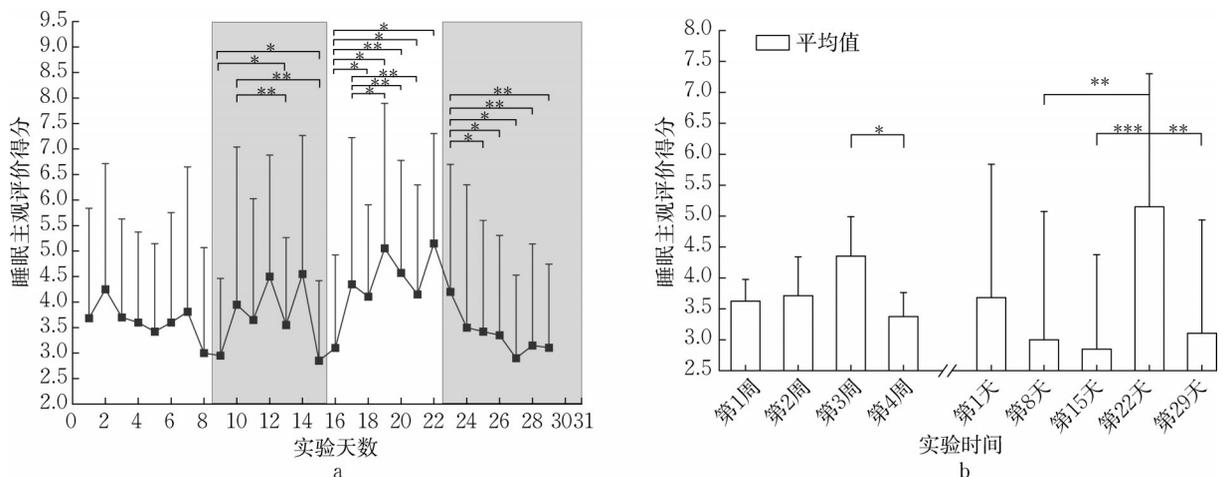


图7 睡眠主观评价得分的逐天变化和逐周对比

Fig. 7 Changes in subjective sleep scores at bedtime each night and week

最差,第4周的睡眠质量最好,甚至优于第1周。第2周的睡眠质量略差于第1周,但结果不显著。

密闭第1周后,第8晚的得分略有降低,睡眠质量好转。第15晚的睡眠得分最低,睡眠质量最佳,表明作息时间的调整并没有影响睡眠质量。第3周的夜间强光刺激后,第22晚的睡眠得分显著高于第15晚和第8晚,睡眠质量明显降低。经过第4周的暗光保护后,第29晚的睡眠得分明显降低,表明睡眠质量逐渐被修复,但没有完全恢复到第15晚光照干预前的水平。

(2)睡眠潜伏期。随着各周光照模式的调整,睡眠潜伏期逐天的变化趋势明显。图8a表明,在第1周的恒定光照模式下,每天的入睡时间基本稳定。第2周夜间采用诱导睡眠的暗光模式,在作息规律强制提前的第10、12和14天的入睡时间略有增加,随后一天恢复正常,被试已适应新的作息时间,但入

睡时间整体呈现缓慢上升的趋势,入睡逐渐困难。第3周采用夜间强光刺激模式来诱导节律相位后移,入睡时间迅速增加,且存在逐天累积的效果,第20天达到峰值 67.32 min,后续几天持续超过 60 min,部分被试需要 2 h 以上的时间才能入睡,光照对睡眠潜伏期的干预效果显著。第4周采用睡前暗光保护和清晨强光刺激的光照模式,诱导节律相位前移,入睡时间逐天缩短,逐渐恢复到干预前的水平。第3周和第4周的光照刺激时间和上床时间完全相同,但是不同的光照策略导致了睡眠潜伏期的明显变化,且在同一周内存在累积效应,表明光照史对睡眠潜伏期也存在重要影响。

为比较各周的光照模式对被试睡眠潜伏期的影响,将每周各天的入睡时间进行分析(图8b),结果表明第2周的入睡时间显著高于第1周( $p=0.030$ ),第3周的睡眠潜伏期相对于前2周显著增加( $p=0$ )。

第4周相对于第3周显著降低( $p=0.025$ ),仍高于第1、2周。因此,第3周诱导节律相位后移的光照模式导致了睡眠潜伏期的显著增加,第4周的睡前暗光

保护模式可有效缓解入睡困难,睡前的光照刺激对睡眠潜伏期的影响效果明显。

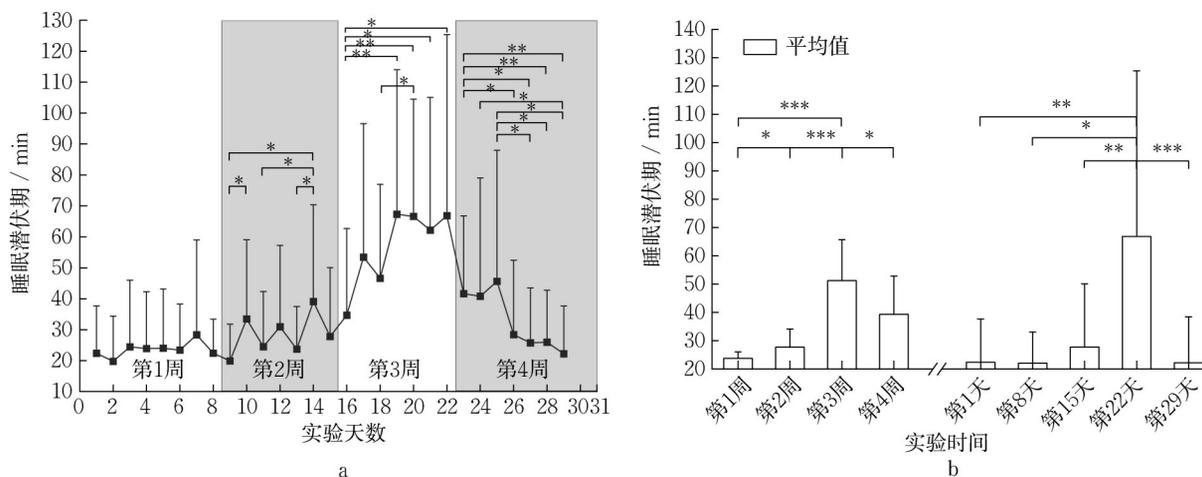


图8 睡眠潜伏期的逐天变化和逐周对比

Fig. 8 Changes in sleep latency each night and week

### 2.3 光照模式对认知能力的影响

(1)主观警觉性(KSS)。在第1周恒定的光照模式下,第1、8天的夜间采用最暗的DLMO光照模式,节律刺激最小,因此KSS得分始终保持在较高水平。第3~8天睡前24:00的KSS得分相对于第1天显著降低,其中第8天的夜间光环境与第1天相同,但睡前的KSS得分显著降低( $p=0.021$ ),警觉性明显降低(见图9b)。即使在恒定的光照模式下,睡前24:00的KSS得分呈现逐天降低的趋势,其中第5天显著低于第2天( $p=0.030$ )。随着密闭天数的增加,睡前的困倦度水平有所降低。

现逐天降低的趋势,与节律相位后移的趋势一致(见图9a)。第2周随着作息的强制前移,且夜间的光照刺激较低,睡前的困倦度始终最高。第3周在睡前强光刺激下,KSS得分逐天降低,与节律相位后移的趋势一致。由于第4周的光照策略不同,睡前和醒后KSS得分的逐天变化趋势与第3周正好相反。在逐天变化的基础上,按照周次进行统计分析,第2周和第4周的夜间为相同的暗光刺激模式,睡前的困倦度均较高,在第3周夜间的强光刺激下,睡前的困倦度显著降低(见图9b)。夜间的强光刺激会显著抑制睡前的困倦度,反之,较暗的光照刺激会导致睡前困倦程度的明显升高。

第1周在恒定光照模式下,睡前的KSS得分呈

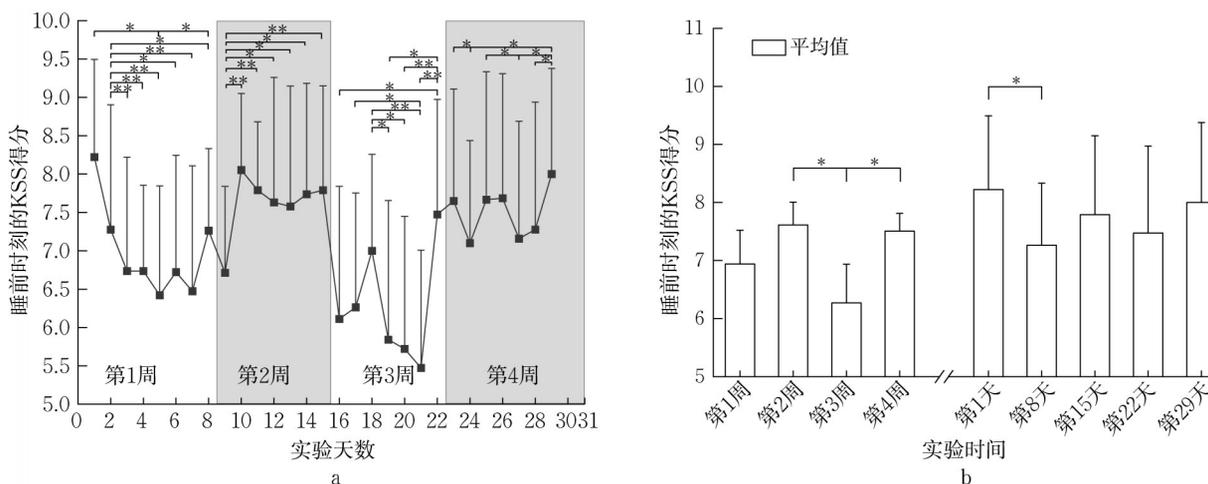


图9 睡前时刻的KSS得分逐天变化和逐周对比

Fig. 9 Changes in KSS at bedtime each night and week

(2)PVT测试。第2周和第4周夜间的光环境相同,均为较低的光照刺激模式,夜间反应时间最长,也很接近(见图10)。第3周的夜间,在强光刺激下的反应时间最短。光照对反应时间的影响不仅仅是瞬时作用,也存在累积效应。强光刺激下反应时间明显缩短,在较低的光照刺激下,反应时间有所延长。

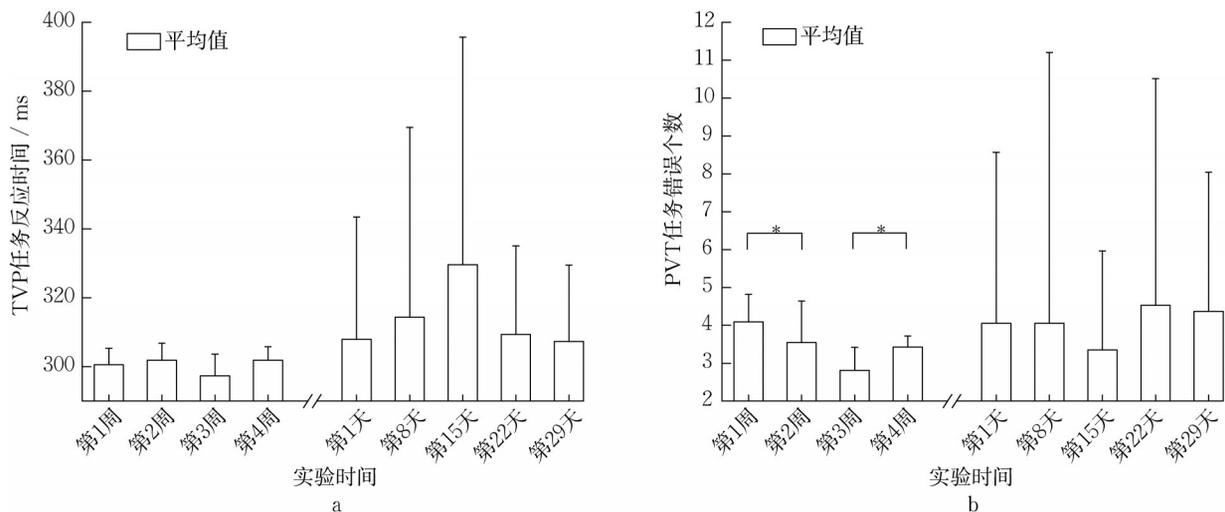


图 10 PVT 任务反应时间和错误个数的周变化

Fig. 10 Changes in reaction time and mistakes each week

### 3 讨论

光照强度、光谱功率分布、光照时刻、时间周期和光照历史等因素对人体的昼夜节律会产生综合作用<sup>[48-49]</sup>。本次密闭人因实验在屏蔽天然光的前提下,采用日光缺乏环境下的恒定光照模式和不同的动态光照模式,初步探索光照强度和光照时刻变化的动态光照模式对密闭空间人员睡前褪黑素、皮质醇浓度、核心体温和主观警觉性的长期影响。

结果表明,在第1周的固定光照模式下,睡前的褪黑素浓度和困倦程度(KSS得分)逐天降低,核心体温逐渐增加,表明兴奋度水平增加。睡眠得分呈现先降低后升高的趋势,入睡潜伏期逐天增加,睡眠效率逐渐降低,表明睡眠质量随着密闭天数的增加逐渐恶化,需要及时主动干预。第2周对作息时间进行强制调整,在作息前移的当晚,由于测量时间提前了0.5 h,睡前的褪黑素浓度有所降低,皮质醇浓度有所增加,睡前的核心体温明显提高,随后第2晚的各项指标基本恢复到了正常水平,人体已快速适应了新的作息时间。

第2周的夜间错误个数相对于第1周显著降低,表明较低的光照刺激并没有导致错误率的升高。第4周的光照模式与第2周相同,错误率也非常接近。在第3周夜间的强光刺激下,错误个数进一步降低,整体错误率最低。表明夜间的强光刺激有利于提高作业期间的警觉性,降低错误率。

第3周的动态照明模式在夜间逐渐增强光照的节律刺激强度,以诱导节律相位的后移,导致睡前的核心体温和KSS得分显著提高,睡前的褪黑素浓度始终最低;睡前的皮质醇浓度最高,但逐天下降,可能是夜间强光的长期照射导致疲劳水平增加,警觉性下降。睡眠质量逐渐变差,入睡潜伏期逐天升高,峰值达到67.32 min。光照模式的变化对睡眠质量的影响效果明显,且存在逐天累积的效应。在第3周夜间的强光刺激下,PVT任务的反应时间最短,且总体错误率最低。

第4周的动态照明模式与第3周相反,在晨间采用高强度的光照刺激,下午为正常光照模式,夜间采用低色温和逐渐降低的眼部照度,尽量减少节律刺激的强度,避免对昼夜节律的不利影响。夜间较低的光照刺激强度可有效地诱导睡前核心体温逐渐降低,而睡前的困倦度KSS得分明显升高。在睡眠质量方面,睡眠得分显著降低,睡眠潜伏期逐天缩短,睡眠效率逐渐增加,睡眠质量明显改善,基本恢复到干预前的状态。夜间在暗光环境下的反应时间较长,错误率有所升高。

在实验设计方面,采用重复测量的实验设计,每

周使用一种光照模式进行干预,每周的基线就是这一周的开始,观察本周的光照模式连续刺激1周后的昼夜节律变化情况。但是前期光照的累积效应可能会影响到下一周的光照效果,实验期间的清洗期光照条件难以设置。即使增加清洗期,也会存在密闭时间的累计效应,导致实验周期的大幅度延长。因此,后续研究可采用组间比较的方法,同时对更大样本量的人群分别采用不同的光照策略同时进行干预,减少光照历史的影响。

为减少个体差异的影响,被试在招募过程中尽量选择了年龄、睡眠类型相似、职业和性别相同的人员,但由于个体差异,部分被试的褪黑素浓度和睡眠潜伏期的变化幅度差异较大,因此采用组内比较的方法,在每周的光照干预后,以自身为对照进行重复测量统计分析,以减少个体差异的影响,后续研究还需根据人体对光照的敏感性进行精细化的研究。此外,本研究的被试都是青年男性,还需要考虑不同年龄段和性别人员之间的差异,对更多的被试样本进行更长周期的效应验证。核心体温主要是通过鼓膜温度进行近似地测量,且人为操作,结果存在一定的误差,还需要改进测量设备,如核心体温自动监测胶囊,实现核心体温的自动监测。为减少对睡眠的干预,目前仅采用了便携式的手环对睡眠质量的进行监测,还需要多导睡眠仪(Polysomnography, PSG)等专业设备进行科学深入的评价。

## 4 结论

光照对激素浓度、核心体温和主观警觉性的影响存在累积效应。随着干预天数的增加,干预的效果更明显,也表明了光照历史的影响。在恒定的光照模式下,睡前的褪黑素浓度和主观警觉性呈现逐天下降的趋势,皮质醇浓度和核心体温的变化趋势正好相反,与节律相位后移的趋势一致。动态光照模式能够有效诱导节律相位的偏移,可根据个人的“社会时差”调节需求,定制适宜的动态光照模式。此外,对于不同时段的光照参数组合和动态变化模式还可以进一步优化。

除了密闭空间,在地下商场、地铁交通、大进深办公空间、工业建筑等缺乏天然光的空间,利用光照干预人体节律,使其相位适应各自的轮班工作时间,减少昼夜节律紊乱对身心健康带来的危害,对保障人员的作业能力具有重要的现实意义。

## 作者贡献声明:

汪统岳:实验设计与操作、数据统计和分析、论文撰写。

邵戎镛:实验设计与修改、论文构思。

王燕尼:实验操作与数据分析。

李娟洁:数据分析、论文构思及撰写。

代书剑:实验操作、图表绘制。

于 闯:数据分析与统计、论文修改。

郝洛西:课题项目申请、提出研究主题与思路。

## 参考文献:

- [1] HÄFKER N S, TESSMAR-RAIBLE K. Rhythms of behavior: are the times changin' ? [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2020, 60: 55.
- [2] BERSON D.M , DUNN F.A, TAKAO M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock [J]. *Science*, 2002, 295 (5557): 1070.
- [3] VETTER C, PATTISON P M, HOUSER K, *et al.* A review of human physiological responses to light: Implications for the development of integrative lighting solutions [J]. *Leukos*, 2022, 18(3): 387.
- [4] CIE. CIE 158: 2009 (including Erratum 1) Ocular lighting effects on ouman physiology and behaviour [EB/OL]. [2022-05-30]. <https://cie.co.at/publications/ocular-lighting-effects-human-physiology-and-behaviour>.
- [5] FERNANDEZ F X. Current insights into optimal lighting for promoting sleep and circadian health: brighter days and the importance of sunlight in the built environment [J]. *Nature and Science of Sleep*, 2022, 14: 25.
- [6] PALINKAS L A, SUEDFELD P. Psychosocial issues in isolated and confined extreme environments [J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2021, 126: 413.
- [7] ARNE B, JD B, KMB C, *et al.* "20 000 leagues under the sea": Sleep, cognitive performance, and self-reported recovery status during a 67-day military submarine mission [J]. *Applied Ergonomics*, 2021, 91: 103295.
- [8] SCHLANGEN L, PRICE L. The lighting environment, its metrology, and non-visual responses [J]. *Frontiers in Neurology*, 2021, 12: 624861.
- [9] SMOLENSKY M H, SACKETT-LUNDEEN L L, PORTALUPPI F. Nocturnal light pollution and underexposure to daytime sunlight: Complementary mechanisms of circadian disruption and related diseases [J]. *Chronobiology international*, 2015, 32(8): 1029.
- [10] MILLS J N. Circadian rhythms during and after three months in solitude underground [J]. *The Journal of Physiology*, 1964, 174 (2): 217.
- [11] BASNER M, DINGES DF, MOLLICONE DJ, *et al.* Psychological and behavioral changes during confinement in a 520-day simulated interplanetary mission to mars [J]. *Plos*

- One, 2014,9(3):e93298.
- [12] PAGEL J I , A Choukèr . Effects of isolation and confinement on humans - Implications for manned space explorations [J]. Journal of Applied Physiology, 2016, 120 (12) : jap.00928.2015.
- [13] MENG C, WANG W, HAO Z, *et al.* Investigation on the influence of isolated environment on human psychological and physiological health [J]. Science of The Total Environment, 2020,716: 136972.
- [14] LEGER D, BAYON V, ELBAZ M, *et al.* Underexposure to light at work and its association to insomnia and sleepiness: A cross-sectional study of 13 296 workers of one transportation company [J]. Journal of Psychosomatic Research, 2011, 70 (1): 29.
- [15] BOUBEKRI M, CHEUNG I N, REID K J, *et al.* Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study [J]. Journal of Clinical Sleep Medicine, 2014, 10(6): 603.
- [16] LOPRESTI M L, ANDERSON J A, SABOE K N, *et al.* The impact of insufficient sleep on combat mission performance [J]. Military Behavioral Health, 2016, 4(4): 356.
- [17] LUYSTER F S, STROLLO P J, ZEE P C, *et al.* Sleep: a health imperative [J]. Sleep, 2012, 35(6): 727.
- [18] KAWASAKI A, WISNIEWSKI S, HEALEY B. *et al.* Impact of long-term daylight deprivation on retinal light sensitivity, circadian rhythms and sleep during the Antarctic winter [J]. Scientific Reports, 2018(8): 16185.
- [19] XU C, LIU S, KONG Z, *et al.* Sleep architecture, periodic breathing and mood disturbance of expeditioners at Kunlun Station (4 087 m) in Antarctica [J]. Advances in Polar Science, 2020, 80(3):66.
- [20] CHEN N, WU Q, XIONG Y, *et al.* Circadian rhythm and sleep during prolonged Antarctic residence at Chinese Zhongshan station [J]. Wilderness & Environmental Medicine, 2016, 27(4): 458.
- [21] PALINKAS L A, HOUSEAL M. Stages of change in mood and behavior during a winter in Antarctica [J]. Environment and Behavior, 2000, 32(1): 128.
- [22] SANDAL G M, VAN DEVIJVER F J R, SMITH N. Psychological hibernation in antarctica [J]. Frontiers in Psychology, 2018, 9: 2235.
- [23] ALFANO C A, BOWER J L, CONNABOY C, *et al.* Mental health, physical symptoms and biomarkers of stress during prolonged exposure to Antarctica's extreme environment [J]. Acta Astronautica, 2021, 181: 405.
- [24] KUWABARA T, NARUIWA N, KAWABE T, *et al.* Human change and adaptation in Antarctica: Psychological research on Antarctic wintering-over at Syowa station [J]. International Journal of Circumpolar Health, 2021, 80(1): 1886704.
- [25] BECK F, LÉGER D, FRESSARD L, *et al.* Covid-19 health crisis and lockdown associated with high level of sleep complaints and hypnotic uptake at the population level [J]. Journal of Sleep Research, 2021, 30(1): e13119.
- [26] SHARMA M, AGGARWAL S, MADAAN P, *et al.* Impact of COVID-19 pandemic on sleep in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis [J]. Sleep medicine, 2021, 84: 259.
- [27] KORMAN M, TKACHEV V, REIS C, *et al.* Outdoor daylight exposure and longer sleep promote wellbeing under COVID - 19 mandated restrictions [J]. Journal of Sleep Research, 2022, 31(2): e13471.
- [28] THEBERATH M, BAUER D, CHEN W, *et al.* Effects of COVID-19 pandemic on mental health of children and adolescents: A systematic review of survey studies [J]. SAGE Open Medicine, 2022, 10: 20503121221086712.
- [29] BOIVIN D B, BOUDREAU P, KOSMADOPOULOS A. Disturbance of the circadian system in shift work and its health impact [J]. Journal of Biological Rhythms, 2022, 37(1): 3.
- [30] BLASK D E. Melatonin, sleep disturbance and cancer risk [J]. Sleep Medicine Reviews, 2009, 13(4): 257.
- [31] BLAXTON J M, BERGEMAN C S, WHITEHEAD B R, *et al.* Relationships among nightly sleep quality, daily stress, and daily affect [J]. The Journals of Gerontology: Series B, 2017, 72(3): 363.
- [32] WALKER M P, VAN DER HELM E. Overnight therapy? The role of sleep in emotional brain processing [J]. Psychological bulletin, 2009, 135(5): 731.
- [33] KECKLUND G, AXELSSON J. Health consequences of shift work and insufficient sleep [J]. British Medical Journal, 2016, 355.
- [34] PROPER K I, VAN DE LANGENBERG D, RODENBURG W, *et al.* The relationship between shift work and metabolic risk factors: a systematic review of longitudinal studies [J]. American journal of preventive medicine, 2016, 50(5): e147.
- [35] LIVINGSTON W S, RUSCH H L, NERSESIAN P V, *et al.* Improved sleep in military personnel is associated with changes in the expression of inflammatory genes and improvement in depression symptoms [J]. Frontiers in Psychiatry, 2015, 6: 59.
- [36] VYAS M V, GARG A X, IANSAVICHUS A V, *et al.* Shift work and vascular events: systematic review and meta-analysis [J]. British Medical Journal, 2012, 345.
- [37] DONG X, WU Y, CHEN X, *et al.* Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review [J]. Science of The Total Environment, 2021, 786: 147537.
- [38] YOUNG C R, JONES G E, FIGUEIRO M G, *et al.* At-sea trial of 24-h-based submarine watchstanding schedules with high and low correlated color temperature light sources [J]. Journal of biological rhythms, 2015, 30(2): 144.

- [39] NIE J, ZHOU T, CHEN Z, *et al.* Investigation on entraining and enhancing human circadian rhythm in closed environments using daylight-like LED mixed lighting [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 732:39334.
- [40] LOWDEN A, AKERSTEDT T. Assessment of a new dynamic light regimen in a nuclear power control room without windows on quickly rotating shiftworkers--effects on health, wakefulness, and circadian alignment: a pilot study [J]. *Chronobiology International*, 2012, 19(5):641.
- [41] PANDI-PERUMAL S R, SMITS M, SPENCE W, *et al.* Dim light melatonin onset (DLMO): a tool for the analysis of circadian phase in human sleep and chronobiological disorders [J]. *Progress in Neuropsychopharmacology & Biological Psychiatry*, 2007, 31(1): 1.
- [42] SILVA A, D SIMÓN, PANNUNZIO B, *et al.* Chronotype-dependent changes in sleep habits associated with dim light melatonin onset in the antarctic summer [J]. *Clocks & Sleep*, 2019, 1(3):352.
- [43] FIGUEIRO M G, BULLOUGH J D, BIERMAN A, *et al.* On light as an alerting stimulus at night [J]. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 2007, 67(2):171.
- [44] SATO K T, KANE N L, SOOS G, *et al.* Reexamination of tympanic membrane temperature as a core temperature [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1996, 80(4):1233.
- [45] KAIDA K, TAKAHASHI M, AKERSTEDT T, *et al.* Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables - ScienceDirect [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2006, 117(7):1574.
- [46] THOMANN J, BAUMANN C R, LANDOLT H P, *et al.* Psychomotor vigilance task demonstrates impaired vigilance in disorders with excessive daytime sleepiness [J]. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. 2014,10(9):1019.
- [47] BASNER M, MOLLICONE D, DINGES D F. Validity and sensitivity of a brief psychomotor vigilance test (PVT-B) to total and partial sleep deprivation [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69(11):949.
- [48] HUBALEK S, BRINK M, SCHIERZ C. Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood [J]. *Lighting Research & Technology*, 2010, 42(1):33.
- [49] XIAO H, CAI H, LI X. Non-visual effects of indoor light environment on humans: a review [J]. *Physiology & Behavior*, 2020, 228:113195.