

睡眠呼吸暂停时间对血氧饱和度和心率的影响

葛晓丽^a, 邱召运^{a,b}, 索智鹏^a, 樊晓伟^a, 修东铭^a

摘要:目的 睡眠呼吸暂停综合征患者发生呼吸暂停时需要及时唤醒,何时唤醒患者需要更多的参考依据。为此,试验研究了睡眠呼吸暂停时间对血氧饱和度和心率的影响,提出通过实时监测血氧饱和度来辅助判断是否发生呼吸暂停。方法 选择健康志愿者 10 例,其中男性 3 例,女性 7 例;年龄 22 ~ 24 岁,平均年龄 21.7 岁;体质量 44 ~ 85 kg,平均体质量 58.35 kg;体质量指数 17.3 ~ 25.9 kg/m²,平均体质量指数 20.81 kg/m²;身高 155 ~ 187 cm,平均身高 166.1 cm。受试者通过憋气模拟呼吸暂停事件,利用 AFE4490 集成模拟前端采集受试者指端脉搏信号,并根据光电容积脉搏波波形计算血氧饱和度和心率值,得到了血氧饱和度和心率随呼吸暂停时长变化的特性曲线。结果 血氧饱和度随呼吸暂停时间的增加呈下降趋势;心率随呼吸暂停时间的增加呈上升趋势。血氧饱和度首次代偿到达峰值的时间约为 11.2 s,首次代偿结束时间约为 18.6 s;心率首次代偿到达峰值的时间约为 12.1 s,首次代偿结束时间约为 19.4 s。结论 患者发生呼吸暂停时,血氧饱和度和心率会出现周期性变化趋势,但与心率相比,血氧饱和度对呼吸暂停时长的变化更为敏感且规律。根据血氧饱和度随呼吸暂停的时间参数为睡眠呼吸暂停综合征患者的唤醒时刻提供了参考数据。

关键词:睡眠呼吸暂停综合征;光电容积脉搏波;血氧饱和度;心率

中图分类号:R318.03;R766

文献标识码:A

文章编号:1009-7090(2020)03-0239-06

Effect of sleep apnea time on blood oxygen saturation and heart rate GE Xiao-li^a, QIU Zhao-yun^{a,b}, SUO Zhi-peng^a, FAN Xiao-wei^a, XIU Dong-ming^a (a. Department of Biomedical Engineering, School of Bioscience and Technology; b. Department of Electronics and Computer Technology, Weifang Medical University, Weifang 261053, Shandong, China)
Corresponding author: QIU Zhao-yun. E-mail: wfqzy@sohu.com.

Abstract: Objective To study the effect of sleep apnea time on blood oxygen saturation and heart rate, and monitor blood oxygen saturation in real time for auxiliary judgment in determining apnea occurs, in the consideration the reference basis for patients with sleep apnea syndrome who need to wake up in time during apnea. **Methods** Ten healthy volunteers were enrolled, which included 3 males and 7 females, aged 22 - 24 years old with mean age of 21.7 years old; body weight was 44 - 85 kg with mean body weight of 58.35 kg; body mass index was 17.3 - 25.9 kg/m² with mean body mass index of 20.81 kg/m²; height was 155 - 187 cm with mean height of 166.1 cm. All of them simulated apnea by belching, and the fingertip pulse signals were collected using AFE4490 integrated simulation front-end, the blood oxygen saturation and heart rate were calculated based on the photoelectric volume pulse wave waveform, and the characteristic curves of blood oxygen saturation and heart rate as a function of apnea duration were obtained. **Results** As apnea time was increased, blood oxygen saturation decreased and heart rate increased. The peak time of the first compensation of blood oxygen saturation was about 11.2 seconds, and ending time of first compensation was about 18.6 seconds; peak time of the first compensation of heart rate was about 12.1 seconds, and ending time of the first compensation was 19.4 seconds. **Conclusion** It is demonstrated that the blood oxygen saturation and heart rate change periodically in apnea. Compared with heart rate, blood oxygen saturation is more sensitive and regular in apnea. The parameters of blood oxygen saturation and time parameters of apnea provide reference data for the awaking time of patients with sleep apnea syndrome.

Key words: sleep apnea syndrome; photoplethysmography; blood oxygen saturation; heart rate

睡眠呼吸暂停综合征 (sleep apnea syndrome, SAS) 的患者在睡眠过程中会出现低通气和呼吸暂停的现象^[1];SAS 患者表现白天精神不振、头疼,引发高血压、心力衰竭等疾病^[2],严重时还会猝死。临床上将

多导睡眠图 (polysomnography, PSG) 作为 SAS 诊断的“金标准”,但 PSG 测量复杂,而且 PSG 测量指标是低通气指数,无法反映缺氧的实际持续时间和严重程度,在诊断方面存在不足^[3,4]。通常,在睡眠中,当呼吸

作者单位:潍坊医学院 a.生物科学与技术学院 生物医学工程系;b.电子与计算机技术教研室,山东 潍坊 261053

作者简介:葛晓丽(1995-),女,山东省人,硕士研究生,主要从事生物医学工程方面研究。电话:19821236925。E-mail:18863699828@163.com。

基金项目:山东省自然科学基金研究项目(ZR2018BC025;ZR2019BF037);山东省高等学校科技计划项目(J16LM06);潍坊医学院教育教学改革与研究项目(2018ZD003)

通信作者:邱召运(1963-),男,山东诸城人,本科,教授,主要从事生物医学工程专业的教学和科研工作。E-mail:wfqzy@sohu.com。

版权©保护,不得翻录。

暂停持续时间超过 10 s 时要唤醒患者, 但不同人的睡眠习惯存在差异, 有些患者出现睡眠呼吸暂停时, 血氧饱和度并没有出现明显下降的现象, 频繁唤醒患者会严重影响其睡眠质量, 因此何时唤醒患者需要更多的参考依据。显然, 长时间呼吸暂停会导致患者缺氧, 将血氧饱和度作为一项辅助检测指标具有实际价值。目前对于 SAS 的研究大都停留在筛选和诊断层面, 忽略了患者在呼吸暂停期间人体重要的生理参数如血氧饱和度和心率(heart rate, HR)随呼吸暂停时长的变化。研究表明, 血氧饱和度和 HR 的变化与呼吸暂停时间的长短具有相关性^[5,6]。

血氧饱和度的检测方法分为有创和无创两种, 有创检测法测量数据精准, 但在测量时需要采集动脉血液, 对人体造成损伤, 现在大多采用无创测量法^[7]。HR 的检测方法有很多, 目前大多采用光电法。笔者利用 AFE4490 集成模拟前端采集指端脉搏信号, 集成模拟前端采用透射式进行无创测量, 获取光电容积脉搏波 (photoplethysmography, PPG) 波形, 可根据 PPG 波形计算血氧饱和度和 HR 值, 据此可以研究呼吸暂停时间对血氧饱和度和 HR 的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择健康志愿者 10 例, 其中男性 3 例, 女性 7 例; 年龄 22 ~ 24 岁, 平均年龄 21.7 岁; 体质量 44 ~ 85 kg, 平均体质量 58.35 kg; 体质量指数 17.3 ~ 25.9 kg/m², 平均体质量指数 20.81 kg/m²; 身高 155 ~ 187 cm, 平均身高 166.1 cm。所有志愿者均自愿同意参加试验。

1.2 方法

1.2.1 AFE4490 集成模拟前端的介绍

AFE4490 集成模拟前端采集指端脉搏信号, 它主要包括 4 个功能单元: 发光二极管(light-emitting diode, LED)驱动单元, 光电传感器, 信号处理单元, 时钟控制单元^[8]。能够实现对脉搏信号的采集并进行放大、滤波和模/数(analog/digital, A/D)转换处理, 通过串行外围设备接口(serial peripheral interface, SPI)与外部设备通信实现各种功能。AFE4490 集成模拟前端高度集成, 使用者可选择内部具有的自适应陷波滤波器对波形进行滤波处理, 以获取理想的测量数据。

1.2.2 基于模拟前端的血氧饱和度检测

AFE4490 集成模拟前端依据 PPG 描记法采集动脉脉搏信号, PPG 描记法的理论依据是朗伯-比尔定律^[9]。当一束平行单色光入射到均匀的溶液时, 沿传播方向透射光强度将按指数规律发生衰减。透射光

与入射光的比值称为光密度, 光密度与溶液的厚度和浓度有关。血液中的吸光物质主要是血红蛋白, 根据氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO₂)与脱氧血红蛋白(hemoglobin, Hb) 的吸光特性可知, HbO₂ 与 Hb 的光密度存在一定的差异^[10], 在红光波长区段, 主要是 Hb 吸收光波; 在红外光波长区段, 主要是 HbO₂ 吸收光波, 通常选择发射波长为 660 nm 的红光和 940 nm 的红外光来计算血氧饱和度^[11]。

AFE4490 集成模拟前端对指端血氧信号的采集过程: LED 驱动单元驱动 LED 交替发射红光和红外光照射到手指部位, 入射光穿透手指, 手指中的动脉血液、静脉血液、皮肤、肌肉吸收光强使透射光发生衰减, 光电传感器接收透射光信号, 并将光信号转换为电流信号, 然后将电流信号送到 I/V (electric current/voltage) 单元将电流信号转换为电压信号, 之后将信号传送给信号处理单元进行放大、滤波、A/D 转换处理, 输送给单片机, 单片机将处理好的信号通过 SPI 接口送到外部设备显示测量波形图^[12]。

动脉血管具有弹性和扩张性, 动脉血管会随着心脏的周期性收缩和舒张发生收缩和舒张, 动脉血液容积也会发生周期性变化, 光电传感器接收到的光信号相应的呈脉动变化, 因此 PPG 波形图呈周期性变化, 在 PPG 波形图中表示为交流量变化。而静脉血管、肌肉、皮肤对光的吸收量为恒定值, 光电传感器接收到的光信号为直流量, 在 PPG 波形图中表示为直流量。图 1 为试验利用 AFE4490 集成模拟前端采集受试者正常呼吸时的指端 PPG 波形。

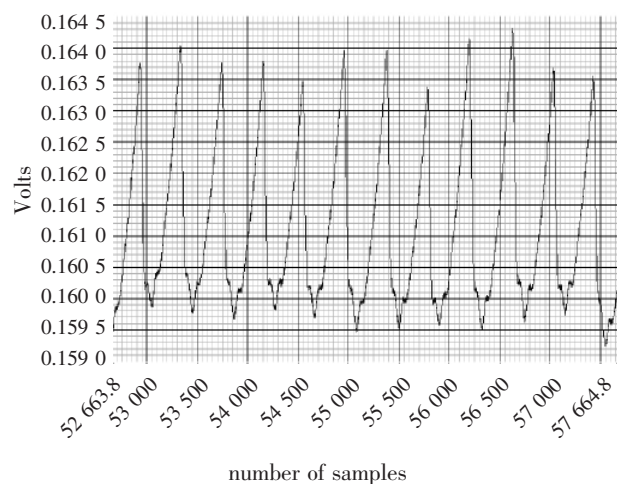


图 1 手指部位的 PPG 波形
Fig. 1 PPG waveform of finger

已知在红外波长区段主要是 HbO₂ (氧气与血红蛋白结合) 吸收红外光波, 脉搏血氧饱和度(pulse oxygen saturation, SpO₂)的计算公式为:

$$SpO_2 = \frac{HbO_2}{Hb + HbO_2} \quad (1)$$

式中:SpO₂表示脉搏血氧饱和度;Hb为脱氧血红蛋白量;HbO₂为氧合血红蛋白量;Hb + HbO₂表示血红蛋白的总量,为常数。可见,SpO₂的变化与HbO₂的变化成正相关关系,因此可以用发射光为红外光得到PPG波形的变化,间接表示HbO₂的变化情况,通过计算HbO₂的变化量间接反映SpO₂的变化情况,方法更为简单。

根据图1可知,心脏的每一次搏动在PPG波形图上都会出现一次波峰和波谷,波峰与波谷之间的差值的变化量表示HbO₂的变化量,能够反映在呼吸暂停期间血氧饱和度的变化情况。假设受试者正常呼吸时的HbO₂为100%,HbO₂变化量的简易计算公式为:

$$Sp = \frac{d}{d_i} \times 100\% \quad (2)$$

其中:Sp表示SpO₂的变化量;d表示正常呼吸时波峰与波谷的差值量;d_i表示在呼吸暂停期间波峰与波谷的差值变化量。根据式(2)计算受试者模拟呼吸暂停事件时SpO₂的变化情况,每位受试者分别进行3次测量取平均值,根据试验结果绘制波形图。

1.2.3 基于模拟前端的心率检测

动脉血管随心脏周期性的收缩与舒张出现周期性的波动,动脉血容积相应地发生变化,光电传感器接收到的光信号也随其发生变化,得到的PPG波形呈周期性变化。因此利用AFE4490集成模拟前端得到的PPG波形可以反映心脏的周期性跳动,反映HR的变化情况。

PPG波形的周期性变化反映了心脏的周期性跳动,PPG波形的周期大小可以反映HR随呼吸暂停时间的变化情况。设PPG波形图中相邻峰-峰值之间的时间间隔即周期为T,则瞬时HR计算公式为:

$$HR = \frac{60}{T} \quad (3)$$

根据式(3)计算受试者模拟呼吸暂停事件时HR的变化情况。每位受试者分别进行3次测量取平均值,根据试验结果绘制波形图。

1.3 统计学方法

使用SPSS19.0软件对数据进行统计分析。计量数据采用均数 ± 标准差表示,采用t检验法。t检验用于样本容量小,试验数据符合正态分布。P < 0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 血氧饱和度测定结果

10例受试者的SpO₂随呼吸暂停时间变化的曲线图趋势几乎一致,无特异性现象出现,故选取1例受试者的试验数据(表1),绘制SpO₂随呼吸暂停时长变化的曲线(图2)。曲线中A点为呼吸暂停开始时间,B点为首次代偿开始时间,C点为首次代偿到达峰值的时间,D点为首次代偿结束的时间。

表1 SpO₂随呼吸暂停时间的变化
Tab. 1 SpO₂ changes with apnea time

t / s	SpO ₂ / %	t / s	SpO ₂ / %
0.000	100.00	26.922	84.50
0.714	94.91	28.497	85.94
2.037	86.77	30.051	77.91
3.297	72.96	31.710	69.04
4.557	75.84	33.348	67.19
5.901	74.09	34.944	67.60
7.308	78.73	36.561	65.33
8.715	86.05	38.094	71.08
10.185	88.11	39.648	69.19
11.634	90.58	41.181	63.20
13.041	89.45	42.735	53.63
14.511	85.02	41.979	53.73
15.918	80.89	43.533	55.21
17.493	77.80	44.171	52.58
19.089	72.96	47.061	55.21
20.685	71.83	48.699	44.58
22.197	77.20	50.232	47.53
23.709	70.59	51.891	51.00
25.284	74.71	53.676	50.16

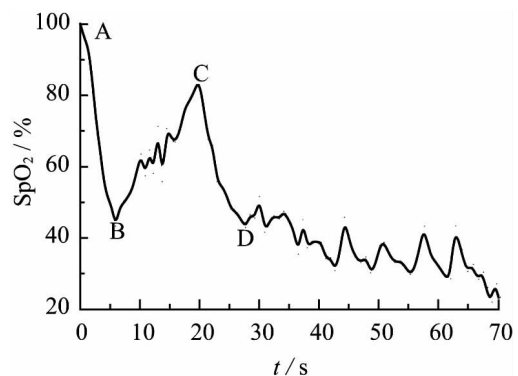


图2 SpO₂随呼吸暂停时长的变化曲线
Fig. 2 Curve of changes in SpO₂ with apnea time

从图2曲线可知,受试者在呼吸暂停期间,SpO₂随呼吸暂停时间的增加整体呈下降的趋势。患者发生呼吸暂停时,大脑感受到氧气含量下降,通过神经-体液调节系统使心脏快速收缩和舒张来满足重要器官的含氧量需求,这称为心脏的代偿效应。在AB时间段,SpO₂出现下降的现象,到达B点时,SpO₂下降了

约 20%，下降情况可因人而异；呼吸暂停一段时间后，从 B 点开始，心脏首次出现代偿效应，血氧饱和度表现为周期性的上升，随着呼吸暂停时长的增加，SpO₂ 周期性变化频率加快。到达 C 点时，首次代偿效应使 SpO₂ 升到峰值，接近正常水平，之后 SpO₂ 再也没有达到正常值，因此在到达 C 点前唤醒患者较为合适。

10 例 SpO₂ 首次代偿开始时间为 5.0 ~ 6.8 s，平均代偿时间为 6.1 s, $P = 0.052$ ；SpO₂ 首次代偿周期为 8.5 ~ 15.1 s，平均代偿周期 13.5 s, $P = 0.053$ ；SpO₂ 首次代偿峰值时间为 6.0 ~ 13.5 s，平均代偿峰值时间为 11.2 s, $P = 0.052$ ；SpO₂ 首次代偿结束时间为 13.5 ~ 20.0 s，平均代偿结束时间为 18.6 s, $P = 0.062$ 。

2.2 心率测定结果

根据试验结果绘制波形图，结果表明波形趋势大体一致。选取 1 例受试者的试验数据(表 2)，绘制的 HR 随呼吸暂停时长变化的曲线(图 3)。曲线中 A 为呼吸暂停开始时间，B 为首次代偿开始时间，C 为首次代偿到达峰值的时间，D 为首次代偿结束时间。

表 2 HR 随呼吸暂停时间的变化
Tab. 2 HR changes with apnea time

t / s	HR / 次/秒	t / s	HR / 次/秒
0.00	73.35	28.21	73.17
0.83	72.29	29.85	73.17
2.41	71.00	31.50	70.59
4.01	75.00	33.13	75.38
5.59	76.92	34.69	77.52
7.26	70.59	36.29	75.00
8.91	75.00	37.95	71.43
10.59	69.44	39.55	75.00
12.43	65.22	41.15	75.00
14.23	68.18	42.73	74.07
15.98	69.77	44.39	76.11
17.61	75.00	46.02	77.09
19.22	76.34	47.68	86.00
20.83	75.00	49.40	72.18
23.28	72.29	50.26	88.77
24.93	74.44	51.95	88.77
26.57	74.07	53.71	85.82

从图 3 曲线可知，受试者在呼吸暂停期间，HR 随呼吸暂停时间的增加整体呈上升的趋势。HR 开始出现短暂的下降，之后 HR 出现周期性上升，在受试者模拟呼吸暂停事件时间越长时，这种周期性变化频率明显加快。受试者在发生呼吸暂停时，血液中的氧含量下降，血氧分压降低刺激颈动脉体和主动脉体化学感受器，反射性引起交感神经兴奋，交感神经对心

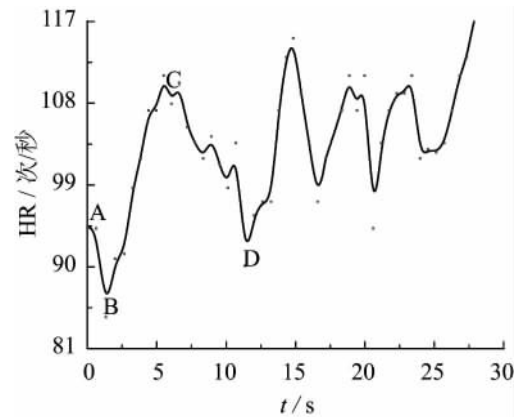


图 3 HR 随呼吸暂停时长的变化曲线

Fig. 3 Curve of changes in HR with apnea time

脏产生正性肌力作用，引起 HR 增快，心输出量增多。体内氧含量通过心脏的快速跳动将氧气重新分布满足机体组织氧气的需要。从图 3 中可以看出在呼吸暂停期间心脏多次出现代偿效应，代偿效应会加重心脏负荷，长此以往会引发心力衰竭。

10 例受试者 HR 首次代偿开始时间为 5.0 ~ 8.5 s，平均首次代偿开始时间 7.5 s, $P = 0.052$ ；HR 首次代偿周期为 8.5 ~ 15.0 s，平均首次代偿时间为 13.8 s, $P = 0.053$ ；HR 首次代偿峰值时间为 5.0 ~ 15.5 s，平均首次代偿峰值时间为 12.1 s, $P = 0.056$ ；HR 首次代偿结束时间为 13.5 ~ 23.5 s，平均首次代偿结束时间 19.4 s, $P = 0.059$ 。

HR 随呼吸暂停的变化情况会出现特异性现象，但一开始发生呼吸暂时，HR 在呼吸暂停的一段时间内总是呈上升趋势(图 4)。

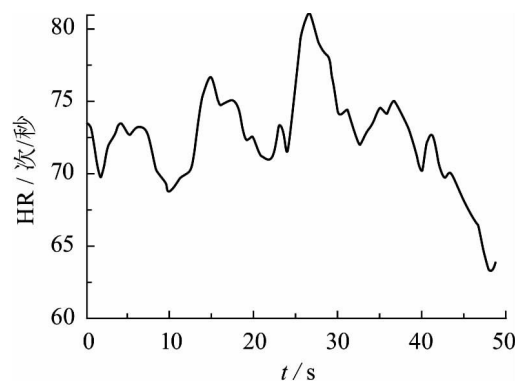


图 4 HR 随呼吸暂停时间变化的特异性曲线图

Fig. 4 Specificity curve of HR with apnea time

2.3 血氧饱和度和心率的综合情况

SpO₂ 和 HR 的首次代偿周期几乎相同，并且心脏的代偿周期具有相同的变化规律。SpO₂ 与 HR 相比，SpO₂ 的所有时间参数指标都早，说明 SpO₂ 对呼吸暂停时长更敏感。因此 SpO₂ 适于 SAS 患者唤醒的一

项辅助检测指标, 可选择 SpO₂ 代偿峰值时间 11.2 s 之前的时间段唤醒 SAS 患者, 或者最迟在 SpO₂ 首次代偿结束时间 18.6 s 之前将患者唤醒。见图 5、表 3。

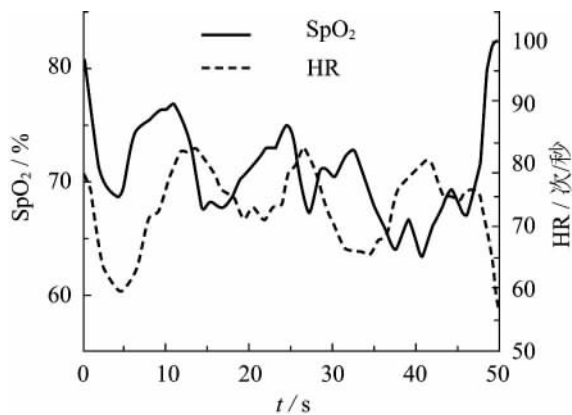


图 5 SpO₂ 和 HR 随呼吸暂停时长的变化曲线

Fig. 5 Curves of SpO₂ and HR changed with apnea time

表 3 代偿时间参数指标对比分析

Tab. 3 Comparative analysis of compensation time parameter indicators

首次代偿参数	SpO ₂ / s	HR / s
代偿起始时间	6.1	7.5
代偿周期	13.5	13.8
代偿峰值时间	11.2	12.1
代偿结束时间	18.6	19.4

3 讨论

在睡眠过程中最常出现的现象就是打鼾。研究发现, 打鼾的主要原因是可能患有 SAS, 它可引起多种并发症, 如高血压、心力衰竭等, 因此对于 SAS 的诊断与治疗已经成为当下一大研究热点。目前将 PSG 作为 SAS 诊断的“金标准”, 但 PSG 测量复杂、不能家用。

临床上定义当人的口鼻气流停止 10 s 以上时可判定发生呼吸暂停。笔者针对在发生呼吸暂停时, SpO₂ 与 HR 的生理参数随呼吸暂停时间的变化情况展开讨论, 为 SAS 患者的唤醒时刻提供参考依据。利用 AFE4490 集成模拟前端获取 SpO₂ 与 HR 的试验数据, 并使用 SPSS 软件进行统计学分析, 采用 *t* 检验处理试验数据, 证明试验结果具有统计学意义。

根据试验结果绘制血 SpO₂ 与 HR 随呼吸暂停时间的变化规律曲线图, 已知血氧饱和度相比于 HR 随呼吸暂停时间变化曲线图更为敏感, 且没有特异性情况出现, HR 随呼吸暂停时间的变化趋势会出现特异性现象, 如先上升后下降, 或者 HR 随呼吸暂停时间没有出现明显的上升趋势。因为受试者在发生呼吸暂停时, 血液中的氧含量下降, 血氧分压降低刺激颈

动脉体和主动脉体化学感受器, 反射性引起交感神经兴奋, 交感神经对心脏产生正性肌力作用, 引起 HR 增快, 心输出量增多。体内氧含量通过心脏的快速跳动将氧气重新分布满足机体组织氧气的需求, 曲线图呈上升趋势, 之后一段时间体内氧气含量充足, HR 逐渐恢复之前的状态, 曲线图呈下降趋势, 当无法从其他地方摄取氧气时, 机体处于严重缺氧状态, 大脑对缺氧特别敏感, 导致中枢系统受到抑制, 引起 HR 减慢, 曲线图继续呈下降趋势。相比于 HR, SpO₂ 随呼吸暂停时间的变化更为规律, 所以选择血氧饱和度作为参考依据。

根据 SpO₂ 和 HR 随睡眠呼吸暂停时间的变化规律曲线为 SAS 患者的唤醒时刻提供理论参考依据, 为以后小型家用检测仪器的研发提供参考依据^[3]。

4 结论

试验结果表明, 随着呼吸暂停时间的增加, SpO₂ 随呼吸暂停时间的增加呈下降趋势, 而 HR 则随呼吸暂停时间的增加呈上升趋势; 与 HR 相比, SpO₂ 对呼吸暂停时长的变化更敏感, 因此, SpO₂ 可作为唤醒 SAS 患者的一项检测指标。根据统计分析结果, SpO₂ 首次代偿到达峰值的时间约为 11.2 s, 首次代偿结束时间约为 18.6 s; 之后, 尽管心脏依旧进行周期性代偿, 但是血氧饱和度再也不能到达正常水平, 心脏代偿效应会加重心脏负荷, 对心功能产生不利影响, 最终可能导致心力衰竭。因此, 可在心脏首次到达代偿峰值的时刻唤醒 SAS 患者, 最迟在心脏首次代偿结束时间之前唤醒患者, 这也是临床上选暂停时间 10 s 作为 SAS 患者的唤醒时长的原因。

参考文献:

- [1] LI Guo-yan, ZHANG Hua, CHEN Jian-li, *et al.* Analysis of risk factors and polysomnography in patients with sleep apnea hypopnea syndrome and arrhythmia[J]. *Journal of Clinical Pulmonary Medicine*, 2019, 24(6): 1014-1018.[李国燕, 张华, 陈建丽, 等. 睡眠呼吸暂停低通气综合征合并心律失常的危险因素分析[J]. *临床肺科杂志*, 2019, 24(6): 1014-1018.]
- [2] WANG Xin-kang, LIU Lei, WANG Liang-hong, *et al.* Screening best combination of features based on adaptive vector machine for detecting sleep apnea syndrome[J]. *Chinese Medical Herald*, 2019, 16(12): 165-168.[王新康, 刘磊, 王量弘, 等. 基于自适应向量机检测睡眠呼吸暂停综合征的最优特征组合筛选[J]. *中国医药导报*, 2019, 16(12): 165-168.]
- [3] HE Jin-chang, LI Yong-xiang, JIAO Shui-ping, *et al.* The value of simple oxygen saturation monitoring in the diagnosis of

- sleep apnea syndrome[J]. Journal of Clinical Internal Medicine, 2006, 23(3): 210-210.[何金昌,李永祥,焦水平,等.单纯血氧饱和度监测对睡眠呼吸暂停综合征的初筛诊断价值[J].临床内科杂志,2006,23(3):210-210.]
- [4] XU Shu-hua, ZHU Min. Application and research progress on home sleep apnea monitoring in diagnosis of obstructive sleep apnea[J]. Chinese Journal of Clinical Medicine, 2019, 26(3): 503-507.[徐淑桦,朱敏.家庭睡眠呼吸暂停监测在阻塞性睡眠呼吸暂停综合征中的应用与研究进展[J].中国临床医学,2019,26(3):503-507.]
- [5] DING Li, ZHANG Qiang. Advances in the relationship between obstructive sleep apnea syndrome and heart rate variability[J]. Chinese Journal of Geriatric Care, 2010, 8(6): 45-46.[丁莉,张蔷.阻塞性睡眠呼吸暂停综合征与心率变异性的相关性研究进展[J].中国老年保健医学,2010,8(6):45-46.]
- [6] ZHU Xuan-feng, GU Jian-hua, LIU Jian-nan, *et al.* Study on relationship between sleep apnea events and degree of oxygen desaturation index in the patients with sleep apnea syndrome[J]. Practical Geriatrics, 2016, 30(9): 756-758.[朱选凤,顾建华,刘剑南,等.睡眠呼吸暂停综合征患者睡眠呼吸事件与血氧饱和度下降程度的相关性分析[J].实用老年医学,2016,30(9):756-758.]
- [7] GAN Yong-jin, LI Qiong, ZHENG Jin-cun, *et al.* The measurement study of blood oxygen based on reflective method [J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2018, 37(2): 138-141, 158-158.[甘永进,李琼,郑金存,等.基于反射式检测方法的血氧测量研究[J].生物医学工程研究,2018,37(2):138-141,158-158.]
- [8] SHI Long-fei, ZHAO Ke, LI Ye, *et al.* The design of non-invasive measurement system for blood oxygen saturation based on AFE4400[J]. Journal of Integration Technology, 2015, 4(2): 75-85.[石龙飞,赵珂,李烨,等.基于 AFE4400 的无创血氧饱和度测量系统设计[J].集成技术,2015,4(2):75-85.]
- [9] ZHANG Hao. Research on the algorithm of oxygen saturation based on photoplethysmography[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.[张浩.基于光电容积脉搏波的血氧饱和度算法研究[D].南京:南京邮电大学,2018.]
- [10] BAO Lei. Research on a novel pulse oxygen saturation measurement system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.[包磊.新型脉搏血氧饱和度测量系统的研究[D].天津:天津大学,2014.]
- [11] LI Kai-yuan, WANG Wei-dong. A design of wireless blood oximetry finger-tip based on nRF905[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2007, 26(2): 204-207.[李开元,王卫东.基于 nRF905 的无线血氧指夹的设计[J].生物医学工程研究,2007,26(2):204-207.]
- [12] CHEN Zi-jin, HAN Yu-long, XU Xin, *et al.* Dynamic heart rate and blood oxygen monitor based on AFE4400[J]. China Science and Technology Information, 2018, (5): 62-63.[陈子晋,韩宇龙,许欣,等.基于 AFE4400 的动态心率和血氧监测仪[J].中国科技信息,2018,(5):62-63.]
- [13] Tianjin University. A method for detecting sleep apnea syndrome based on blood oxygen signal classification: CN201910313610X[P]. 2019-07-05.[天津大学.一种基于血氧信号分类的睡眠呼吸暂停综合征的检测方法:CN201910313610X[P].2019-07-05.]

(收稿日期:2019-12-14;修回日期:2020-02-25)