

基于心率变异性的脑力疲劳检测

赵小静¹, 路海月¹, 王梦悦¹, 耿新玲^{1,2}, 张宽^{1,2}, 李霞^{1,2}

1. 首都医科大学生物医学工程学院, 北京 100069; 2. 首都医科大学临床生物力学应用基础研究北京市重点实验室, 北京 100069

【摘要】目的:研究基于心率变异性(HRV)的脑力疲劳状态的发展变化趋势及评测指标。**方法:**采用睡眠剥夺的方式诱导脑力疲劳,提取受试者在不同时间安静放松状态下的心电信号的HRV指标,并结合主观疲劳程度与注意力网络任务(ANT)结果研究脑力疲劳的发展变化趋势和评测指标。**结果:**随着睡眠剥夺时长的增加,受试者的主观疲劳程度逐渐加重,ANT的正确率下降且平均反应时间显著增加,但心率与HRV指标受昼夜节律影响呈现出与主观疲劳程度和ANT结果不同的变化趋势;人体处于脑力疲劳状态时心率下降,HRV指标显著上升。**结论:**在考虑昼夜节律的情况下,综合心率、HRV指标与ANT结果等多维度信息,可能对昼夜节律规律人群由睡眠剥夺引起的脑力疲劳状态实现更有效的评测。

【关键词】脑力疲劳;睡眠剥夺;心率变异性;主观疲劳程度;注意力网络任务

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)05-0592-06

Mental fatigue detection based on heart rate variability

ZHAO Xiaojing¹, LU Haiyue¹, WANG Mengyue¹, GENG Xinling^{1,2}, ZHANG Kuan^{1,2}, LI Xia^{1,2}

1. School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069, China; 2. Beijing Key Laboratory of Fundamental Research on Biomechanics in Clinical Application, Capital Medical University, Beijing 100069, China

Abstract: Objective To study the development trend and evaluation index of mental fatigue based on heart rate variability (HRV). **Methods** Mental fatigue was induced by sleep deprivation. The HRV parameters of electrocardiogram signals of subjects in a quiet and relaxed state were extracted. In different time points, the HRV parameters in combination with subjective fatigue levels and attentional network task (ANT) results were applied to research the development trend and evaluation index of mental fatigue. **Results** As the duration of sleep deprivation increased, the subjective fatigue level of subjects gradually increased; the correct rate of ANT dropped and the mean reaction time increased significantly. However, the heart rate and HRV index affected by circadian rhythm showed a trend of changes different from subjective fatigue levels and ANT results. Heart rate decreased and HRV index increased significantly in the mental fatigue state. **Conclusion** Considering the circadian rhythm and multi-dimensional information such as heart rate, HRV index and ANT results, it is possible to make a more effective evaluation of mental fatigue caused by sleep deprivation in circadian rhythm groups.

Keywords: mental fatigue; sleep deprivation; heart rate variability; subjective fatigue level; attentional network task

前言

国内外大量调查统计表明,由于人的不安全行为所导致的事故占事故总数的70%~90%以上^[1]。多项研究表明,15%~20%的重大交通事故由疲劳引起^[2]。飞行、煤矿、核电站等特殊领域的工作人群往往需要承受长时间的任务负荷且保持较高的应激能

力,因此采用可靠有效的方法对这类特殊领域工作人群的脑力疲劳状态进行评测具有重要意义。

脑力疲劳是一个渐进和累积的过程,表现为人体对事情产生厌倦感,不想努力,具有疲倦感,脑力活动受到抑制和损伤,降低人体的任务效率和警觉性^[3]。当前的脑力疲劳检测方法主要包括主观评定法和客观评定法。主观评定法是通过填写量表来对脑力疲劳情况进行评定,例如卡罗琳斯卡嗜睡量表(Karolinska Sleepiness Scale, KSS)^[4]和斯坦福嗜睡量表(Stanford Sleepiness Scale, SSS),该方法具有一定的可信度^[5],同时又具有很强的主观性,容易受多种因素影响。而客观评定法是通过仪器采集人体的多种生理信号检测脑力疲劳状态,例如血压、脉搏、

【收稿日期】2018-03-13

【基金项目】国家自然科学基金青年基金(61302035);首都医科大学
校自然科学基金(2016ZR13)

【作者简介】赵小静,在读硕士,主要从事基于多生理信号检测脑力疲
劳状态方面的研究, E-mail: jingxiao@mail.ccmu.edu.cn

【通信作者】李霞,博士,副教授, E-mail: xiali@ccmu.edu.cn

温度、心电信号(Electrocardiography, ECG)、脑电信号等^[6-10],基于生理信号检测脑力疲劳的方法更可靠、便捷且无创。虽然很多学者对其进行了多方面的研究探索,但由于脑力疲劳的复杂性并没有形成统一认可的标准。

心率变异性(Heart Rate Variability, HRV)用于描述自主神经系统交感神经与副交感神经分支的传出活动引起的心率搏动变化^[11-12],HRV是测量应激水平的指标,应激和疲劳虽然不同但是相互关联,在实验条件的严格控制下,HRV可以用于评价脑力疲劳状态^[13]。诱发脑力疲劳的方式主要有连续长时间的认知任务操作和睡眠剥夺^[14]。国内外已有不少学者对采用HRV评价不同方式诱导的脑力疲劳状态作了研究。李延军等^[13]通过设计读书和笔算两种脑力疲劳实验发现随着读书或笔算过程中疲劳程度的增加,心率下降而HRV上升,并且认为以工作绩效检测脑力疲劳具有局限性。通过睡眠剥夺的方式诱发脑力疲劳实施性高且效果显著。Chua等^[15]研究了受试者在40 h的睡眠剥夺过程中每隔两小时采集到的ECG信号的HRV指标和精神运动警觉性任务,结果发现HRV指标可用于监测疲劳,并可作为预测人体困倦的指标。

HRV具有昼夜节律性,白天时交感神经活性较强,夜晚时副交感神经活性较强。HRV功率谱的低频功率(Low Frequency Power, LF)反映交感神经活性,高频功率(High Frequency Power, HF)反映副交感神经活性,LF/HF反映交感神经和副交感神经的均衡性^[16]。虽然国内外不少学者对由睡眠剥夺诱导的脑力疲劳状态的HRV进行了研究分析,但考虑HRV昼夜节律性的研究较少。Quintana等^[17]认为24 h的实验室睡眠剥夺不会改变健康年轻男性仰卧位的高频HRV。本研究采用睡眠剥夺30 h的方式诱导脑力疲劳,同时考虑HRV的昼夜节律性,综合多种指标对由睡眠剥夺引起的脑力疲劳状态进行研究。

1 数据采集与处理

1.1 实验对象及要求

本研究对象为11名19~27岁昼夜节律规律的首都医科大学学生,男性2名,女性9名,年龄(23.00 ± 2.57)岁,学历不低于本科,右利手,体检健康,无吸烟史,无饮茶、酒和咖啡习惯。受试者在实验前需填写基本情况调查问卷、匹兹堡睡眠质量指数量表及Epworth嗜睡程度量表,确认受试者的昼夜节律规律。在睡眠剥夺前,受试者需进行一周的睡眠-觉醒周期调节,佩戴Fitbit手环^[18]记录睡眠情况,晚上的

睡眠开始时间不晚于12:00且达到7 h的睡眠时长,在睡眠-觉醒周期调节期间忌饮茶、酒、咖啡、吸烟和摄入药物并禁止剧烈运动。实验地点:实验室。实验室要求灯光和温度都恒定,干净整洁,噪声小。睡眠剥夺实验时间:上午9:00至第二天下午3:00结束。受试者在睡眠剥夺期间可进行看书、打牌、看剧等休闲娱乐活动,但不能进行剧烈运动、长时间打电脑游戏、看恐怖片等可以提高警觉性或加剧疲劳的活动。本研究已获得学校伦理委员会的认可,受试者在实验前已详细了解实验过程并签写了知情同意书。

1.2 实验仪器

本研究采用德国施曼诺公司的SOMNOscreen™ plus PSG+睡眠记录仪采集II导联ECG信号,采样频率256 Hz,低通截止频率设置为100 Hz,高通截止频率设置为0.2 Hz,滤除50 Hz工频干扰。采用仪器自带软件导出ECG信号数据。

1.3 注意力网络任务(Attentional Network Task, ANT)

实验要求受试者在笔记本电脑上进行ANT记录其正确率(Correct Rate, CR)和平均反应时间(Reaction Time, RT),受试者根据屏幕上的提示和箭头的指示方向做出反应,“E”键对应“←”,“I”键对应“→”。任务分为3部分,每部分大约5 min,受试者在完成每部分后休息约1 min,然后开始下部分。为避免受试者对任务的重复出现练习效应,实验人员需在实验前给受试者充分讲解任务的操作方式和内容,并要求受试者在实验前进行任务练习。

1.4 数据采集

受试者先填写KSS,静坐5 min后采集其在闭眼静坐状态下的ECG信号2 min,间隔2 min,开始ANT,整个过程约25 min,数据采集每隔6 h一次,共需采集6次数据。

1.5 数据处理

采用MATLAB软件编程对数据进行处理。采用小波变换的方法滤除ECG信号的高频噪声(64 Hz以上)和基线漂移(0.5 Hz以下),基于双正交样条小波提取RR间期^[19],计算心率及HRV的时频域指标。时域指标包括窦性心搏RR间期(Standard Deviation of NN intervals, SDNN)、相邻RR间期差值大于50 ms的百分比(Percentage of Differences Between Adjacent NN Intervals that are Greater Than 50 ms, PNN50)和相邻RR间期差值的均方根(Root Mean Square of Successive Differences, RMSSD)。对RR间期数据进行4 Hz插值重采样^[11],采用burg法

(AR模型阶数为19)计算功率谱^[20],计算HRV的频域指标LF(0.04~0.15 Hz)和HF(0.15~0.4 Hz)的功率绝对值、LF/HF、标化的LF和HF,即LFnu(Low Frequency Power in Normalized Units)和HFnu(High Frequency Power in Normalized Units)。采用SPSS 16.0软件进行统计学分析,对整个睡眠剥夺过程中的心率及HRV指标采用Bonferroni检验作单因素重复测量方差分析,并选取非脑力疲劳与疲劳状态,对两种状态下符合正态分布的指标进行配对 t 检验,不符合正态分布的指标进行秩和检验, $P<0.05$ (双侧)表示差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 脑力疲劳的发展变化趋势

KSS(1=极度警觉;2=非常警觉;3=警觉;4=一般警觉;5=不太警觉但无困意;6=有一些困意倾向;7=有困意,但是不需要太多努力保持清醒;8=有困意,且需要一定的努力保持清醒;9=非常困倦,需要极大的努力保持清醒)用于评价主观疲劳程度,图1表明受试者的主观疲劳程度自睡眠剥夺12 h后逐渐加重至24 h达到最重,30 h时有所缓解。从图2和3中也可看出,随着脑力疲劳的增加,受试者ANT的CR逐渐下降,平均RT逐渐上升,任务情况在睡眠剥夺24 h时最差,30 h时有微小的缓和,与主观疲劳程度的变化趋势一致。表1结果表明相较于初始状态(第一天早上9:00),在睡眠剥夺18 h(第二天凌晨3:00)时,心率显著下降($P=0.000$),PNN50上升($P<0.05$);在24 h(第二天早上9:00)时心率显著下降($P=0.000$),SDNN、PNN50、RMSSD与HF均显著上升($P=0.05$);其他时间的HRV指标未发生显著变化。但从睡眠剥夺0 h至6 h、24 h至30 h的指标结果均值变化来看,心率及HRV在24 h至30 h呈现了与0 h至6 h相反的变化趋势。综合主观疲劳程度与ANT结果的变化趋势可以看出,受试者在睡眠剥夺12 h后逐渐进入脑力疲劳状态,在24 h时疲劳程度最深,30 h时有所缓解,这可能是人体的生理抑制性保护效应,也可能是此时受试者的疲劳程度出现了差异,但HRV指标受昼夜节律影响表现出了不同的变化趋势。

2.2 脑力疲劳状态的指标变化

根据主观疲劳程度、ANT结果、心率及HRV指标的变化趋势,同时考虑HRV具有昼夜节律,分别选取睡眠剥夺0 h与6 h作为受试者的非脑力疲劳状态,24 h与30 h作为其疲劳状态。表2结果显示在睡眠剥夺24 h后,受试者的主观疲劳程度明显加重($P<0.01$),ANT的CR下降($P<0.05$),平均RT显著增加($P<0.01$),心率下降($P<0.001$),HRV的时域指标

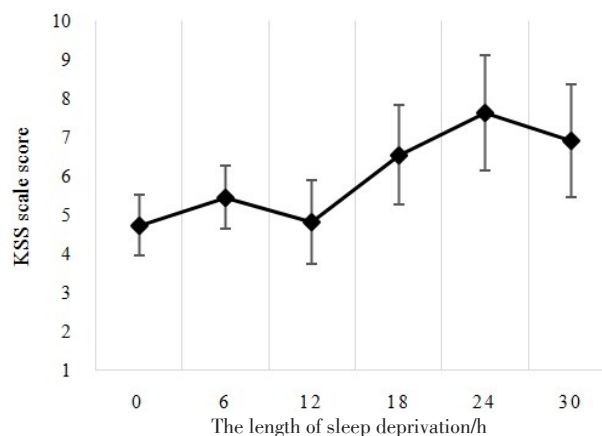


图1 主观疲劳程度变化

Fig.1 Changes in subjective fatigue level

KSS: Karolinska sleepiness scale

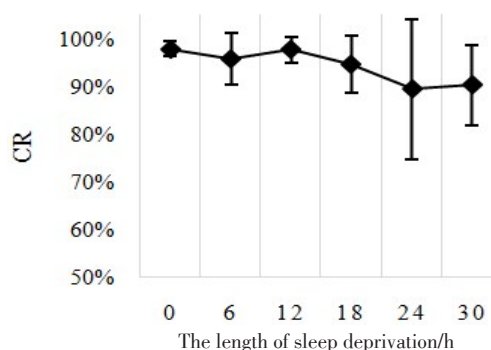


图2 ANT的正确率变化

Fig.2 Changes in CR of ANT

CR: Correct rate; ANT: Attentional network task

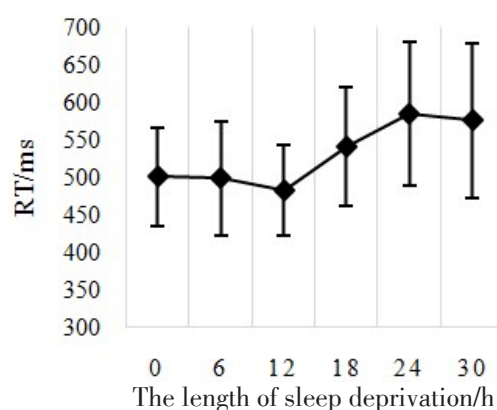


图3 ANT的平均反应时间变化

Fig.3 Changes in mean RT of ANT

RT: Reaction time

SDNN、PNN50与RMSSD均显著上升($P<0.001$),频域指标HF显著增加($P<0.01$),说明人体处于脑力疲劳状态时,应激能力下降,副交感神经活性增强。从表3结果可以看出相对于非脑力疲劳状态(6 h),受试者在睡眠剥夺30 h后主观疲劳程度仍然较重

表1 指标的单因素重复测量方差分析结果
Tab.1 Results of one-way repeated measures ANOVA of indicators

Indicator	Length of sleep deprivation/h					
	0	6	12	18	24	30
HR	72.93±5.23	68.18±7.69	68.67±4.99	59.73±6.02	63.38±5.75	68.24±7.87
<i>P</i> value	-	0.574	0.089	0.000***	0.000***	1.000
SDNN	39.48±12.18	42.72±17.19	42.61±12.13	57.91±26.92	56.12±17.63	47.48±16.05
<i>P</i> value	-	1.000	1.000	0.307	0.006**	0.504
PNN50	0.13±0.12	0.24±0.22	0.25±0.19	0.37±0.22	0.38±0.20	0.25±0.22
<i>P</i> value	-	0.779	0.220	0.010**	0.002**	0.155
RMSSD	31.58±10.21	42.79±24.69	41.31±14.79	56.15±29.27	53.09±20.20	42.09±19.52
<i>P</i> value	-	1.000	0.177	0.054	0.003**	0.156
LF	458.37±399.93	467.22±268.70	420.12±251.86	719.13±753.46	795.26±691.80	530.82±308.41
<i>P</i> value	-	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
HF	494.16±340.69	971.37±1373.81	778.87±562.31	1 361.81±1457.17	1 269.26±890.43	784.39±665.08
<i>P</i> value	-	1.000	0.406	0.608	0.036*	0.404
LF/HF	1.13±0.91	0.87±0.81	0.80±0.74	0.82±0.84	1.02±1.15	1.25±1.46
<i>P</i> value	-	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
LFnu	46.67±17.98	41.03±14.91	38.48±17.33	36.39±22.05	39.29±23.62	43.48±21.67
<i>P</i> value	-	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
HFnu	53.33±17.98	58.97±14.91	61.52±17.34	63.61±19.77	60.71±23.62	56.52±21.67
<i>P</i> value	-	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

HR: Heart rate; SDNN: Standard deviation of NN intervals; PNN50: Percentage of differences between adjacent NN intervals that are greater than 50 ms; RMSSD: Root mean square of successive differences; LF: Low frequency power; HF: High frequency power; LFnu: Low frequency power in normalized units; HFnu: High frequency power in normalized units; Compared with non-fatigue (0 h), * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$

($P<0.01$),任务能力仍然下降显著($P<0.05$),但心率与HRV指标均无显著性差异。

3 讨论与结论

从本实验中睡眠剥夺诱发脑力疲劳过程中的主观疲劳程度和ANT结果来看,随着睡眠剥夺时长的增加,受试者的脑力疲劳程度逐渐加深,人体的应激能力、注意力和反应能力也逐渐下降,但心率在白天上升夜晚下降及HRV指标在白天下降夜晚上升的变化趋势与正常的昼夜节律一致^[16],说明昼夜节律规律的人群处于由睡眠剥夺引起的脑力疲劳状态时,心率、SDNN、PNN50、RMSSD及HF虽然受脑力疲劳的影响在第二天未恢复到基线水平,但仍然保持着一定的昼夜节律性。这与Quintana等^[17]的研究结果不一致,可能原因有:(1)二者实验数据采集的时间

不同;(2)受试者的体位不同,Quintana等^[17]的实验要求受试者是仰卧位状态,而本实验要求静坐状态。

本实验分别研究了睡眠剥夺24 h对比0 h,30 h对比6 h的指标变化,研究结果表明受试者在睡眠剥夺24 h后明显进入脑力疲劳状态,主观疲劳程度加重,任务能力下降,心率显著下降及HRV指标SDNN、PNN50、RMSSD与HF均显著上升,说明昼夜节律规律的人群处于由短时睡眠剥夺(<24 h)引起的脑力疲劳状态时,人体的应激能力下降,副交感神经活性显著增强。多项研究也表明睡眠剥夺影响心脏代谢,引起自主神经功能障碍^[21]。但本实验中LF、LF/HF、LFnu与HFnu均无显著性差异且样本个体差异较大,这可能与样本量较少有关。而受试者处于睡眠剥夺30 h时的脑力疲劳状态时,虽然主观疲劳程度仍然较重,任务能力下降显著,但心率及HRV指

表2 非疲劳(0 h)与疲劳(24 h)状态的指标对比
Tab. 2 Comparison of indicators in non-fatigue (0 h) and fatigue (24 h) states

Indictor	Length of sleep deprivation/h		P value
	0	24	
KSS ^b	4.73±0.79	7.64±1.50	0.007**
CR ^b	97.92±1.58	89.49±14.69	0.014*
RT ^a	501.00±65.98	584.85±95.94	0.004**
HR ^a	72.93±5.23	63.38±5.75	0.000***
SDNN ^a	39.48±12.18	56.12±17.63	0.000***
PNN50 ^a	0.13±0.12	0.38±0.20	0.000***
RMSSD ^a	31.58±10.21	53.09±20.20	0.000***
LF ^a	458.36±399.93	795.26±691.80	0.140
HF ^b	494.16±340.69	1 269.26±665.08	0.003**
LF/HF ^a	1.13±0.91	1.02±1.15	0.676
LFnu ^a	46.67±17.98	39.29±23.62	0.298
HFnu ^a	53.33±17.98	60.71±23.62	0.298

a: Paired *t*-test; b: Wilcoxon rank sum test; **P*<0.05, ***P*<0.01, ****P*<0.001

表3 非疲劳(6 h)与疲劳(30 h)状态的指标对比
Tab. 3 Comparison of indicators in non-fatigue (6 h) and fatigue (30 h) states

Indictor	Length of sleep deprivation/h		P value
	6	30	
KSS ^b	5.45±0.82	6.91±1.45	0.006**
CR ^b	95.83±5.47	90.40±8.43	0.005**
RT ^a	498.20±76.28	575.57±103.28	0.016*
HR ^a	68.18±7.69	68.24±7.86	0.983
SDNN ^b	42.72±17.19	47.48±16.05	0.213
PNN50 ^a	0.24±0.22	0.25±0.22	0.724
RMSSD ^a	42.79±24.69	42.09±19.52	0.790
LF ^a	467.21±286.70	530.82±308.41	0.323
HF ^b	971.36±1 373.81	784.39±665.08	0.722
LF/HF ^b	0.87±0.81	1.25±1.46	0.534
LFnu ^a	41.03±14.91	43.48±21.67	0.652
HFnu ^a	58.97±14.91	56.52±21.67	0.652

a: Paired *t*-test; b: Wilcoxon rank sum test; **P*<0.05, ***P*<0.01

标均无显著性差异,原因可能有:(1)随着睡眠剥夺时长的增加,个体的疲劳程度出现了较大差异,对保

持清醒状态和任务的主观努力程度不同;(2)在人体的生理抑制性保护效应和昼夜节律的调节下,脑力疲劳程度有所减轻。

本研究以睡眠剥夺的方式诱导脑力疲劳,结合主观疲劳程度、ANT结果及ECG信号的HRV指标变化对脑力疲劳状态进行了研究。结果表明经短时睡眠剥夺(<24 h)后,昼夜节律稳定的人群进入脑力疲劳状态时,人体的应激能力下降,注意力和反应能力下降,副交感神经活性显著增强。在考虑昼夜节律的情况下,心率及HRV指标SDNN、PNN50、RMSSD与HF均有望作为评测脑力疲劳的客观指标,ANT结果也可考虑作为其辅助指标。

HRV是测量应激水平的可靠指标,也可间接反映疲劳情况。由于HRV具有昼夜节律性,使用HRV指标评价脑力疲劳状态时应考虑人体昼夜节律及测试者作息状况,尤其对于昼夜节律紊乱的人群,其脑力疲劳检测可能需要考虑更多因素,对长时睡眠剥夺(>24 h)引起的脑力疲劳状态,可考虑结合脑电信号、脑部血氧等多维指标进行综合评定。生理信号的变化易受多种因素影响,且个体差异较大,充分考虑昼夜节律等因素并综合运用多维指标对脑力疲劳状态进行评测可能更为有效。

【参考文献】

[1] 李晔. 核电站人因失误分析及控制[J]. 中国核科学技术进展报告, 2009: 875-879.
LI Y. Human factor analysis and preventive countermeasures in nuclear power plant[J]. Progress Report on China Nuclear Science & Technology, 2009(11): 875-879.

[2] SIMON M, SCHMIDT E A, KINCSES W E, et al. EEG alpha spindle measures as indicators of driver fatigue under real traffic conditions [J]. Clin Neurophysiol, 2011, 122(6): 1168-1178.

[3] BORGHINI G, ASTOLFI L, VECCHIATO G, et al. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2014, 44: 58-75.

[4] AKERSTEDT T, GILLBERG M. Subjective and objective sleepiness in the active individual[J]. Int J Neurosci, 1990(52): 29-37.

[5] KOSUKE K, MASAYA T, TORBJORN A, et al. Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables [J]. Clin Neurophysiol, 2006(117): 1574-1581.

[6] ELLIOTT J L, SARA L. Blood pressure, sleep quality and fatigue in shift working police officers: effects of a twelve hour roster system on cardiovascular and sleep health[J]. Int J Environ Res Pub Heal, 2016 (13): 172.

[7] 刘海平. 机动车驾驶员疲劳状态识别系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LIU H P. Research on recognition system of vehicle driver's fatigue status[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[8] THOMAS L C, GAST C, GRUBE R, et al. Fatigue detection in commercial flight operations: results using physiological measures[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 3: 2357-2364.

- [9] 王晓璐,高翔,许敏鹏,等. 基于睡眠剥夺模型的脑力疲劳检测方法研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2015, 32(3): 498-502.
WANG X L, GAO X, XU M P, et al. Research on mental fatigue detecting method based on sleep deprivation models[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2015, 32(3): 498-502.
- [10] HUANG K C, HUANG T Y, CHUANG C H. An EEG-based fatigue detection and mitigation system[J]. Int J Neural Syst, 2016, 26(4): 1-14.
- [11] BOARDMAN A, SCHLINDWEIN F S, ROCHA A P, et al. A study on the optimum order of autoregressive models for heart rate variability [J]. Physiol Meas, 2002, 23(2): 325-336.
- [12] 金晓萍, 马玉玲. CRP、血脂及NT-proBNP与高血压合并OSAHS患者血压及心率变异性的关系[J]. 热带医学杂志, 2017, 17(12): 1643-1647.
JIN X P, MA Y L. The relationship of CRP, blood lipid and NT-proBNP with blood pressure and heart rate variability in patients with hypertension complicated with OSAHS [J]. Journal of Tropical Medicine, 2017, 17(12): 1643-1647.
- [13] 李延军, 严洪, 杨向林, 等. 基于心率变异性的精神疲劳的研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2010, 29(1): 1-6.
LI Y J, YAN H, YANG X L, et al. Study of mental fatigue based on heart rate variability [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2010, 29(1): 1-6.
- [14] 郭玮, 任杰. 脑力疲劳的实验室诱发模型和评价手段研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2013, 32(12): 1121-1128.
GUO W, REN J. Laboratory induced models and evaluation methods of mental fatigue: a review[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2013, 32(12): 1121-1128.
- [15] CHUA E C, TAN W Q, et al. Heart rate variability can be used to estimate sleepiness-related decrements in psychomotor vigilance during total sleep deprivation[J]. Sleep, 2012, 35(3): 325-334.
- [16] 韩卫星, 胡华青, 丁玉珍. 健康人心率变异的昼夜节律分析[J]. 中国基层医药, 2000, 7(2): 45-46.
HAN W X, HU H Q, DING Y Z. Circadian rhythm analysis of heart rate variability in healthy people [J]. China Journal of Primary Medicine and Pharmacy, 2000, 7(2): 45-46.
- [17] QUINTANA D S, ELVSASHAGEN T, ZAK N A, et al. Diurnal variation and twenty-four hour sleep deprivation do not alter supine heart rate variability in healthy male young adults[J]. PloS One, 2017, 12(2): e0170921.
- [18] ZAMBOTTI M D, BAKER F C, WILLOUGHBY A R, et al. Measures of sleep and cardiac functioning during sleep using a multi-sensory commercially-available wristband in adolescents[J]. Physiol Behav, 2016, 158: 143-149.
- [19] 纪震, 郑秀玉, 罗军, 等. 基于双正交样条小波的QRS波检测[J]. 深圳大学学报(理工版), 2008, 25(2): 167-172.
JI Z, ZHENG X Y, LUO J, et al. Detection of QRS complexes based on biorthogonal spline wavelet [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2008, 25(2): 167-172.
- [20] 柴晓珂, 王步青, 张政波, 等. 心率变异性自回归模型分析中确定最佳阶数的方法研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2015, 32(5): 958-964.
CHAI X K, WANG B Q, ZHANG Z B, et al. Study on the optimum order of autoregressive models for heart rate variability analysis[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2015, 32(5): 958-964.
- [21] TOBALDINI E, COSTANTINO G, SOLBIATI M, et al. Sleep, sleep deprivation, autonomic nervous system and cardiovascular diseases [J]. Neurosci Biobehav Rev, 2016, 74(Pt B): 321-329.

(编辑:谭斯允)