

青年与老年昼夜心率信号多尺度化的基本尺度熵分析

赵婷婷¹, 段晓丽¹, 严碧歌²

1. 太原工业学院物理学系, 山西 太原 030008; 2. 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062

【摘要】目的:本研究采用多尺度化的基本尺度熵方法分析青年组与老年组, 白天和黑夜的心率变异性信号。**方法:**从PhysioBank数据库中, 分别提取出青年人和老年人的心率变异性信号, 利用多尺度化的基本尺度熵方法对数据进行比较分析。**结果:**通过计算心率变异性信号的熵值, 发现在白天清醒状态下的熵值比睡眠状态下的熵值高, 但是昼夜间变化相似; 老年组的多尺度化的基本尺度熵相对于青年组的熵值有所偏离, 但大致走势一样, 可见老年组的生理状态偏离了青年组的最佳生理状态。**结论:**通过熵值的分析, 揭示出清醒状态下, 心脏系统的自适应性和稳定性较睡眠状态要强; 青年与老年的熵值具有昼夜节律相关性; 多尺度化的基本尺度熵方法可以用于区别青年与老年, 白天与黑夜的心率变异性信号。

【关键词】多尺度化; 基本尺度熵; 心率变异性; 白天; 黑夜

【中图分类号】R318.04

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)01-0088-04

Multiscale base-scale entropy analysis of heart rate variability signals in the young and the elderly

ZHAO Tingting¹, DUAN Xiaoli¹, YAN Bige²

1. Department of Physics, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 2. School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract: Objective To apply multiscale base-scale entropy for analyzing the heart rate variability signals in the young and the elderly, during the day and night. **Methods** The heart rate variability signals of the young and the elderly were extracted from PhysioBank database and then analyzed with multiscale base-scale entropy analysis method. **Results** The entropy of heart rate variability signal was calculated. The entropy in waking state was higher than that in sleep state, but the changes of entropy were similar in daytime and nighttime. Although the trends of entropy in the elderly and the young were almost the same, the entropy in the elderly deviated from the entropy of the young, which indicated that the physiological status of the elderly had deviated from the best physiological status of the young. **Conclusion** The self-adaptability and stability of the heart system in waking state are better than those in sleep state. The entropy of the young and the elderly has correlations with circadian rhythm. Multiscale base-scale entropy is proved to be feasible in identifying the heart rate variability signals from the young and the elderly, and distinguishing daytime and nighttime heartbeats.

Keywords: multiscale; base-scale entropy; heart rate variability; daytime; nighttime

前言

心率变异性是指逐次心跳周期差异的变化情况, 因心率变异性信号含有大量关于生理系统、体液调节和心脑血管控制的信息, 已成为一种分析心脏调控功能的无创性手段^[1-2], 对某些疾病的早期发现和诊断很有价值, 其临床价值越来越受重视^[3]。物理

学中, 熵是表示分子状态混乱程度的物理量, 20世纪50年代美国信息论创始人 Shannon 提出信息熵, 并用熵的概念描述信息的不确定度, 研究人员利用熵的数学优点, 提取出时间序列中对研究有价值的信息^[4]。在心率波动性信号分析方面, 近似熵、样本熵, 基本尺度熵^[5-6]和多尺度熵^[7-8]等都有较成熟的应用, 然而对于近似熵来说, 非平稳数据和噪声干扰都会影响其得到有意义的结果。样本熵和多尺度熵都是在一个最小的尺度上估计序列长度为 m 和 $m+1$ 之间的不同, 而忽略了其他的尺度^[9-10]。基本尺度熵方法^[11-13]可以很好地捕捉到系统动力学复杂性的改变和周期窗口, 并且方法简单, 运算快速且抗干扰能力

【收稿日期】2018-10-30

【基金项目】国家自然科学基金(11647034); 太原工业学院2016年大学生创新创业训练项目(20160509)

【作者简介】赵婷婷, 硕士, 讲师, 研究方向: 信号分析与处理, E-mail: 1017360413@qq.com

强, 本研究利用多尺度化的基本尺度熵方法对青年人和老年人的心率变异性信号进行分析。

1 多尺度化的基本尺度熵

本研究分析心率变异性信号的方法为多尺度化的基本尺度熵, 具体计算方法如下。

首先, 对数据长度为 N 的时间序列 $x: \{x(i): 1 \leq i \leq N\}$, 进行粗粒化^[14]:

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=j-1}^{j+\tau-1} x_i \quad (1 \leq j \leq N/\tau) \quad (1)$$

然后, 将粗粒化的时间序列嵌入 m 维相空间。重新构建出来一个新的 m 维矢量:

$$Y(i) = [y(i), y(i+L), \dots, y(i+(m-1)L)] \quad (2)$$

其中, m 是嵌入维数, L 是延迟时间。若延迟时间 L 取 1, 则共有 $(N-m+1)$ 个 m 维矢量。对于每一个 m 维矢量, 根据定义, 可以计算出基本尺度 BS:

$$BS(i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m-1} [y(i+j) - y(i+j-1)]^2}{m-1}} \quad (3)$$

选择符号划分标准为 $\alpha \times BS$, 这样就可以把每一个 m 维矢量转换成 m 维矢量符号序列 $S_i(Y(i)) = \{s(i), s(i+1), \dots, s(i+m-1)\}$, $s \in A (A = 0, 1, 2, 3)$ 。

具体的转换如下:

$$S_i(Y(i)) = \begin{cases} 0: \bar{y} < y_{i+k} \leq \bar{y} + \alpha \times BS \\ 1: y_{i+k} > \bar{y} + \alpha \times BS \\ 2: \bar{y} - \alpha \times BS < y_{i+k} \leq \bar{y} \\ 3: y_{i+k} \leq \bar{y} - \alpha \times BS \end{cases} \quad (4)$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, N-m+1, k = 0, 1, 2, \dots, m-1$; 符号 0、1、2、3 仅仅作为每一个划分区域的记号, 具体数值的大小并没有实际的意义; \bar{y} 代表第 i 个 m 维矢量的平均值; BS 代表第 i 个 m 维矢量的基本尺度; α 是一个特殊参数, 取值是利用文献^[15-16]的结果得到。

我们需要统计 m 维矢量符号序列 S_i 的分布几率 $P(S_i)$, 计算多尺度化的基本尺度熵值。其中, m 维矢量符号序列 S_i (m -words) 共有 4^m 种不同的组合形式 π 。统计矢量符号序列 S_i 每一种组合形式所占的几率:

$$p(\pi) = \frac{\#\{t | 1 \leq t \leq N-m+1, (y_t, \dots, y_{t+m-1}) \text{ has form } \pi\}}{N-m+1} \quad (5)$$

其中, #表示个数。

m 维矢量的多尺度化的基本尺度熵定义为:

$$H(m) = -\sum P(\pi) \log_2 P(\pi) \quad (6)$$

为了计算方便, m 的取值可以从 3~7, N 的取值一般大于 4^m 即可。

2 应用基本尺度熵方法分析青年与老年昼夜心率变异性信号

在生命活动中, 觉醒过程和睡眠过程是不可缺少的两个过程。通过对这两个过程的研究, 可以发现某些疾病的致病基因, 对人体生理机制的认识有重要的意义。因而, 研究人员开始重视白天和黑夜的心率变异性序列^[17]。本研究主要针对青年人和老年人心跳波动情况。为了进一步研究青年人与老年人的心率变异性信号, 本研究从 PhysioBank 数据库中, 分别提取出健康的 8 个青年人和健康的 8 个老年人的心率变异性信号进行研究。

图 1a 反映了青年的心跳波动情况, 可以看到在夜间有较高的平均 RR 间期值; 图 1b 反映了老年的心跳波动情况, 可以看到白天有较低的平均 RR 间期值。两个对比组的白天平均 RR 间期值较夜晚的都有大幅度降低。反应迷走神经活动在夜间大幅度增加, 交感神经活动相应减少^[18-19]。

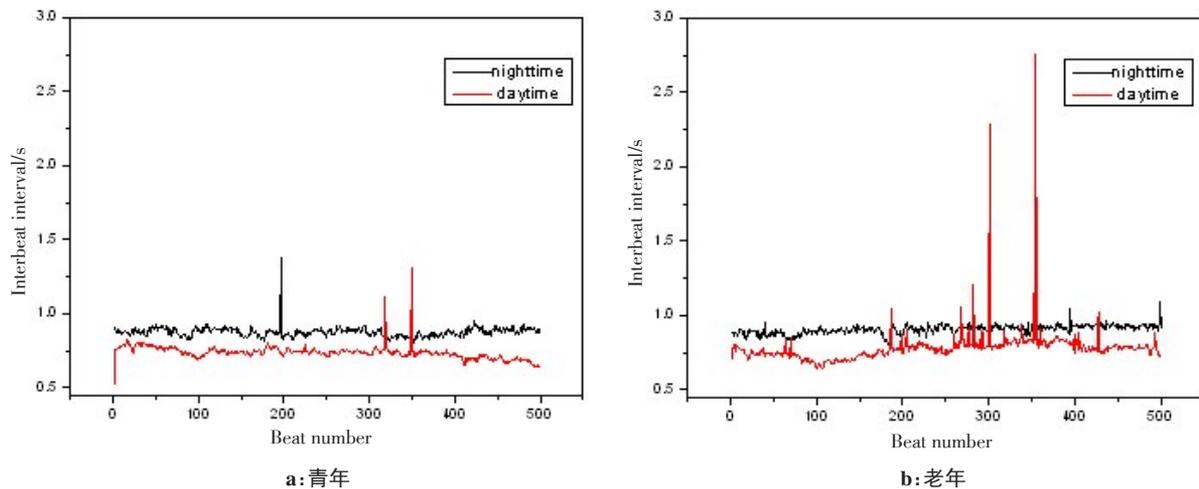
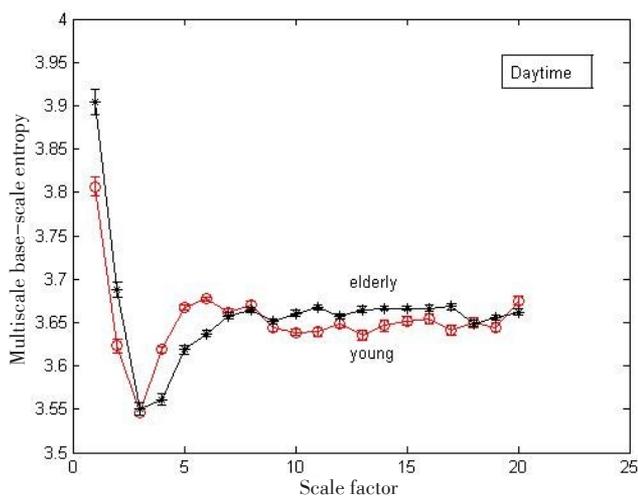


图 1 青年和老年在昼夜状态下的 RR 间期

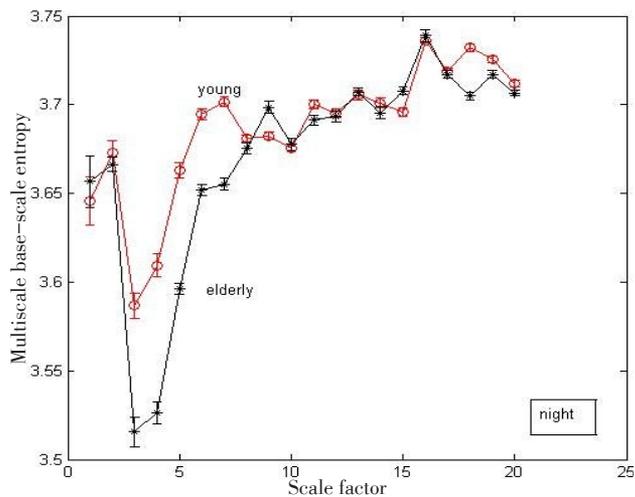
Fig.1 RR intervals of the young and the elderly in daytime and nighttime

为了进一步研究青年人与老年人的心率变异性信号,选取 $m=4$ 、 $\alpha=0.2$ 来计算基本尺度的熵值,结果如图2所示。从图2a可以看出,在白天清醒状态下,小时间尺度 $\tau=1$ 和2时,青年的熵值较老年人的熵值低;随着尺度的增加($3 \leq \tau \leq 8$),青年的熵值较老年人的熵值高;在 $\tau \geq 9$ 时,两组样本进入平台区,青年的熵值较老年人的熵值低,这与尺度 $\tau=1$ 时情况相同;当 $\tau=20$ 时,青

年的熵值较老年人的熵值高。从图2b中可以看出,在夜晚睡眠状态下,当 $\tau=1$ 时,青年的熵值较老年人的熵值低;在 $2 \leq \tau \leq 7$ 时,青年的熵值较老年人的熵值高;在 $8 \leq \tau \leq 20$ 时,青年的熵值与老年人的熵值相互交错即在夜间睡眠状态下,两个对比组的熵值没有明显差别。青年组与老年组的多尺度化的基本尺度熵曲线趋势基本一致。



a: 白天清醒状态下 MBE



b: 夜晚睡眠状态下 MBE

图2 清醒与睡眠状态下心率变异性信号的多尺度化的基本尺度熵(MBE)

Fig.2 Multiscale base-scale entropy of heart rate variability signals

在时间尺度 $\tau=1$ 的情况下,基本尺度熵可以完全区别4种状态:青年白天、青年夜晚、老年白天和老年夜晚。虽然两组样本在白天和黑夜的熵值不同,但是昼夜间变化相似,即白天清醒状态下的熵值要比睡眠状态下的熵值高。这些结果揭示了青年与老年人的熵值具有昼夜节律相关性。白天清醒状态下,由于交感神经系统调节的增强,使得熵值比睡眠状态下的高。无论白天还是晚上,在时间尺度 $\tau=3$ 时,青年组与老年组均处于波谷状态,熵值均为最小,说明在这个时间尺度下,心率变异性信号可能具有更多的非健康信息,同时暗示心脏系统的复杂性降低。青年组的多尺度化的基本尺度熵值代表了最佳生理状态,老年组的多尺度化的基本尺度熵相对于青年组的熵值有所偏离,但大致走势一样,可见老年组的生理状态偏离了青年组的最佳生理状态,说明心脏的某些功能会因为年龄老化而出现退耦的情况。

图3a为青年组的白天-黑夜多尺度化的基本尺度熵,图3b为老年组的白天-黑夜多尺度化的基本尺度熵。由图可以得出:在尺度 $\tau=1$ 时,不论青年组还是老年组,清醒状态下熵值比睡眠状态下的熵值要大,对于大尺度的 $\tau \geq 6$,清醒状态下的熵值比睡眠状态下的熵值要小,

与尺度 $\tau=1$ 时的情况完全相反,表明清醒状态下的数据比睡眠状态下的数据表现出更高的规律性。在睡眠状态下,心脏系统的自适应性和稳定性较清醒状态弱。在夜间睡眠状态时,由于迷走神经的调控增强,交感神经的调控减少,所以青年组和老年组的多尺度化的基本尺度熵值都比白天清醒状态下产生上升趋势。

3 结论

通过对青年组和老年组白天黑夜的心率变异性信号的研究发现两组样本在白天和黑夜的熵值不同,但是昼夜间变化相似,即白天清醒状态下的熵值要比睡眠状态的熵值高,揭示青年与老年人的熵值具有昼夜节律相关性。在尺度 $\tau=1$ 时,两个对比组白天的熵值都比夜晚熵值大,对于大尺度 $\tau \geq 6$,则白天熵值要比黑夜熵值小,说明白天数据表现出更高的规律性。白天清醒状态下,由于交感神经系统调节增强,迷走神经调节减弱,使得两对比组多尺度化的基本尺度熵值比夜晚状态高,表明在睡眠状态下,心脏系统的自适应性和稳定性较清醒状态弱。多尺度化的基本尺度熵可用于区分青年和老年昼夜的心率变异性信号,并可应用到其他病例信号的研究中,对科学研究有重要的现实意义。

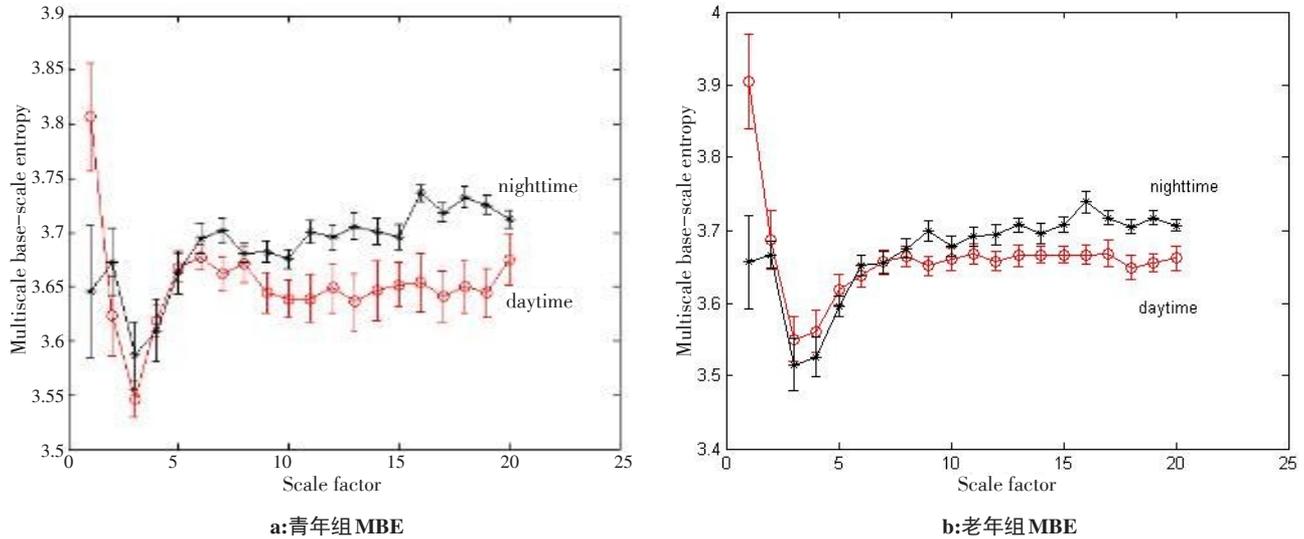


图3 不同小组心率变异性信号的MBE

Fig.3 Multiscale base-scale entropy of heart rate variability signals in different groups

【参考文献】

- [1] 徐文敏. 应用基本尺度熵分析心率变异性[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014: 5-20.
XU W M. The base-scale entropy analysis of heart rate variability[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014: 5-20.
- [2] 彭娟, 白雪. 心率变异性与脑卒中的相关性研究进展[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2017, 15(1): 47-50.
PENG J, BAI X. Research progress on correlation between heart rate variability and stroke[J]. Chinese Journal of Integrative Medicine on Cardio/Cerebrovascular Disease, 2017, 15(1): 47-50.
- [3] GRITTI I, DEFENDI D, MAURI C, et al. Heart rate variability, standard of measurement, physiological interpretation and clinical use in mountain marathon runners during sleep and after acclimatization at 3480 m[J]. J Behav Brain Sci, 2013, 3(1): 26-48.
- [4] 王俊, 马千里, 宁新宝. 心电图的基本尺度熵分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2008, 44(4): 357-360.
WANG J, MA Q L, NING X B. The base scale entropy analysis of electrocardiogram [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2008, 44(4): 357-360.
- [5] 马千里, 卞春华, 王俊. 脑电信号的标度分析及其在睡眠状态区分中的应用[J]. 物理学报, 2010, 59(7): 4480-4484.
MA Q L, BIAN C H, WANG J. Scaling analysis on electroencephalogram and its application to sleep-staging[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 4480-4484.
- [6] LI J, NING X B. Dynamical complexity detection in short-term physiological series using base-scale entropy[J]. Phys Rev E, 2006, 73(1): 052902.
- [7] 杜飞, 王世通, 戴加飞, 等. 少年与中年脑电信号的多尺度符号序列熵分析[J]. 北京生物医学工程, 2016, 35(6): 599-603.
DU F, WANG S T, DAI J F, et al. Multiscale sign series entropy analysis based on the young and middle-aged electroencephalogram[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2016, 35(6): 599-603.
- [8] 宁新宝, 卞春华, 王俊, 等. 心脏电活动过程的非线性分析[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 764-771.
NING X B, BIAN C H, WANG J, et al. Nonlinear analysis of electrical activity of the heart[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(7): 764-771.
- [9] BIAN C H, NING X B. Evaluating age-related loss of nonlinearity degree in short-term heartbeat series by optimum modeling dimension [J]. Physica A, 2004, 337(1/2): 149-156.
- [10] LI J, NING X B. The base-scale entropy analysis of short-term heart rate variability signal[J]. Chinese Sci Bull, 2005, 50(12): 1269-1273.
- [11] 黄晓林, 崔胜忠, 宁新宝, 等. 心率变异性基本尺度熵的多尺度化研究[J]. 物理学报, 2009, 58(12): 8160-8165.
HUANG X L, CUI S Z, NING X B, et al. Multiscale base-scale entropy analysis of heart rate variability [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(12): 8160-8165.
- [12] 严碧歌, 赵婷婷. 应用多尺度化的基本尺度熵分析心率变异性[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 829-833.
YAN B G, ZHAO T T. Multiscale base-scale entropy analysis of heart rate variability signal[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 829-833.
- [13] 杨希, 宁新宝, 何爱军, 等. 基于尺度熵方法用于短时心率变异性分析的临床应用研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2008, 44(4): 361-370.
YANG X, NING X B, HE A J, et al. Clinical application and research based on the analysis of short-term physiological series with base scale entropy[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2008, 44(4): 361-370.
- [14] 杨小冬, 宁新宝, 何爱军, 等. 基于多尺度的人体ECG信号质量指数谱分析[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1514-1521.
YANG X D, NING X B, HE A J, et al. Mass exponent spectrum analysis of human ECG signals based on multiple scale factors[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1514-1521.
- [15] 张璇, 李锦, 徐文敏. 昼夜节律颠倒影响心率变异性信号的非线性特性研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 48-53.
ZHANG X, LI J, XU W M. The nonlinear features study of heart rate variability signals affect by reversed circadian rhythms[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 48-53.
- [16] 司峻峰, 黄晓林, 周玲玲, 等. 心率变异性的异方差特征研究[J]. 物理学报, 2014, 63(4): 040501-040504.
SI J F, HUANG X L, ZHOU L L, et al. Conditional fluctuation characteristics of heart rate variability[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(4): 040501-040504.
- [17] SHI W J. Collective behavior of coupled map lattices with different scales of local coupling[J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(34): 3723-3730.
- [18] ECKBERG D L. The human respiratory gate[J]. J Physiol, 2003, 548: 339.
- [19] 李锦, 刘大钊. 昼夜节律下心率变异性信号的熵信息和谱特征[J]. 物理学报, 2012, 61(20): 547-552.
LI J, LIU D Z. Changes of entropy and power spectrum in circadian rhythm for heart rate variability signals[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(20): 547-552.

(编辑: 谭斯允)