

中文引用格式:李敬强,张雪萌,张焕晰,等. 睡眠剥夺下不同睡眠类型持续性注意及 HRV 节律研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(10):238-246.

英文引用格式:LI Jingqiang, ZHANG Xuemeng, ZHANG Huanxi, et al. Investigation on impact of sleep deprivation on sustained attention and HRV rhythm across different chronotypes [J]. China Safety Science Journal,2024,34(10):238-246.

睡眠剥夺下不同睡眠类型持续性注意 及 HRV 节律研究*

李敬强 教授, 张雪萌, 张焕晰, 王庆福
(中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号: X949 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.10.1242

基金项目: 国家自然科学基金资助(U1933122); 民航安全能力建设项目(ASSA2023/20)。

【摘要】 为明确睡眠类型差异对个体认知绩效的影响, 利用睡眠类型互补性原则差异化、科学化设计早晚班、夜班团队成员的搭配, 提升作业人员的安全效能。采用固定作息法对不同睡眠类型参与者进行 30 h 睡眠剥夺, 测量其心率变异性(HRV)和持续性注意(SUA)水平。同时采用卡罗林斯卡嗜睡量表(KSS)、早晨型-夜晚型问卷(MEQ)、匹兹堡睡眠质量指数问卷(PSQI), 测量睡眠剥夺下不同睡眠类型的参与者疲劳程度。结果表明: 在 30 h 睡眠剥夺中, 夜晚型 HRV 时域指标差异更为明显($RMSSD = 38.301 \pm 17.056, P < 0.001$), 其波动和幅度更剧烈, 周期性更显著。3 种睡眠类型 KSS 分值整体呈上升趋势, 中间型 KSS 分值与 HRV 频域指标交叉相关性最高($LF/HF = 0.769, P < 0.05$)。早晨型较高 SUA 水平保持在 11:00—17:00, 正确率线性回归系数绝对值在 $1.5 \times 10^{-4} \sim 1.7 \times 10^{-4}$, 中间型保持在 07:00—12:00, 夜晚型与前两者相比差异较大。

【关键词】 睡眠剥夺; 睡眠类型; 持续性注意(SUA); 心率变异性(HRV); 昼夜节律

Investigation on impact of sleep deprivation on sustained attention and HRV rhythm across different chronotypes

LI Jingqiang, ZHANG Xuemeng, ZHANG Huanxi, WANG Qingfu

(College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to elucidate the impact of varying sleep patterns on cognitive performance, this study leveraged the principle of complementarity among different chronotypes. This approach guided the strategic pairing of personnel for morning, evening, and night shifts, with the goal of enhancing operational safety and efficiency. The research involved a regimen of fixed sleep schedules, subjecting individuals with distinct sleep preferences to 30 hours of sleep deprivation. During this period, participants' HRV and levels of sustained attention were closely monitored. Moreover, the study utilized several established tools to evaluate fatigue in sleep-deprived individuals: the Karolinska Sleepiness Scale (KSS), the Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ), and the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI). Findings revealed that, throughout the sleep deprivation period, individuals with a preference for evening activities exhibited significantly more pronounced variations in HRV time-domain indicators ($RMSSD =$

38.301±17.056, $P < 0.001$). These variations were characterized by greater fluctuation intensity and amplitude, as well as more evident periodicity. KSS scores across all chronotypes show a general upward trend, with those of intermediate chronotypes displaying the highest correlation with HRV frequency-domain indicators (LF/HF=0.769, $P < 0.05$). Morning-oriented individuals demonstrated higher levels of sustained attention between 11:00 AM and 5:00 PM, with accuracy rate linear regression coefficients ranging from 1.5 to 1.7 ($\times 10^{-4}$). In contrast, individuals with intermediate sleep patterns peaked in attention from 7:00 AM to 12:00 PM, while evening-oriented participants exhibited significantly different patterns compared to the other two groups.

Keywords: chronotype; sleep deprivation; sustained attention (SUA); heart rate variability (HRV); circadian rhythm

0 引言

睡眠不足会影响人的健康和认知功能。人类自主运行的 24 h 内源性周期被称为昼夜节律^[1]。个体对睡眠-觉醒周期存在睡眠类型偏好^[2],分为早晨型、夜晚型和中间型。早晨型倾向早睡早起;夜晚型倾向晚睡晚起;中间型则介于两者之间^[3-4]。不同睡眠类型个体代谢周期和维持内环境稳态在时间上存在相位差^[5],其认知能力也表现出节律性特征^[6]。对具有全天候特点的生产和服务行业,根据睡眠类型差异进行科学轮班设计不仅可以提升工作绩效,也是保障岗位人员身心健康的重要手段。

持续性注意 (Sustained Attention, SUA) 是指长时间(几分钟到几小时)对环境作出有效反应的能力。目前,关于 SUA 的研究有很多,如 TAILLARD 等^[7-8]指出,清醒时间和昼夜节律对 SUA 有一定节律性影响;AIDA 等^[9]研究发现,24 h 睡眠剥夺会降低 SUA 并抑制认知能力,认为前额叶和顶叶皮层更容易受到睡眠剥夺的影响。任务时间稳定性 (Time on Task Stability, TTS) 会随着清醒时间和睡眠剥夺而降低^[10-11],没有昼夜节律变化^[12-13]。但目前大部分研究尚不能确定是否从任务开始就发生了 TTS 的变化。此外,睡眠剥夺下不同睡眠类型个体心率变异性 (Heart Rate Variability, HRV) 存在差异。SAMMITO 等^[14]指出,HRV 在夜间增高,在白天降低。夜晚型个体任务绩效和 HRV 变化低于早晨型^[15]。同时,HRV 时域分析指标 (误差方均根 (Root Mean Square of Successive Differences between normal heartbeats, RMSSD)) 反映自主神经系统 (Autonomic Nervous System, ANS) 中副交感神经系统 (Parasympathetic Nervous System, PNS) 活跃程度,数值越低说明 PNS 活性越低^[16-17]。频域分析指标—低频/高频成分 (Low Frequency/High

Frequency, LF/HF) 比值是反映 ANS—PNS 张力平衡变化和相对交感活性^[18-19]。LF/HF 值较低时,副交感神经的活动占主导^[20];其值较高时则交感神经的活动占主导。GLOS 等^[21]研究发现,在长达 40 h 睡眠剥夺中,夜间 LF/HF 比白天有所增加,LF/HF 随轮班工作时间的延长呈下降趋势^[22]。当前针对 SUA 与 HRV 的研究仍存在以下局限性:首先,SUA 是否具有昼夜节律特征尚不明确;其次,HRV 是否由于睡眠类型差异在诸多研究中没有达成一致。此外,关于非线性分析指标近似熵 (Approximation Entropy, ApEn) 指标昼夜节律研究较少。

鉴于此,笔者拟进一步探讨不同睡眠类型个体在睡眠剥夺情况下 SUA 的节律差异及与 HRV 的关系,为不同睡眠类型人群科学化、差异性倒班、轮班设计提供参考,以减少与睡眠类型相关的职业健康问题和不安全事件。

1 睡眠剥夺试验

1.1 睡眠剥夺试验平台

睡眠剥夺试验在中国民航大学航空心理测评实验室进行,试验期间保持恒定的环境条件,室内温度 (24 ± 1) °C,室内水平照度 70~100 lx。试验于 2021 年 4 月 30 日—5 月 30 日开展。

1.2 睡眠剥夺试验研究对象

被试共 55 名,其中,38 名男性,17 名女性,平均年龄为 (20.82 ± 1.71) 岁,平均身高为 (171.29 ± 6.79) cm,平均体质量为 (66.26 ± 12.76) kg,健康状况良好,无睡眠障碍,身体质量指数 (Body Mass Index, BMI) 范围为 16.22~33.20,平均 BMI = 22.40,标准差 SD = 3.38。被试每组 8 人(1 名被试未正确佩戴试验仪器被剔除),均着轻薄衣物(T 恤衫、棉麻衬衫及薄款卫衣,衣物热阻 0.2~

0.8clo)。被试在试验前 24 h 内禁烟草、咖啡、酒精、药物或高热量的食物。排除月经在研究日期后 3 天内到期或在研究日期前超过 3 天的女性参与者。

1.3 睡眠剥夺试验调查工具

被试需填写:①基本信息表。姓名、性别、年龄、身高、体重以及试验当日早醒时间。②睡眠日志。记录试验前 2 个星期内起床时间、卧床时间、午休时间和其他信息。③试验信息记录表。④3 个量表。卡罗林斯卡嗜睡量表 (Karolinska Sleepiness Scale, KSS)^[23-24] 将警觉度分为 9 个等级,其中,奇数等级表示:1=极度警觉;3=警觉;5=既不警觉也不困;7=困乏,但是没有想保持清醒的感觉;9=非常困,极力想保持清醒,和困乏做斗争。偶数等级(2,4,6,8)代表介于前后 2 个等级之间的状态;早晨型-夜晚型问卷 (Morningness-Eveningness Questionnaire, MEQ)^[25] 包含 19 个条目,每个问题答案计 0~6 分,总分范围从 16~86 分。根据总分将被试分为 3 类:早晨型 59~86 分,中间型 42~58 分,夜晚型 16~41 分;匹兹堡睡眠质量指数问卷 (Pittsburgh Sleep Quality Index, PSQI)^[26] 由 19 个自评和 5 个他评条目组成,其中,参与计分的 18 个自评条目可组成 7 个因子(睡眠质量、入睡时间、睡眠时间、睡眠效率、睡眠障碍、催眠药物应用和日间功能),每个条目按 0、1、2、3 分等级计分,累计 7 个因子得分为 PSQI 总分,范围为 0~21 分,得分越高表示睡眠质量越差。⑤知情同意书。

试验仪器:①笔记本电脑;②腕带手表,中央处理器速度:120 MHz,内存:0.64 MB,存储空间:32 MB;③心率传感器,中央处理器速度为 120 MHz,心率测量范围为 30~240 次/min。

1.4 睡眠剥夺试验任务

测试由心理试验软件 E-Prime 3.0 在笔记本电脑上呈现,屏幕每次呈现 3 张图片作为一次刺激,如图 1 所示。

要求被试根据任务规则进行操作,首先判断符号 A1 与 B1 是否一致,若不一致,按键盘 J 键,若一致,则按 F 键;按 F 键之后判断下一次呈现的刺激中 A1 与 B2 是否一致,若一致,按空格键,不一致,按 J 键。每组测试共呈现 128 次不重复刺激,刺激以 2~6 s 随机显现,刺激间隔期间在屏幕正中呈现一个字号为 30 的红色+注视点,被试按键后刺激消失。

1.5 睡眠剥夺试验过程

利用 MEQ 将被试睡眠类型进行分类,采用固定

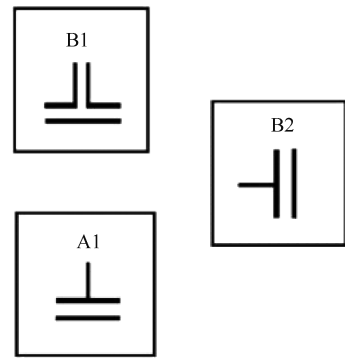


图 1 屏幕呈现的试验刺激

Fig. 1 Experimental stimulation of screen presentation

作息法范式 (Constant Routine Protocol, CRP) 要求夜晚型、中间型和早晨型被试分别于早上 8:00、7:00、6:00 醒来,试验开始时间分别为 10:00、9:00、8:00,分别于第 2 天下午 14:00、13:00、12:00 结束。为最大程度避免体力活动,试验期间被试除去卫生间外均以固定姿势坐在椅子上,持续清醒时间为 30 h。被试到达实验室开始佩戴腕带手表及心率传感器设备。心率传感器贴身佩戴在胸际线下侧紧靠胸肌线处,该设备每 1 min 采集一次心率数据,并通过腕带手表导出。每 1 h 采集一次主观嗜睡程度,被试填写 KSS 和注意绩效测试任务结果,测试次数共 29 次。试验期间被试每小时进食一份含有自身一天能量消耗的 1/24 食物量。

2 睡眠剥夺试验数据处理

采用肖维勒准则剔除被试在注意绩效测试任务中的异常值^[27]。KSS 分值通过洛伦兹方程曲线拟合,得到主观嗜睡的洛伦兹表达式。

HRV 数据通过 Kubios HRV Premium 预处理,对 HRV 信号进行 RMSSD、LF/HF 和 ApEn 分析。使用萨维茨基-戈雷 (Savitzky-Golay, S-G) 平滑滤波处理 HRV、主观量表和注意绩效^[28]。

针对 3 种睡眠类型个体,采用弗里德曼非参数检验评估其 HRV、KSS 分值及 SUA-TTS 的组内差异,采用克鲁斯卡尔-沃利斯非参数检验评估其 KSS 分值的组间差异。通过线性回归分析,计算 3 种睡眠类型 KSS 分值、SUA-TTS 反应时、SUA-TTS 正确率,得到线性回归系数 Beta。运用交叉相关分析 (Cross-Correlation Analysis, CCA),计算 KSS 分值和 HRV 与 SUA-TTS 之间的交叉相关系性和相位差 ($\Delta\varphi/h$) 来确定其相位变化的趋势。

3 睡眠剥夺试验数据结果分析

3.1 睡眠类型

由试验可知:55 名被试中,夜晚型 12 人,平均年龄为 (20.33 ± 1.55) 岁,平均身高为 (174.58 ± 7.58) cm,平均体质量为 (70.76 ± 15.21) kg;中间型 24 人,平均年龄为 (21.54 ± 1.26) 岁,平均身高为 (171.29 ± 5.53) cm,平均体质量为 (66.00 ± 11.54) kg;早晨型 19 人,平均年龄为 (20.21 ± 1.94) 岁,平均身高为 (169.21 ± 6.88) cm,平均体质量为 $(63.75 \pm$

$11.73)$ kg。MEQ 平均得分 51.71, $SD = 10.08$,克朗巴哈系数 $\alpha = 0.835$,凯撒-迈耶-奥利金 (Kaiser-Meyer-Olkin, KMO) 为 0.814, P 小于 0.05。

3.2 PSQI 问卷

发放 PSQI 问卷 55 份,有效回收问卷 54 份,平均得分为 4.56 ($SD = 2.66$),睡眠质量较高, $\alpha = 0.770$, $KMO = 0.698$, $P < 0.05$ 。

3.3 HRV

3 种睡眠类型被试 HRV 在长时间觉醒过程中均表现出明显昼夜节律特征,如图 2 所示。

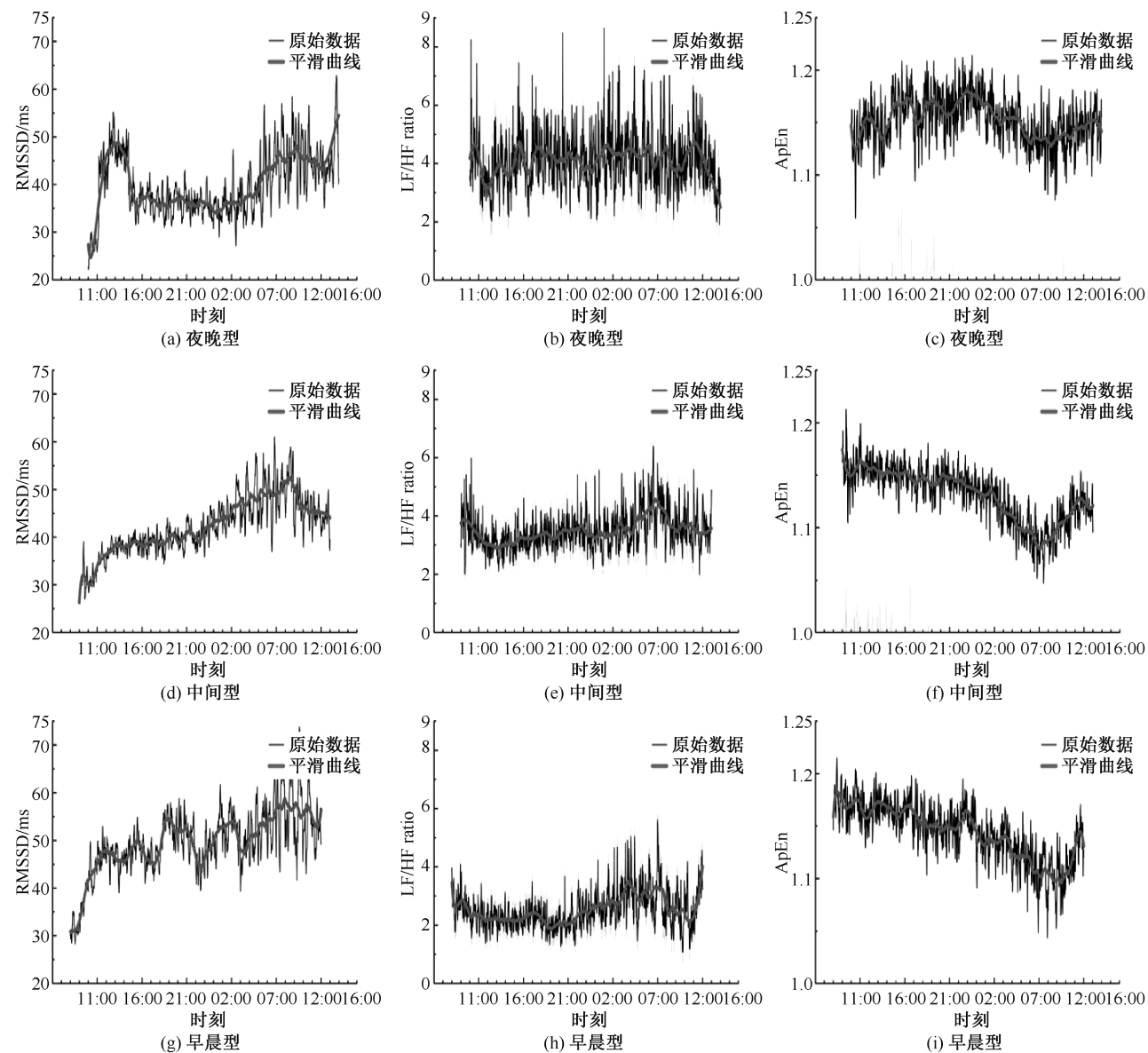


图 2 3 种睡眠类型 HRV 曲线水平

Fig. 2 Curve level of HRV for three chronotypes

由图 2 可知:3 种睡眠类型 RMSSD、LF / HF、ApEn 指标因睡眠剥夺的影响在第 2 天清晨 06:00 — 09:00 皆出现较为明显的波峰或波谷,12:00 后逐渐呈恢复趋势。

夜晚型被试上述 3 种指标差异较大,波动幅度剧烈,周期性明显。3 种睡眠类型 HRV 统计分析结果见表 1。RMSSD 平均值最低 ($RMSSD = 38.301 \pm 17.056, P < 0.001$), 表明其 PNS 活性降低,对睡眠剥夺可能更加敏感。早晨型的 RMSSD 在试验过程中,平均值最高 ($RMSSD = 50.472 \pm 19.957, P < 0.001$), PNS 活性较高,这可能由于睡眠剥夺对早晨型影响时间较短,因此,其能在较短时间内恢复至原有水平,整体下降差异较小。在早晨型 LF/HF 指标中,出现同样现象,LF/HF 数值越小,表明 PNS 兴奋性占据主导地位越明显,相反,数值越大,表明交感神经系统 (Sympathetic Nervous System, SNS) 兴奋

占主导特征越明显^[29]。夜晚型 LF/HF 数值最大,其 PNS 兴奋性低于 SNS 兴奋性,早晨型则呈现相反趋势,中间型处于二者之间。这与“早晨型和夜晚型运动后 PNS 昼夜节律活化不同,夜晚型在早晨 PNS 活化迟缓”的结论相似^[30]。

在 ApEn 指标中,夜晚型波动较为明显,但其 ApEn 平均数最低 ($ApEn = 1.425 \pm 0.104, P < 0.001$),从图 2 可以看出,夜晚型更具有周期性的特征,而中间型和早晨型虽然整体平缓,但数值稍高,表明其更具随机状态,周期性与夜晚型相比特征相对较弱。

表 1 3 种睡眠类型 HRV 统计分析结果

Table 1 Statistical analysis of HRV for three chronotypes

| HRV | 夜晚型 ($\bar{x} \pm s$) | 中间型 ($\bar{x} \pm s$) | 早晨型 ($\bar{x} \pm s$) | 克鲁斯卡尔-沃利斯检验 | 渐进显著性 | |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------|-------|
| RMSSD /ms | 38.301±17.056*** | 43.018±24.669*** | 50.472±19.957*** | 3.046 | 0.218 | |
| LF/HF | FFT 范围 | 3.286±1.913*** | 2.939±1.527*** | 1.943±0.901*** | 5.540 | 0.063 |
| | AR 范围 | 12.388±10.465*** | 9.763±17.250*** | 3.788±2.599*** | 6.900 | 0.032 |
| ApEn | 1.425±0.104*** | 1.441±0.092*** | 1.486±0.074*** | 3.516 | 0.172 | |

注:***表示 $P < 0.001$ 。

3.4 主观嗜睡自评

KSS 作为主观嗜睡自评应用较为广泛的量表 (Cronbach $\alpha = 0.943, KMO = 0.851, P < 0.05$), 3 种睡眠类型个体的 KSS 分值均出现较为明显的波峰和周期性特征。

弗里德曼检验结果表明:3 种睡眠类型 KSS 分值组内均有显著性差异。3 种睡眠类型 KSS 分值曲线如图 3 所示。经洛伦兹方程曲线拟合后的 KSS 分值首先呈现随清醒时间延长而上升的趋势。早晨型在第 2 天 05:00 左右达到峰值,中间型和夜晚型则在 07:00 左右达到峰值。随后,3 种睡眠类型被试主观嗜睡程度迅速下降。该趋势变化可能由于个体核心体温在生理节律低谷期间^[31],个体嗜睡感最强,之后个体嗜睡感减弱。由图 3 可知:3 种睡眠类型嗜睡感最强时刻与其核心体温最低区间存在相位差。3 种睡眠类型 KSS 分值统计分析结果见表 2,夜晚型回归系数低于其他 2 种类型,嗜睡感出现时刻相对较晚。

因此,参考不同睡眠类型人群疲劳困倦周期及其波动特性,在制定职业事故预防方案中进一步细化安全生产过程管理措施,以最大化降低不安全事件发生的风险。例如:在持续作业值勤排班中,弹性设计早晨型团队成员值勤开始时间,或在加强早晚

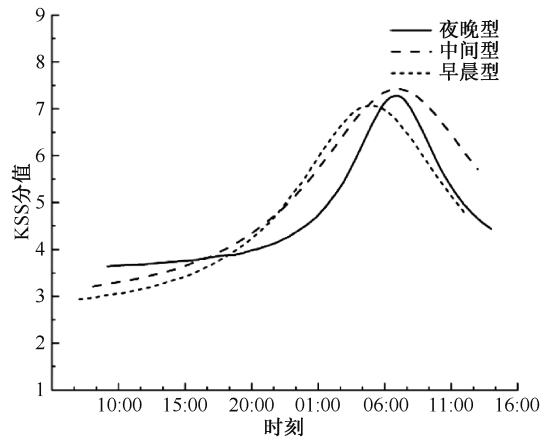


图 3 3 种睡眠类型 KSS 分值曲线

Fig. 3 Curves of KSS score for three chronotypes

表 2 3 种睡眠类型 KSS 分值统计分析结果

Table 2 Statistical analysis of KSS score for three chronotypes

| 睡眠类型 | 主观嗜睡自评 | $\bar{x} \pm s$ | 弗里德曼检验 | 线性回归系数 |
|------|--------|-----------------|----------|--------|
| 夜晚型 | KSS | 4.77±4.25 | 126.834* | 0.727* |
| 中间型 | KSS | 5.13±4.83 | 338.972* | 0.887* |
| 早晨型 | KSS | 4.77±4.23 | 286.265* | 0.820* |

注:*表示 $P < 0.05$ 。

班团队成员搭配中体现睡眠类型的互补性原则,根据睡眠类型差异而导致的警觉度绩效相位差科学设

计作业人员的工作顺序及工作时长,以达到最大化发挥团队成员的安全操作效能。

3.5 SUA

SUA-TTS 以作业过程中反应时和正确率的线性回归系数来衡量,使用萨维茨基-戈雷平滑滤波对曲

线进行降噪处理,3 种睡眠类型反应时、正确率线性回归系数随清醒时间延长而变化的曲线如图 4 所示。

线性回归系数越趋近于 0,表明其绩效越平稳,反之则越呈现波动特征。3 种睡眠类型 SUA-TTS 具有明显昼夜节律特征。

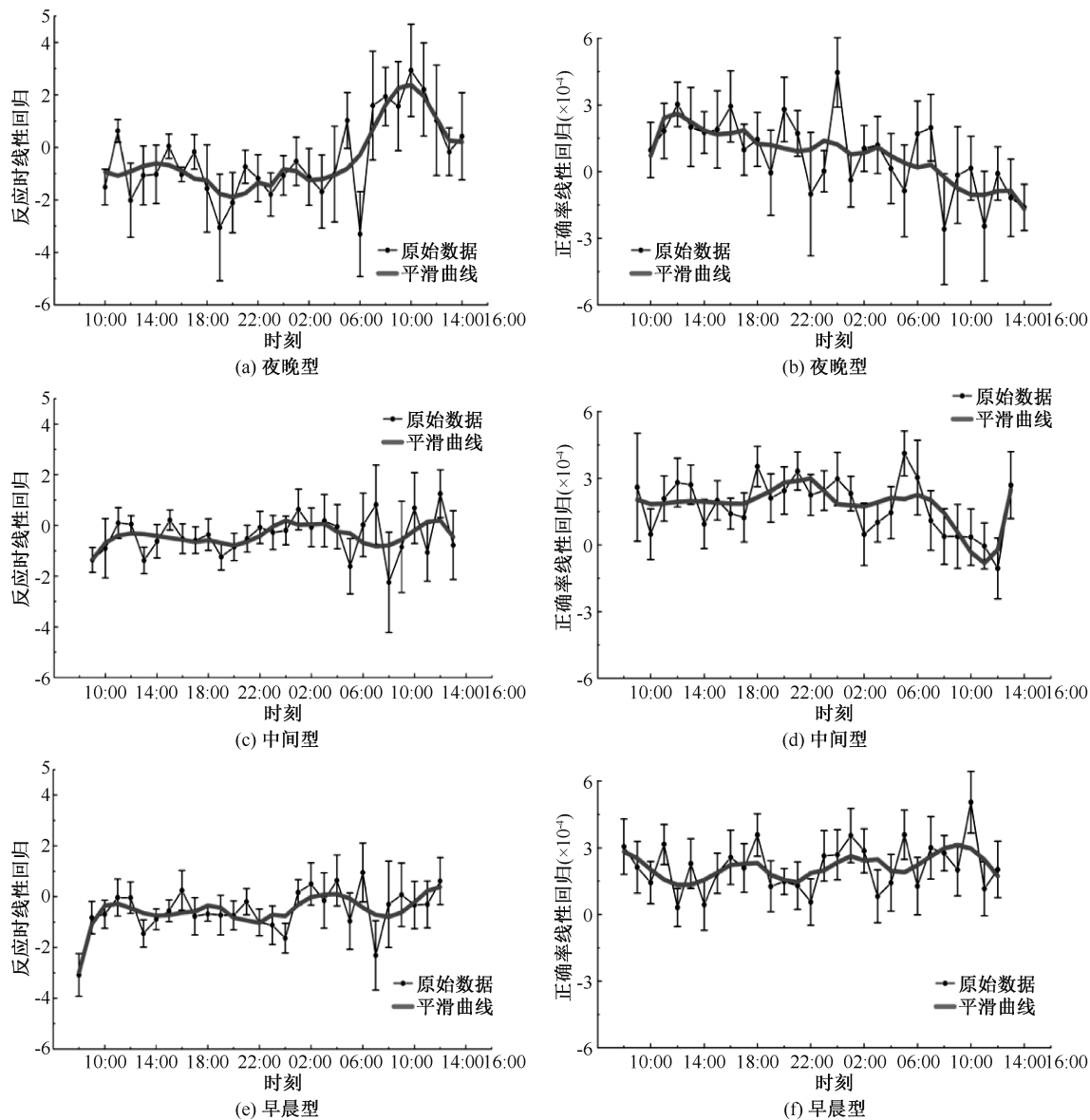


图 4 3 种睡眠类型反应时和正确率线性回归曲线水平

Fig. 4 Curve level of linear regression of reaction time and correct rate for three chronotypes

为更直观地区分 3 种睡眠类型 SUA-TTS 的昼夜节律特征,处理 3 种睡眠类型反应时和正确率的线性回归的绝对值,以便明确 SUA-TTS 变化趋势。3 种睡眠类型反应时线性回归绝对值平滑曲线水平如图 5 所示。在反应时线性回归绝对值曲线变化中,早晨型在试验第 1 天 12:00 前呈快速下降趋势,证明其工作绩效有明显提升,正确率线性回归绝对值在第 1 天 11:00—17:00 最低,为 1.5 ~ 1.7 (×

10⁻⁴),表明此阶段早晨型 SUA 水平较高。中间型正确率线性回归绝对值最低出现在第 2 天 07:00—12:00,反应时线性回归绝对值出现多峰多谷,无明显规律可循,在管理方面需要加大监管力度,建议灵活性监督中间型成员并提醒,以保证工作绩效始终处于良好水平。夜晚型反应时线性回归绝对值始终处于较高水平,其稳定性最差,但是从第 2 天 10:00 左右曲线开始下降,稳定性逐步提升,14:00 左右达

到最优状态。这种快速下降的趋势表明:绩效水平快速提升,在管理方面建议开展团队心理健康教育、增强团队成员心理控制能力,提升工作绩效水平。

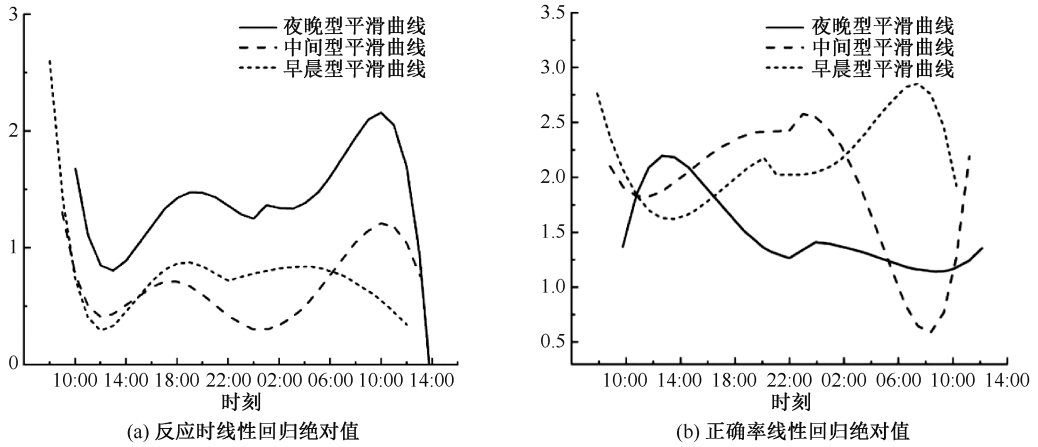


图5 3种睡眠类型反应时线性回归绝对值平滑曲线水平

Fig. 5 Smooth curve level of absolute value of linear regression of reaction time and correct rate for three chronotypes

3.6 CCA

3种睡眠类型 KSS 分值与 HRV 的 CCA 见表3。3种睡眠类型 KSS 分值与 HRV 的 RMSSD、LF/HF、ApEn 分别呈现较强相关性,并存在不同程度相位差 $\Delta\varphi$ 。在 ApEn 分析中,中间型 $\Delta\varphi$ 为0,表明具有较高

的同步性。3个指标中,中间型的频域交叉相关性最高(LF/HF=0.769, $P<0.05$),其次是早晨型(LF/HF=0.736, $P<0.05$),夜晚型最低。该差异的原因可能由于早晨型和夜晚型各自的作息习惯使得主观嗜睡程度发生偏差,导致与其 HRV 交叉相关性降低。

表3 3种睡眠类型 KSS 分值与 HRV 的 CCA

Table 3 CCA between KSS scores and HRV of three chronotypes

| 睡眠类型 | 主观嗜睡自评 | CCA | | | | | |
|------|--------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|
| | | 与 RMSSD | | 与 LF/HF | | 与 ApEn | |
| | | 交叉相关性 | $\Delta\varphi/h$ | 交叉相关性 | $\Delta\varphi/h$ | 交叉相关性 | $\Delta\varphi/h$ |
| 夜晚型 | KSS | 0.459* | 0 | 0.312 | 2 | -0.640* | 2 |
| 中间型 | KSS | 0.960* | 0 | 0.769* | 1 | -0.960* | 0 |
| 早晨型 | KSS | 0.669* | 0 | 0.736* | -1 | -0.894* | 1 |

注:*表示 $P<0.05$ 。表4同。

3种睡眠类型 SUA-TTS 绝对值与 HRV 和 KSS 分值的 CCA 见表4。由表4可知:夜晚型 SUA-TTS 与 KSS 有较强的交叉相关性,反应时与 KSS 呈较强正相关,存在2h相位延迟;正确率与 KSS 呈较强负相关,且存在1h相位延迟,说明夜晚型成员倾向于高估自身疲劳程度。而早晨型正确率与 HRV 和 KSS 都呈现较强的交叉相关性,其中,正确率与 RMSSD 及 KSS 存在1h相位延迟,与 LF/HF 存在

3h相位延迟,同时与 ApEn 存在较强的负相关。此外,中间型 SUA-TTS 与 HRV 和 KSS 都存在较强的交叉相关性,建议中间型成员根据自身疲劳程度及时做出调整以保证工作绩效稳定。上述结果说明中间型 SUA-TTS 与 HRV 和 KSS 存在“较高的同步性”,其相位延迟可用来预测 SUA-TTS 变化趋势,为衡量工作绩效提供借鉴。

表4 3种睡眠类型 SUA-TTS 绝对值与 HRV 和 KSS 分值的 CCA

Table 4 CCA between absolute value of SUA-TTS and HRV and KSS scores of three chronotypes

| 睡眠类型 | SUA-TTS (绝对值) | CCA | | | | | | | |
|------|---------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|
| | | 与 RMSSD | | 与 LF/HF | | 与 ApEn | | 与 KSS | |
| | | 交叉相关性 | $\Delta\varphi/h$ | 交叉相关性 | $\Delta\varphi/h$ | 交叉相关性 | $\Delta\varphi/h$ | 交叉相关性 | $\Delta\varphi/h$ |
| 夜晚型 | 反应时线性回归 | 0.424* | -2 | 0.450* | 0 | -0.413* | 0 | 0.847* | -2 |
| | 正确率线性回归 | -0.278 | 3 | -0.464* | 0 | 0.389 | 3 | -0.701* | -1 |

续表 4

| 睡眠类型 | SUA-TTS (绝对值) | 交叉相关分析 | | | | | | | |
|------|------------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|
| | | 与 RMSSD | | 与 LF/HF | | 与 ApEn | | 与 KSS | |
| | | 交叉相关性 | $\Delta\phi/h$ | 交叉相关性 | $\Delta\phi/h$ | 交叉相关性 | $\Delta\phi/h$ | 交叉相关性 | $\Delta\phi/h$ |
| 中间型 | 反应时线性回归 | 0.688* | -3 | 0.565* | -3 | -0.783* | -3 | 0.668* | -3 |
| | 正确率线性回归 | -0.727* | -3 | -0.758* | -3 | 0.875* | -3 | -0.782* | -3 |
| 早晨型 | 反应时线性回归 | 0.352 | 2 | 0.235 | -1 | -0.440* | 3 | 0.543* | 2 |
| | 正确率线性回归 | 0.778* | -1 | 0.741* | -3 | -0.915* | 0 | 0.892* | -1 |

4 结 论

1) 3 种睡眠类型 SUA-TTS 绩效在 30 h 睡眠剥夺中表现出明显昼夜节律特征。早晨型在 11:00—17:00 的绩效处于相对稳定水平,夜晚型绩效稳定期则处于从第 1 天 17:00 到第 2 天 07:00。3 种睡

眠类型 HRV 皆出现较明显的波峰波谷,夜晚型波动和幅度更剧烈,周期性更显著。

2) 文中样本年龄较为单一,未来研究可扩大不同年龄区间、性别的样本数量,同时研究褪黑激素和皮质醇等因素。

参 考 文 献

- [1] RICHARDSON C, OAR E, FARDOULY J, et al. The moderating role of sleep in the relationship between social isolation and internalising problems in early adolescence [J]. *Child Psychiatry and Human Development*, 2019, 50(6): 1 011-1 020.
- [2] MARIO M, VALERIA O, DANYELLA P, et al. Detecting chronotype differences associated to latitude: a comparison between Horne -- Östberg and Munich Chronotype questionnaires [J]. *Annals of Human Biology*, 2014, 41(2): 105-108.
- [3] CHRISTOPH R, JUDITH E. Gender differences in chronotype diminish with age: a meta-analysis based on morningness/chronotype questionnaires[J]. *Chronobiology International*, 2019, 36(7): 888-905.
- [4] 朱莹莹, 马晓晴, 唐卓仪, 等. 不同睡眠时型对心理行为活动的影响及其作用机制[J]. *心理技术与应用*, 2021, 9(10): 629-640.
- [5] ZHU Yingying, MA Xiaoqing, TANG Zhuoyi, et al. The influence of different sleep patterns on psychological behavior and its mechanism [J]. *Psychological Techniques and Applications*, 2021, 9(10): 629-640.
- [5] SUDHAKAR K, PANKAJ Y. Circadian clocks: an overview on its adaptive significance [J]. *Biological Rhythm Research*, 2020, 51(7): 1 109-1 132.
- [6] PABLO V, CANDELARIA R, GARCIA A. Circadian rhythms in cognitive performance: implications for neuropsychological assessment[J]. *Chrono Physiology and Therapy*, 2012, 2012: 81-92.
- [7] JACQUES T, CLAUDE G, STEPHANIE B, et al. Sleep in normal aging, homeostatic and circadian regulation and vulnerability to sleep deprivation[J]. *Brain Sciences*, 2021, 11(8): DOI:10.3390/BRAINS11081003.
- [8] QI Jing, LI Bozhi L, ZHANG Ying, et al. Altered insula-prefrontal functional connectivity correlates to decreased vigilant attention after total sleep deprivation[J]. *Sleep Medicine*, 2021, 84: 187-194.
- [9] AIDA G, DEL J A, JORGE B, et al. Sleep deprivation effects on basic cognitive processes: which components of attention, working memory, and executive functions are more susceptible to the lack of sleep[J]. *Sleep Science*, 2021, 14(2): 107-118.
- [10] 宋国萍, 皇甫恩, 苗丹民, 等. 睡眠剥夺及恢复睡眠 1 小时后大鼠脑中 c-Fos 蛋白的表达[J]. *中国行为医学科学*, 2002(6): 15-17.
- [10] SONG Guoping, HUANGFU En, MIAO Danmin, et al. Expression of c-Fos protein in rat brain stem after sleep deprivation and sleep recovery for 1 hour[J]. *Chinese Behavioral Medicine Science*, 2002(6): 15-17.
- [11] 周维逸, 周仁来. 基于心率变异性与机器学习相结合的警觉度水平监测[J]. *载人航天*, 2022, 28(6): 779-784.
- [11] ZHOU Weiyi, ZHOU Renlai. Alertness level monitoring based on heart rate variability combined with machine learning[J]. *Manned Spaceflight*, 2022, 28(6): 779-784.
- [12] GILLBERG M, ÅKERSTEDT T. Sleep loss and performance: no "safe" duration of a monotonous task[J]. *Physiology & Behavior*, 1998, 64(5): 599-604.
- [13] VALDEZ P, RAMIREZ P, GARCIA A, et al. Circadian rhythms in components of attention[J]. *Biological Rhythm Research*, 2005, 36(1/2): 57-65.
- [14] SAMMITO S, SAMMITO W, BOCKELMANN I. The circadian rhythm of heart rate variability[J]. *Biological Rhythm Research*, 2016, 47(5): 717-730.

- [15] TAKEYAMA H, ITANI T, TACHI N, et al. Psycho-physiological effects of naps during night shifts on morning types and evening types[J]. *Journal of Occupational Health*, 2002, 44(2): 89-98.
- [16] VITALE A J, BONATO M, TORRE L A, et al. Heart rate variability in sport performance: do time of day and chronotype play a role[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2019, 8(5): DOI:10.3390/jcm8050723.
- [17] 杨亚丽, 王治平, 孟昊. 心率变异性的研究进展[J]. *长治医学院学报*, 2021, 35(5): 393-396.
YANG Yali, WANG Zhiping, MENG Hao. Research progress of heart rate variability[J]. *Journal of Changzhi Medical College*, 2021, 35(5): 393-396.
- [18] KUMAR M, SINGH D, DEEPAK K K. Power spectrum analysis of heart rate variability during internally and externally operative attention[J]. *Smart Healthcare for Disease Diagnosis and Prevention*, 2020; DOI: 10.1016/B978-0-12-817913-0.00007-9.
- [19] UYSAL Z K, FERAH K, IBRAHIM B, et al. Evaluation of cardiac autonomic functions in myasthenia gravis[J]. *Neurological Research*, 2018, 40(5): 405-412.
- [20] 刘坤, 焦钰博, 张晓明, 等. 基于心电的铁路列车驾驶压力检测研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(6): 31-37.
LIU Kun, JIAO Yubo, ZHANG Xiaoming, et al. Research on driving pressure detection of railway trains based on ECG[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(6): 31-37.
- [21] GLOS M, FIETZE I, BLAU A, et al. Cardiac autonomic modulation and sleepiness: physiological consequences of sleep deprivation due to 40 h of prolonged wakefulness[J]. *Physiology & Behavior*, 2014, 125: 45-53.
- [22] ELIZA P, TIAGO P, DA P L S, et al. Different times of day do not change heart rate variability recovery after light exercise in sedentary subjects: 24 hours Holter monitoring [J]. *Chronobiology International*, 2017, 34(10): 1354-1365.
- [23] EO YUN J, PARK J, KIM S, et al. Estimation of melatonin level and core body temperature: heart rate and heart rate variability as circadian rhythm markers[J]. *Biological Rhythm Research*, 2022, 53(11): 1735-1752.
- [24] 李敬强, 周妍汝, 张希凝, 等. 东西飞行方向国际航班飞行机组疲劳研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(5): 206-212.
LI Jingqiang, ZHOU Yanru, ZHANG Xining, et al. Flight crew fatigue study for eastward and westward international flights[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(5): 206-212.
- [25] 李伟霞, 穆叶色·艾则孜, 谢植涛, 等. 清晨型与夜晚型量表-5项测评技工学校学生的效度和信度[J]. *中国心理卫生杂志*, 2016, 30(6): 406-412.
LI Weixia, AIZEZI Muyese, XIE Zhitao, et al. Early morning and evening scale-5 items to measure the validity and reliability of technical school students[J]. *Chinese Journal of Mental Health*, 2016, 30(6): 406-412.
- [26] 郑棒, 李曼, 王凯路, 等. 匹兹堡睡眠质量指数在某高校医学生中的信度与效度评价[J]. *北京大学学报: 医学版*, 2016, 48(3): 424-428.
ZHENG Bang, LI Man, WANG Kailu, et al. Reliability and validity evaluation of pittsburgh sleep quality index among medical students in a university[J]. *Journal of Peking University: Medical Science Edition*, 2016, 48(3): 424-428.
- [27] 李敬强, 王庆福, 张璐, 等. 不同睡眠类型选择性注意在睡眠剥夺中内稳态与昼夜节律研究[J]. *生物医学工程学报*, 2022, 39(2): 248-256.
LI Jingqiang, WANG Qingfu, ZHANG Lu, et al. Homeostasis and circadian rhythm in sleep deprivation with different sleep types of selective attention[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2022, 39(2): 248-256.
- [28] BONATO M, AGNELLO L, GALASSO L, et al. Acute modification of cardiac autonomic function of high-intensity interval training in collegiate male soccer players with different chronotype: a cross-over study[J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2017, 16(2): 286-294.
- [29] 游建平. LF/HF 比值变化是预测心律失常的敏感指标[J]. *中国医学研究与临床*, 2004(8): 8-9.
YOU Jianping. The change of LF/HF ratio is a sensitive index to predict arrhythmia[J]. *Chinese Medical Research and Clinical*, 2004(8): 8-9.
- [30] SUGAWARA J, HAMADA Y, NISHIJIMA T, et al. Diurnal variations of post-exercise parasympathetic nervous reactivation in different chronotypes[J]. *Japanese Heart Journal*, 2001, 42(2): 163-171.
- [31] BOMMEL V W. Lighting for work: a review of visual and biological effects [J]. *Lighting Research & Technology*, 2004, 36(4): 255-266.

作者简介: 李敬强 (1976—), 男, 天津人, 博士, 教授, 主要从事人为因素与飞行安全、安全风险等方面的研究。E-mail: jqli@cauc.edu.cn。

