

颠倒睡眠状态调制心率变异性信号的功率谱和基本尺度熵分析*

刘大钊¹⁾ 王俊²⁾ 李锦^{1)†} 李瑜¹⁾ 徐文敏¹⁾ 赵筱¹⁾

1) (陕西师范大学, 物理学与信息技术学院, 西安 710062)

2) (南京邮电大学, 图像处理与图像通信江苏省重点实验室, 南京 210003)

(2014年5月4日收到; 2014年5月28日收到修改稿)

心率变异性 (HRV) 信号能够提供心脏活动状态的重要信息. 通过建立颠倒睡眠模型, 联合功率谱和基本尺度熵方法分析颠倒睡眠状态下 24 h 的 HRV 信号, 研究颠倒睡眠对自主神经相互作用以及 HRV 信号混沌强度的调制. 结果表明, 颠倒睡眠导致自主神经在昼夜间的活动节律发生颠倒, 基本尺度熵在昼夜的变化趋势也随之发生逆转, 因此 HRV 信号的混沌强度与自主神经的相互作用密切相关, 进一步研究两者之间的关系发现: HRV 信号的混沌强度与交感神经的调制强度正相关, 与迷走神经的调制强度负相关.

关键词: 颠倒睡眠, 基本尺度熵, 自主神经, 混沌强度

PACS: 87.85.-d, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.63.198703

1 引言

心脏是人体重要的生理系统之一, 对于这样一个结构、功能极其复杂的生理系统, 人们希望认识其生理活动的过程. 长久以来, 人们习惯于将这种复杂的研究对象进行简化和抽象, 建立理想的线性模型, 对其进行线性分析与处理, 实践证明: 要揭示一个本质是非线性的生理系统, 如果仅对其作线性分析和近似, 难以认识其生理活动与非线性相关的现象^[1-3]. 20多年来随着非线性理论和混沌理论的发展, 为描述和理解像心脏这样复杂的系统提供了全新的方法和手段^[4,5], 越来越多的非线性方法运用到了心率变异性信号 (heart rate variability, HRV) 分析中, 例如, Poincaré 散点图、转移熵以及时间不可逆性分析等^[6-10], 这些方法的成功应用, 极大的推动了 HRV 信号研究领域的发展.

由于心脏系统的搏动是在 24 h 昼夜节律的调控下进行, 许多研究者已经关注到这一问题, 研究

了昼夜 24 h 交替循环、睡眠清醒循环和日照时间变化等因素对 HRV 信号动力学特性的影响. Ivanov 等^[11] 揭示了人体昼夜 24 h 心脏动力学的变化与身体外在活动的动力学变化是不同的, 具有受内在因素控制的尺度特征. Sheward 等^[12] 通过测量心率、血压以及运动的信号进行研究, 对超交叉神经核的昼夜时钟对心血管功能的影响进行了估计, 并提出研究睡眠和清醒循环对心血管生理学的影响, 这将有助于解释由于心血管疾病而造成的睡眠紊乱问题.

截至目前, 研究者采用非线性动力学方法研究的 HRV 信号都是在测试者处于正常作息 (晚上睡眠、白天清醒) 情况下进行信号采集、分析和计算的. 但在现今许多特殊行业的工作者常处于颠倒睡眠状态 (晚上清醒、白天睡眠), 例如护士、保安、夜班出租车司机等. 随着社会的发展处于颠倒睡眠状态的人群不断增加, 颠倒睡眠成为全球一个日益严重的问题, 研究破坏睡眠可能带来的健康影响具有重

* 国家自然科学基金 (批准号: 61102094, 61271082)、国家教育部留学回国人员科研启动基金 (批准号: 第 43 批) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: GK201302009) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lijin1997@snmu.edu.cn

要的现实意义, Archer 等^[13]的研究结果表明: 如果破坏了基因表达的昼夜节律, 就会对人体的许多生物过程造成广泛破坏. 基于此研究现状, 本文通过切实可行的实验, 采集颠倒睡眠状态下人体的 24 h 的 HRV 信号, 采用功率谱和基本尺度熵方法研究颠倒睡眠状态下自主神经相互作用的规律, 以及 HRV 信号混沌强度的变化规律, 探索交感和迷走神经的相互作用与 HRV 信号混沌强度之间的依赖关系.

2 方 法

2.1 自回归 (AR) 模型

本文采用 Task Force 提出的自回归 (AR) 模型计算功率谱^[14], 首先对 HRV 时间序列进行插值, 所有数据序列均采用三次样条插值然后以 4 Hz 的频率重新采样以保证时间序列采样点的等距, 再消除每一序列的线性趋势以避免其对低频功率产生影响, 然后在时间域加海宁窗口减轻边沿效应的影响. AR 模型是一个系数按最小均方差原则估计出的模型, 是全极点模型, 其传递函数为

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}}. \quad (1)$$

随机序列 $x(n)$ 的 AR 模型为

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n), \quad (2)$$

式中 $u(n)$ 是一个均值为零, 方差为 δ^2 的白噪声序列, 模型输出序列 $x(n)$ 的功率谱为

$$s_{AR}(e^{j\omega}) = \frac{\delta^2 |H(e^{j\omega})|^2}{\left[1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k}\right]^2}. \quad (3)$$

选定模型阶数 p 和应用预测误差的平均功率最小原则确定 a_k 及 σ^2 就可求出功率谱, 本文取 AR 模型阶数为 16. 按生理意义 HRV 信号的功率谱可划分为以下四段: 0—0.003 Hz 为超低频段; 0.003—0.04 Hz 为极低频段; 0.04—0.15 Hz 为低频段; 0.15—0.4 Hz 为高频段.

2.2 基本尺度熵

对于数据长度为 N 的时间序列 $u: \{u(i) : 1 \leq i \leq N\}$, 若将这个时间序列嵌入一个 m 维空间, 对

于每一个 $u(i)$, 从时间序列中选取 m 个数据重构一个 m 维矢量:

$$X(i) = [u(i), u(i+L), \dots, u(i+(m-1)L)], \quad (4)$$

式中 m 和 L 分别为嵌入维数和延迟时间.

若选取 $L = 1$, 则 m 维矢量的个数为 $N - m + 1$ 个, 对于每一个 m 维矢量计算出基本尺度 Z_{BS} , Z_{BS} 定义为 m 维矢量中所有相邻点数据间隔 (或大小) 的差值方均根值, 即

$$Z_{BS}(i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} ((u(i+j) - u(i+j-1)))^2 / (m-1)}. \quad (5)$$

根据基本尺度, 选取划分符号的标准 $a \times Z_{BS}$, 然后把每一个 m 维矢量转换成 m 维矢量符号序列 $S_i(X(i)) = \{s(i), \dots, s(i+m-1)\}$, $s \in A (A = 0, 1, 2, 3)$. 转换方式如下:

$$S_i(X(i)) = \begin{cases} 0, & \bar{u} < u_{i+k} \leq \bar{u} + a \times Z_{BS}, \\ 1, & u_{i+k} > \bar{u} + a \times Z_{BS}, \\ 2, & \bar{u} - a \times Z_{BS} < u_{i+k} \leq \bar{u}, \\ 3, & u_{i+k} \leq \bar{u} - a \times Z_{BS}, \end{cases} \quad (6)$$

$k = 0, 1, \dots, m-1$. \bar{u} 代表第 i 个 m 维矢量 $X(i)$ 的平均值, Z_{BS} 代表第 i 个 m 维矢量 $X(i)$ 的基本尺度. 符号 0, 1, 2, 3 只是作为每一个划分区域的标记, 具体的大小没有实际意义, a 是一个特殊的参数, 在本文中, a 的取值是利用 Wessel 等的测试方法得到^[15]. 在重构的相空间中包含 0, 1, 2, 3 四种符号的 m 维矢量符号序列 $S_i(m\text{-words 组合})$ 共有 4^m 种不同的组合状态, 统计每一种不同的组合形式在整个 $N - M + 1$ 个 m 维矢量所占的概率为

$$p(\pi) = \frac{\#\{1 \leq i \leq N - M + 1, (u_i, \dots, u_{i+m-1})\}}{N - M + 1}. \quad (7)$$

基本尺度熵定义为

$$H(m) = -\sum p(\pi) \log_2 p(\pi), \quad (8)$$

式中 m 的取值可以从 3 到 7, N 的取值只要大于 4^m 即可, 对所有可能 π 的分布概率求信息熵 $H(m)$, 该信息熵描述了时间序列中 m 个连续值所包含的波动信息. 基本尺度熵代表了 $m\text{-words 组合模式}$ 出现的平均不规则程度, 大的熵值表示 $m\text{-words 组合模式}$ 越不规则, 可以用复杂性这个词表示这种不规则性. 熵值越大, 表示 m 维矢量的波动模式越不规则, 序列的复杂度越高, 即混沌强度越大, 反之亦

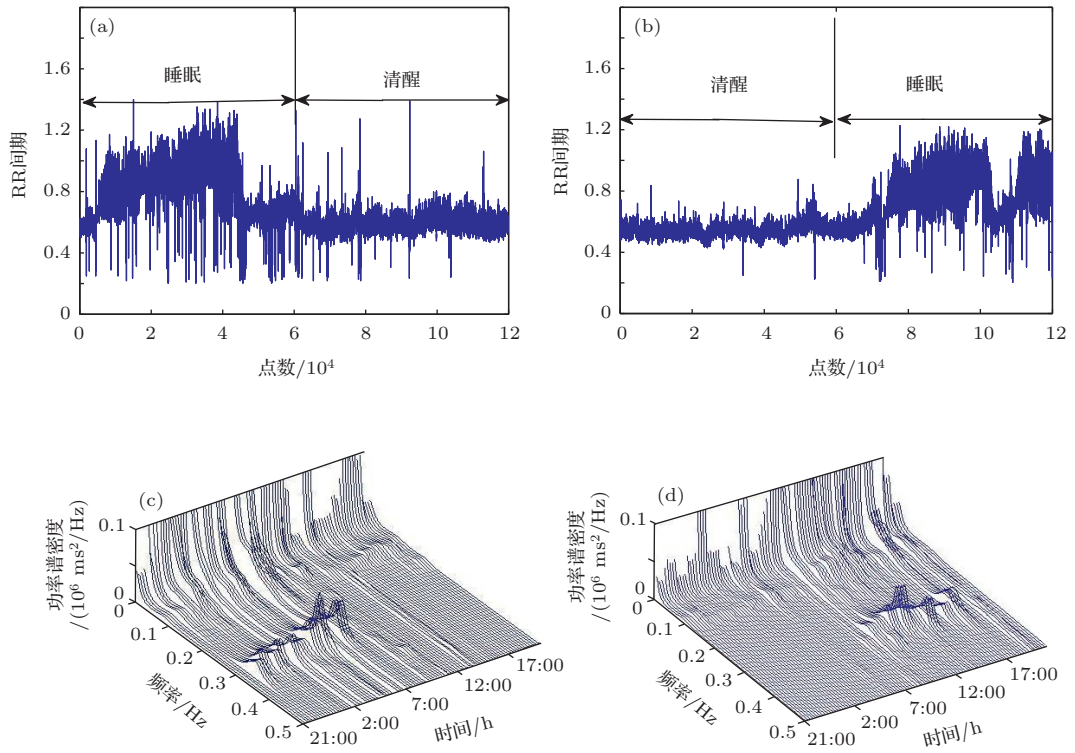


图2 正常作息和颠倒睡眠两种状态下的RR间期和功率谱分布 (a) 正常作息24 h RR间期; (b) 颠倒睡眠24 h RR间期; (c) 正常作息功率谱分布; (d) 颠倒睡眠功率谱分布

表1 正常作息和颠倒睡眠两种状态下昼夜间的HF和LF

功率谱/(10 ² ms ² /Hz)	正常作息		颠倒睡眠	
	夜间(睡眠)	白天(清醒)	夜间(清醒)	白天(睡眠)
高频功率(HF)	14.3	3.5	6.1	11.4
低频功率(LF)	23.1	7.1	4.7	13.6

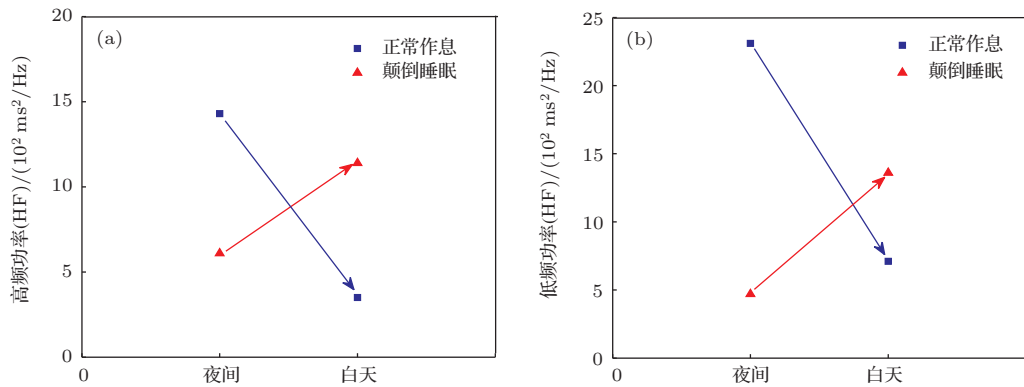


图3 正常作息和颠倒睡眠两种状态下HF和LF在昼夜间的变化 (a) HF; (b) LF

研究^[20]表明: HRV信号功率谱的高频段反映了迷走神经的调制强度, 而低频段被认为是受交感神经和迷走神经共同调控的. 由表1结果可知, 正常作息状态受试者夜间的HF较白天有大幅度增加, 表明夜间睡眠时迷走神经活动增强, 而抑制高

频成分的交感神经活动则相应减弱; 白天清醒时, 由于交感神经的调控占优势、迷走神经受抑制, 导致白天的HF较低, 正常作息状态下夜间的LF也高于白天; 而在颠倒睡眠状态下, 夜间的HF和LF均显著低于白天. 图3是正常作息和颠倒睡眠两种状

态下 HF 和 LF 在昼夜间的变化趋势, 表 1 和图 3 的结果表明, 颠倒睡眠状态下的 HF 和 LF 在昼夜间的变化规律均与正常作息状态下的变化规律相反, 这一结果表明, 由于睡眠颠倒使自主神经丧失了正常的昼夜节律, 自主神经昼夜间的活动节律发生了颠倒.

5 基本尺度熵分析结果

取 $m = 4$, $\alpha = 0.1$ 计算六组样本在正常作息和颠倒睡眠两种状态下每小时内 (4000 个数据点) 的基本尺度熵, 即每种状态包含了 24 个数据点, 经验证 m 取不同值 (如 m 取 2, 3, 5) 和 α 取不同的值 (如 α 取 0.2, 0.3, 0.4) 时的结果无显著差异. 取六组样本的平均值和标准差, 并将夜间和白天部分典型时间段的熵值在表 2 中列出.

表 2 正常作息和颠倒睡眠两种状态下部分时间段的熵值

时间	基本尺度熵	
	正常作息	颠倒睡眠
22:00—23:00	3.48±0.08	3.91±0.11
2:00—3:00	3.55±0.06	3.96±0.05
5:00—6:00	3.49±0.07	3.92±0.06
8:00—9:00	3.79±0.06	3.78±0.04
10:00—11:00	3.67±0.09	3.43±0.06
14:00—15:00	3.79±0.04	3.45±0.04
18:00—19:00	3.76±0.06	3.50±0.05

由表 2 可知, 正常作息状态下, 夜间睡眠时的熵值小于白天清醒时的熵值; 颠倒睡眠状态下, 夜间清醒时的熵值大于白天睡眠时的熵值, 而 8:00—9:00 间两种状态的熵值几乎相等, 恰好是睡眠和清醒转变的时间段. 图 4 为正常作息和颠倒睡眠两种状态下基本尺度熵 24 h 变化趋势, 表 2 和图 4 的结果表明, 夜间正常作息状态的熵值小于颠倒睡眠状态的熵值, 白天正常作息状态的熵值大于颠倒睡眠状态的熵值, 因此, 正常作息和颠倒睡眠两种状态下的基本尺度熵在昼夜间呈现出相反的变化趋势.

熵值的不同反映了 HRV 信号混沌强度的差异, 由于颠倒睡眠状态的受试者自主神经昼夜间的活动节律发生颠倒, 导致其熵值的变化趋势与正常昼夜节律下的变化趋势相反, 因此 HRV 信号的混沌强度与自主神经的相互作用密切相关. 为了研究自主神经的相互作用与 HRV 信号混沌强度的依赖关

系, 从每名受试者正常作息和颠倒睡眠两组 RR 间期中分别连续抽取长度为 4000 点的夜间和白天的数据, 分别计算其基本尺度熵和 HF, 取六组样本的平均值, 并在图 5 中给出了基本尺度熵随 HF 的变化规律.

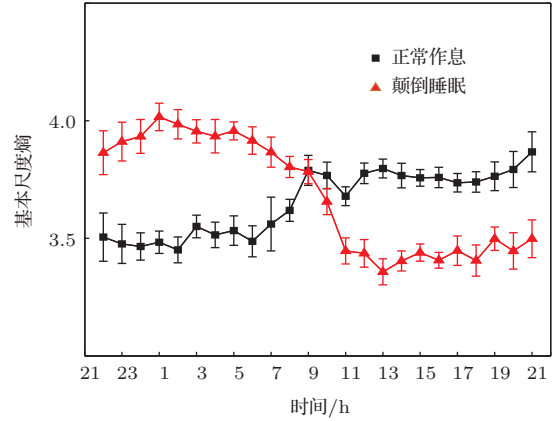


图 4 正常作息和颠倒睡眠两种状态下基本尺度熵 24 h 的变化规律

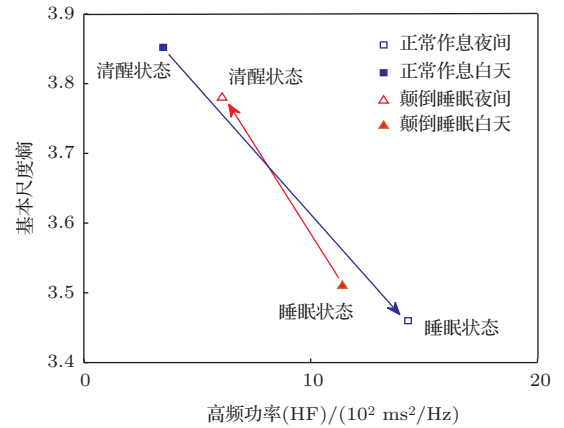


图 5 基本尺度熵随 HF 的变化规律

图 5 表明: 正常作息和颠倒睡眠两种状态下, 基本尺度熵随 HF 昼夜间的变化规律截然不同, 但是清醒和睡眠对应图标的位置却有相似之处. 睡眠时, 交感神经调控减弱、迷走神经调控加强, 导致 HF 较大而基本尺度熵较小, 所以数据中 m -words 组合减少, HRV 信号的混沌强度减小; 而在清醒时, 交感神经调控加强、迷走神经调控减弱, 使得 HF 较小而基本尺度熵较大, 所以数据中出现更多的 m -words 组合, HRV 信号的混沌强度增加. 从生理角度分析, 睡眠时, 迷走神经调控较强, 导致人体心搏减慢、消化腺分泌增加, 有助于身体存储能量、消除疲劳, 维持了人体休息时的生理需要 [21]; 而在清

醒时, 交感神经调控较强, 引起人体心搏加强和加速、疲乏的肌肉工作能力增加等反应, 保证人体紧张时的生理需要。

综上所述, HF 的不同可以反映 HRV 信号混沌强度的差异, 随着 HF 的增加, 基本尺度熵减小, HRV 信号的混沌强度也减小, 反之亦然, 两者具有相反的变化关系. 而 HF 的大小是由迷走神经的调制强度决定, 因此, HRV 信号的混沌强度与交感神经调制强度正相关, 而与迷走神经调制强度负相关。

6 结 论

Archer 等^[13]深入研究了睡眠与健康之间的关系, 他们通过研究基因表达的昼夜节律变化, 揭示了睡眠不足、时差失调等因素损害健康的机理. 本文通过建立颠倒睡眠模型, 采集颠倒睡眠状态下人体的 24 h HRV 信号, 联合功率谱和基本尺度熵方法研究了颠倒睡眠行为对自主神经以及 HRV 信号混沌特性的影响. 结果表明, 颠倒睡眠状态下自主神经的活动节律与正常作息状态下的活动节律相反, 自主神经调节机理的变化改变了 HRV 信号的混沌特性, 使正常作息和颠倒睡眠两种状态下, 基本尺度熵在昼夜间呈现出相反的变化趋势, 因此 HRV 信号的混沌强度与自主神经的相互作用密切相关. 进一步分析基本尺度熵和高频功率之间的关系, 得到高频功率和基本尺度熵具有相反的变化关系, HRV 信号的混沌强度与交感神经调制强度正相关, 而与迷走神经的调制强度负相关. 混沌是 HRV 信号的一个主要特征^[22], HRV 信号在交感和迷走神经的共同作用下产生了混沌, 本文定性给出了交感和迷走神经与 HRV 信号混沌强度的关系, 后续工作中, 我们将进一步研究颠倒睡眠行为对心脏健康的影响。

感谢王博、杨嘉伟同学在心电数据的采集上给予的帮助。

参考文献

- [1] Ning X B, Bian C H, Wang J, Chen Y 2006 *Chin. Sci. Bull.* **51** 764 (in Chinese) [宁新宝, 卞春华, 王俊, 陈颖 2006 科学通报 **51** 764]
- [2] Ivanov P C, Amaral L A N, Goldberger A L, Havlin S, Rosenblum M G, Struzik Z R, Stanley H E 1999 *Nature* **399** 461
- [3] Pool R 1989 *Science* **243** 604
- [4] Yang A C C, Hseu S S, Yien H W, Goldberger A L, Peng C K 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 108103
- [5] Costa M, Goldberger A L, Peng C K 2005 *Phys. Rev. E* **71** 021906
- [6] Huo C Y, Zhuang J J, Huang X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 190506 (in Chinese) [霍铖宇, 庄建军, 黄晓林 2012 物理学报 **61** 190506]
- [7] Wang J, Yu Z F 2012 *Chin. Phys. B* **21** 018702
- [8] Wu S, Li J, Zhang M L, Wang J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 238701 (in Chinese) [吴莎, 李锦, 张明丽, 王俊 2013 物理学报 **62** 238701]
- [9] Shen W, Wang J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 118702 (in Chinese) [沈韡, 王俊 2011 物理学报 **60** 118702]
- [10] Hou F Z, Huang X L, Zhuang J J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 220507 (in Chinese) [侯凤贞, 黄晓林, 庄建军 2012 物理学报 **61** 220507]
- [11] Ivanov P C, Hu K, Hilton M F, Shea S A, Stanley H E 2007 *PNAS* **104** 20702
- [12] Sheward W J, Naylor E, Knowles-Barley S, Armstrong J D, Brooker G A, Seckl J R, Brooker J A, Seckl J R, Turk F W, Homels M C, Zee P C, Harmar A J 2010 *PLoS One* **5** e9783
- [13] Archer S N, Laing E E, Möller-Levet C S, van der Veen D R, Bucca G, Lazar A S, Santhi N, Slak A, Kabiljo R, von Schantz M, Smith P C, Dijk D J 2014 *PNAS* **2014** 201316335
- [14] Task Force of the European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology 1996 *Circulation* **93** 1043
- [15] Wessel N, Ziehmman C, Kurths J, Meyerfeldt U, Schirdewan AVoss A 2000 *Phys. Rev. E* **61** 733
- [16] Li J, Ning X B 2006 *Phys. Rev. E* **73** 052902
- [17] Li J, Hu J, Zhang Y H, Zhang X F 2011 *Physica A* **390** 2381
- [18] Li J, Liu D Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 208701 (in Chinese) [李锦, 刘大钊 2012 物理学报 **61** 208701]
- [19] Liu T B, Yao W P, Ning X B, Ni H J, Wang J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 218704 (in Chinese) [刘铁兵, 姚文坡, 宁新宝, 倪黄晶, 王俊 2013 物理学报 **62** 218704]
- [20] Berntson G G, Bigger J T, Eckberg D L, Grossman P, Kaufmann P G, Malik M, Nagaraja H N, Porges S W, Saul J P, Stone P H, van der Molen M W 1997 *Psychophysiology* **34** 623
- [21] Yan B G, Zhao T T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078701 (in Chinese) [严碧歌, 赵婷婷 2011 物理学报 **60** 078701]
- [22] Poon C S, Merrill C K 1997 *Nature* **389** 492

Analysis on power spectrum and base-scale entropy for heart rate variability signals modulated by reversed sleep state*

Liu Da-Zhao¹⁾ Wang Jun²⁾ Li Jin^{1)†} Li Yu¹⁾ Xu Wen-Min¹⁾ Zhao Xiao¹⁾

1) (College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

2) (Image Processing and Image Communications Key Lab., Nanjing Univ. of Posts & Telecomm., Nanjing 210003, China)

(Received 4 May 2014; revised manuscript received 28 May 2014)

Abstract

Heart rate variability(HRV) signals can provide the important information about the active state of heart. To set up a reversed sleep model, then, we analyze the 24-hours HRV signals modulated by the reversed sleep state using the power spectrum and base-scale entropy method, and study the effect of the interaction of autonomic nerve system and the chaotic intensity of HRV signals in the case of reversed sleep. Results show that because of the reversed sleep state, the activity rhythm of autonomic nerve is contrary to that in normal state. The variational trend of base-scale entropy is corresponding to that reversed in day and night. This means that the chaotic intensity of HRV signals is closely related to the reaction of autonomic nerve system. In further researches, it is found that the chaotic intensity of HRV signals is in positive correlation with the modulation intensity of sympathetic nerve, but in negative correlation with the modulation intensity of vagus.

Keywords: reversed sleep, base-scale entropy, autonomic nerve, chaotic intensity

PACS: 87.85.-d, 05.45.-a

DOI: [10.7498/aps.63.198703](https://doi.org/10.7498/aps.63.198703)

* Project supported by the National Natural Foundation of China (Grant Nos.61102094, 61271082), the Scientific Research Starting Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education of China(Grant No. 43), and the Fundamental Research for the Central Universities, China (Grant No. GK201302009).

† Corresponding author. E-mail: lijin1997@snnu.edu.cn