

交变磁场暴露对大鼠心电信号多尺度熵的影响

龙哲¹, 王旭², 杨丹^{2,3}

(1. 东北大学 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
3. 东北大学 智能工业数据解析与优化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为研究电磁场对生物体心电信号复杂度的影响, 在 20 mT, 50 Hz 交变电磁场环境中暴露大鼠, 连续暴露 7 d, 采集大鼠磁场暴露前、磁场暴露 10、20 和 30 min 心电信号(ECG), 利用经验模态分解(EMD)重构信号, 计算各信号多尺度熵(MSEn). 实验结果表明, 20 mT, 50 Hz 交变磁场对大鼠心电信号多尺度熵的影响具有时间效应, 通过心脏的自我调控可以降低交变磁场对大鼠心脏的影响.

关 键 词: 大鼠心电信号; 磁场暴露; 经验模态分析方法; 多尺度熵; 交变磁场

中图分类号: Q 64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)06-0766-05

Effect of Alternating Magnetic Field Exposure on MSEn of Rat ECG

LONG Zhe¹, WANG Xu², YANG Dan^{2,3}

(1. Sino-Dutch Biomedical and Information Engineering School, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Key Laboratory of Data Analytics and Optimization for Smart Industry, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YANG Dan, E-mail: yangdan@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to research the effect of electromagnetic field on the complexity of ECG in organisms, the rats were exposed to 20 mT, 50 Hz alternating electromagnetic field environment for seven consecutive days. The ECGs of rats which were exposed to the magnetic field for 0, 10, 20 and 30 minutes, were collected. The signals were reconstructed using empirical mode decomposition(EMD), and then the multiscale entropy (MSEn) of each signal was calculated. The results showed that the 20 mT, 50 Hz alternating magnetic field has a time effect on the multiscale entropy of rat's ECG, based on which the effect on the rats can be reduced by cardiac self-regulation.

Key words: ECG of rats; magnetic expose; EMD; MSEn; alternating electromagnetic field

随着科技发展,人们的生活环境中电磁场分布日益复杂,电磁场对生命健康的影响越来越受到关注.研究表明生物体的心脏电生理特性在电磁场中可能变化^[1-2]. Choi 等调查发现高架电力线附近学校学生在极低频电磁场暴露 24 h 后,学生心电图有显著变化^[3]. Elmas 认为 50 ~ 60 Hz 电磁场对心脏并没有产生明显影响^[4]. Baldi 等应用脉冲电磁场暴露实验改变人体心电信号的心率变异性,对心电信号的 R-R 间期求傅里叶变换的功率谱密度(PSD),其变化发生在从磁场暴露

到非暴露的转换时间^[5]. Tenforde 等用强度为 1.5 T 的均匀静止恒磁场急性暴露恒河猴,导致其心电图 T 波上升.他们还用 2 T 同样磁场暴露鼠,也得到相同结论^[6]. 刘春玲等应用脉冲磁场暴露活体兔,可以使活体兔心率变慢,但是磁场暴露前后并没有永久性的变化^[7]. Kerimoglu 等用 900 MHz 电磁场对出生 21 d 雄性大鼠每天暴露 1 h,连续暴露 40 d,引起大鼠心脏结构改变^[8]. Saili 等用 2.45 GHz WIFI 急性暴露成年雄兔 1 h,导致 PR 和 QT 间隔的增加,并未能改变最大振幅

和P波^[9]. 上述研究多从生理实验和实际测量入手, 而对于结合信号分析方法的研究尚未深入开展.

本课题组探讨了 20 mT, 50 Hz 交变电磁场对大鼠心电信号时域波形影响. 生物体心电信号的复杂度能有效反映其对外界环境的适应能力及生物体的健康状况^[10]. 本文探讨磁场暴露大鼠心脏中心电信号复杂度的变化. 结合多尺度熵的信号分析方法, 开展大鼠动物实验, 采集不同时长交变磁场暴露以及累计暴露的大鼠心电信号, 计算信号的多尺度熵. 实验结果表明, 20 mT, 50 Hz 交变电磁场对生物体的心电信号复杂度产生影响, 且具有时间效应.

1 多尺度熵的信号分析原理

1.1 EMD 分解

大鼠心电信号是非平稳强噪声的随机信号, 在分析之前需要对信号进行去噪处理. 本文采用 EMD 分解重构方法对大鼠心电信号去噪处理.

EMD 分解是将一个时间序列分解成有限个 IMF 分量和一个趋势项. IMF 分量必须满足以下两个约束条件:

①极值点的数目与过零点的数目必须相等或者最多差一个;

②由局部极大值构成的上包络线和由局部极小值构成的下包络线的平均值为零.

EMD 分解步骤如下:

设原始时间序列为 $f(n)$, 找出 $f(n)$ 所有局部极大值和局部极小值, 采用三次样条函数分别拟合局部极大值和局部极小值, 得出 $f(n)$ 的上包络线和下包络线. 计算上、下包络线平均值记为 $m_1(n)$, 根据式(1)得出原始时间序列与均值的差:

$$h(n) = f(n) - m_1(n). \quad (1)$$

判断 $h(n)$ 是否满足 IMF 分量的约束条件, 如果不满足将 $h(n)$ 作为新的时间序列, 重复上述运算过程, 直到筛选出满足 IMF 约束条件, 并且前后两次运算结果标准差 STD 小于设定值(一般设为 0.2~0.3 之间)时, 将 $h(n)$ 记为 $C_1(n)$ 作为第 1 层 IMF 分量 IMF1:

$$C_1(n) = h(n) - m_i(n). \quad (2)$$

将 $C_1(n)$ 从原序列中分离出去, 得到残余时间序列 $r_1(n)$:

$$r_1(n) = f(n) - C_1(n). \quad (3)$$

将 $r_1(n)$ 作为新的时间序列, 重复上述筛选

过程, 依次求得 IMF2, IMF3, ..., 直到残余时间序列满足设定的终止条件或者为一个单调函数时 EMD 分解结束, 得到:

$$f(n) = \sum_{i=1}^m C_i(n) + r_m(n). \quad (4)$$

大鼠心电原始信号非常微弱, 采集过程中有硬件滤波, 但还会有噪声混杂于信号之中. 信号经过 EMD 分解后, 每个固有模态函数 IMF 分量所包含的原始信号与噪声比例不同, 因此选取原始信号高比例的 IMF 分量重构信号. 本文定义 IMF 分量变换域相关函数:

$$\rho_{f, C_i} = \frac{E[(f(n) - \mu_f)(C_i(n) - \mu_{C_i})]}{\sigma_f \sigma_{C_i}}. \quad (5)$$

式中: $f(n)$ 为原始信号; $C_i(n)$ 为各 IMF 分量; μ_f 和 σ_f 为原始信号均值和标准差; μ_{C_i} 和 σ_{C_i} 为所对应 IMF 分量均值和标准差.

相关函数 ρ_{f, C_i} 是表达各 IMF 分量与原始信号关系的函数, 在 $[0, 1]$ 之间取值. IMF 分量包含原始信号越多, ρ_{f, C_i} 取值越趋近于 1; IMF 分量包含原始信号越少, ρ_{f, C_i} 取值越趋近于 0. 设定 ρ_{f, C_i} 阈值, 选取 ρ_{f, C_i} 高于阈值的 IMF 分量重构信号.

1.2 多尺度熵

心电信号经过 EMD 分解重构得到一维时间序列 $\{f_1, \dots, f_i, \dots, f_N\}$. 首先, 对其构建连续的粗粒化时间序列 $\{y^{(\tau)}\}$, τ 为尺度因子.

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} f_i, \quad 1 \leq j \leq N/\tau. \quad (6)$$

对于尺度 1, $y_j^{(1)}$ 就是原始时间序列. 每个经粗粒化时间序列的长度 $L = N/\tau$. 然后, 对每个粗粒化后的数据样本计算样本熵 SE, 步骤如下:

在尺度 τ 下, 从数据样本中取 m 个连续的元素组成向量:

$$\mathbf{Y}_m^{(\tau)}(i) = [y^{(\tau)}(i), y^{(\tau)}(i+1), \dots, y^{(\tau)}(i+m-1)]. \quad (7)$$

定义 $d_{i,j}^{(\tau)}$ 为向量 $\mathbf{Y}_m^{(\tau)}(i)$ 和 $\mathbf{Y}_m^{(\tau)}(j)$ 的距离:

$$d_{i,j}^{(\tau)} = \max(|y^{(\tau)}(i+k) - y^{(\tau)}(j+k)|). \quad (8)$$

其中: $k=0 \sim m-1$; $i, j=1 \sim N-m+1$.

设定阈值 r , 对于每个 $i \in [1, N-m]$ 统计 $d_{i,j}^{(\tau)} < r$ 的数量与距离总数 $N-m$ 的比值, 记为 $C_r^{(\tau)m}$:

$$C_r^{(\tau)m}(r) = \frac{[d_{i,j}^{(\tau)} < r] \text{ 的数量}}{N-m}. \quad (9)$$

$C_r^{(\tau)m}$ 的平均值 $C^{(\tau)m}$:

$$C^{(\tau)m}(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m+1} C_r^{(\tau)m}(r)}{N-m+1}. \quad (10)$$

增加样本个数为 $m+1$, 重复上述步骤, 计算

$C_r^{(\tau)m+1}$ 和 $C^{(\tau)m}$. 长度为 L 的时间序列, 在尺度 τ 下的样本熵 SE:

$$SE(m,r,N)=-\ln\frac{C^{(\tau)m+1}(r)}{C^{(\tau)m}(r)}.$$

(11)

多个尺度样本熵的合集定义为多尺度样本熵 MSE:

$$MSE=\{\tau\mid SE(m,r,N)=-\ln C^{(\tau)m+1}(r)/C^{(\tau)m}(r)\}.$$

(12)

2 实验及结果分析

2.1 动物实验与预处理

本实验选取 20 只成年健康 Wistar 大鼠, 雄性, 体重在 180 ~ 220 g 之间. 由中国医科大学实验动物中心提供. 自制磁场发生器和心电信号采集模块, 导联方式采用标准肢体导联. 为消除时间节律对大鼠生理上的影响, 选取每天同一时间段采集大鼠心电信号, 在 20 mT, 50 Hz 交变磁场中曝露, 采样频率设置为 1 kHz, 采样时间为 5 min, 实际采集电路如图 1 所示.



图 1 心电信号实际采集电路
Fig. 1 Actual acquisition circuit of ECG

首先, 对所采集大鼠心电信号数据进行 EMD 分解, 并对各个 IMF 分量作频谱如图 2 所示. 根据式(5)计算各个 IMF 分量相关系数 ρ_{f,C_i} , 选取 ρ_{f,C_i} 大于设定阈值的 IMF 分量重构信号, 原始信号频谱与重构信号频谱如图 3 所示. 重构信号滤除由呼吸引起的基线漂移和低频肌电干扰.

2.2 多尺度熵的结果分析

以尺度因子 τ 为 20, 对每组数据进行粗粒化, 阈值 r 设定为 0.15, 维度 m 设定为 2, 计算 1 ~ 20 尺度下的样本熵. 图 4a 为经磁场曝露前、曝露

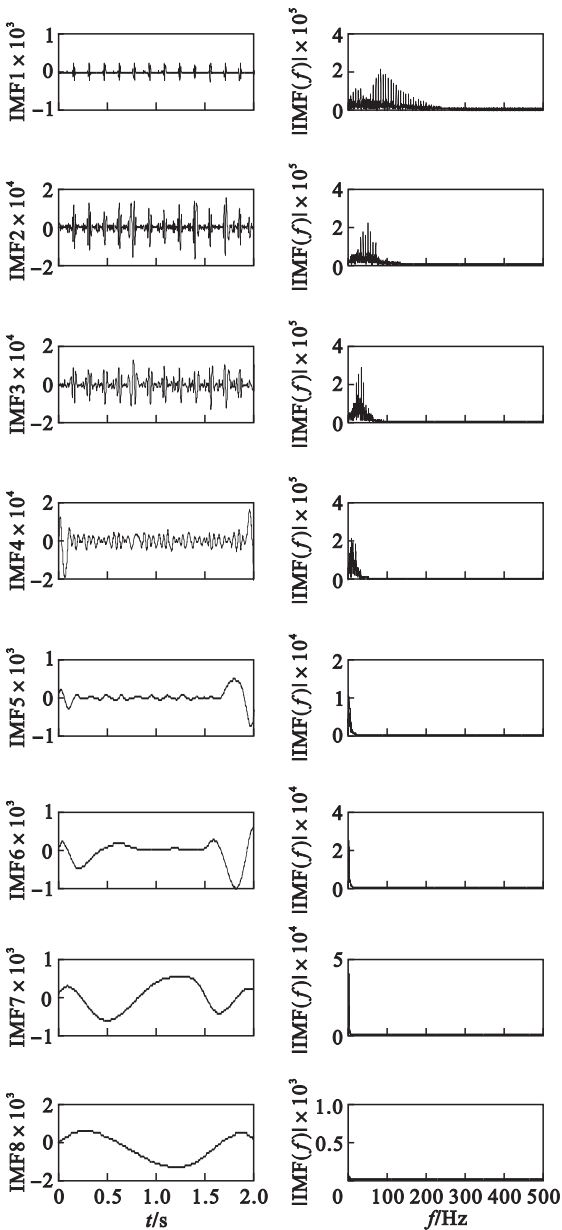


图 2 原始信号经 EMD 分解各个 IMF 分量及频谱
Fig. 2 Original signal decomposed by EMD for each IMF and spectrum

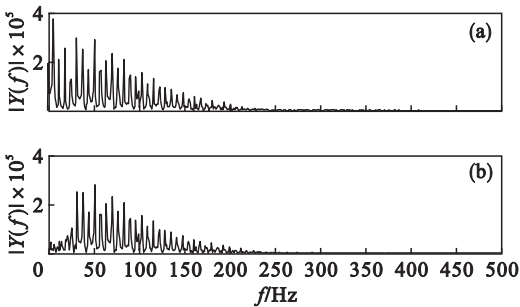


图 3 原始信号频谱与重构信号频谱
Fig. 3 Original signal spectrum and reconstructed signal spectrum
(a)—原始信号; (b)—重构信号.

10, 20 及 30 min, 20 只大鼠心电信号在 1 ~ 20 尺度下的平均 MSEn. 从图中可以看出未经磁场曝

露的正常信号 $MSEn$ 在各个尺度下均为最大, 在小尺度下增加, 超过尺度 12 以后增加速率下降, 趋于稳定. 磁场暴露 10 min 信号 $MSEn$ 在各个尺度下均减小, 时间尺度越高, 与正常信号 $MSEn$ 差越大. 磁场暴露 20 min 信号 $MSEn$ 比暴露 10 min 信号 $MSEn$ 在各个尺度下均增大, 但仍比正常信号 $MSEn$ 小, 时间尺度越高, 差异越明显. 磁场暴露 30 min 信号 $MSEn$ 与磁场暴露 20 min 信号 $MSEn$ 没有明显变化. 健康人群的 心脏动力学结构复杂, 心电信号复杂度高, 心电信号 $MSEn$ 高; 心脏疾病患者心电信号复杂度降低, $MSEn$ 减小, 在高尺度下差异明显. 与人的心脏结构类似, 正常大鼠的心脏动力学结构复杂, 心电信号复杂度高, 所以正常大鼠心电信号 $MSEn$ 高. 磁场暴露使心电信号的复杂度降低, 信号 $MSEn$ 减小. 随着暴露时间的增加, 心电信号 $MSEn$ 不再减小, 反而增大, 说明磁场暴露时间与心电信号 $MSEn$ 是非线性关系, 磁场暴露对大鼠心电信号复杂度的影响有限, 大鼠心脏通过自身的调控可以适应外界磁场暴露对其影响, 使心电信号的复杂度升高, 但未能恢复到暴露前水平, 大鼠心脏短时间内对磁场暴露的调控能力有限.

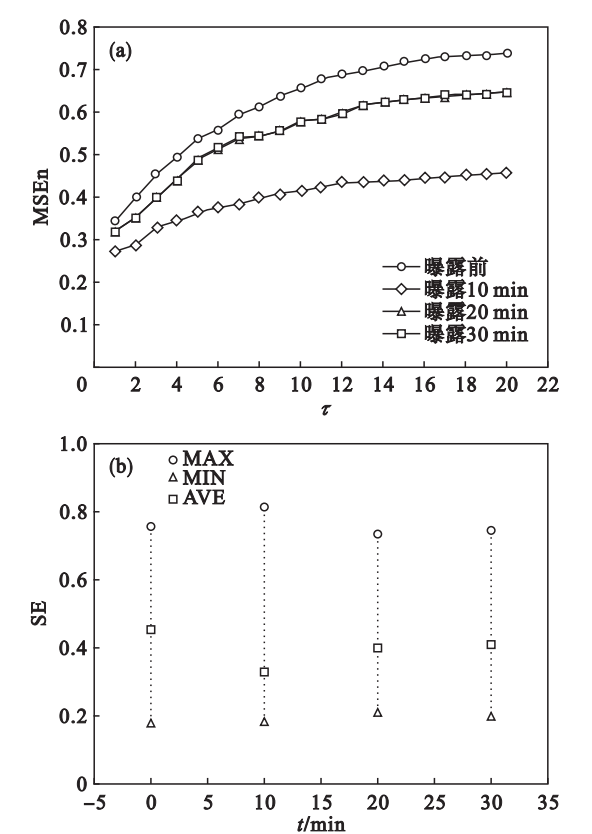


图 4 不同时间梯度下大鼠心电信号多尺度熵
Fig. 4 $MSEn$ of rat ECG under different time gradient
(a)—1 ~ 20 多尺度熵; (b)—尺度 10 样本熵.

图 4b 为尺度 $\tau = 10$ 大鼠心电信号近似熵最大值、最小值和平均值示意图. 从图中可以看出在同一尺度下, 正常信号的 SE 稳定在一定范围之内, 而经过暴露 10 min 信号 SE 波动范围比较大, 心电信号处于不稳定阶段, 暴露 20 和 30 min 信号 SE 波动范围减小, 心电信号逐渐稳定.

表 1 所示第 1 d 至第 7 d 经磁场暴露前测得大鼠心电信号的 $MSEn$ 平均值及标准差, 图 5 为这些数值的图示. 7 d 中每天大鼠暴露前信号 $MSEn$ 平均值的标准差均很小, 各尺度正常信号 $MSEn$ 在平均值上下波动范围很小, 说明经过 24 h 大鼠心脏自我调控心电信号恢复到第 1 d 经磁场暴露之前的复杂度, 磁场暴露对大鼠心电信号复杂度影响是可逆的.

表 1 磁场暴露前大鼠心电信号多尺度熵均值与标准差					
Table 1 $MSEn$ AVE and STD of rat ECG before magnetic field exposure					
τ	1	2	3	4	5
AVE	0.34	0.4	0.45	0.49	0.54
STD	0.68	0.69	0.7	0.71	0.72
τ	6	7	8	9	10
AVE	0.56	0.59	0.61	0.64	0.66
STD	0.72	0.73	0.73	0.74	0.74
τ	11	12	13	14	15
AVE	0.016	0.022	0.024	0.027	0.029
STD	0.048	0.049	0.05	0.053	0.06
τ	16	17	18	19	20
AVE	0.035	0.036	0.037	0.039	0.041
STD	0.062	0.063	0.063	0.066	0.066

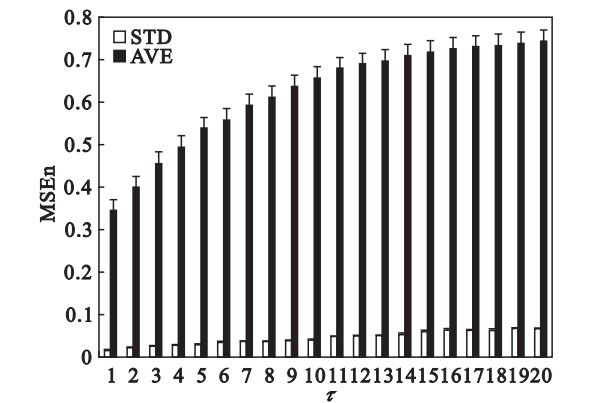


图 5 磁场暴露前大鼠心电信号多尺度熵均值与标准差
Fig. 5 $MSEn$ AVE and STD of rat ECG before magnetic field exposure

图 6a 所示为经过 7 d, 每天磁场暴露 20 min 大鼠心电信号平均 $MSEn$ 及未经磁场暴露大鼠心电信号平均 $MSEn$. 图 6b 所示为 7 d 中每天尺度

为 20 的心电信号 MSEn. 未经磁场暴露信号熵 MSEn 在各个尺度下均最大,第 1 d 经磁场暴露 20 min 平均 MSEn 在各个尺度下均最小,暴露第 2 d 信号 MSEn 比暴露第 1 d 信号 MSEn 各尺度下均有增加,尺度越大,增量越大. 暴露 20 min 信号 MSEn 随着暴露天数的增加在各尺度下均增大,直至第 7 d. 第 7 d 暴露后信号 MSEn 与暴露前正常信号 MSEn 差最小. 说明未经磁场暴露心电信号复杂度最高,经磁场暴露后心电信号 MSEn 减小,复杂度降低,在心脏自我调控作用下,大鼠心脏逐渐适应磁场暴露,心电信号 MSEn 逐天增大,复杂度逐天增加,越来越接近正常心电信号. 磁场暴露对大鼠心电信号复杂度影响越来越小.

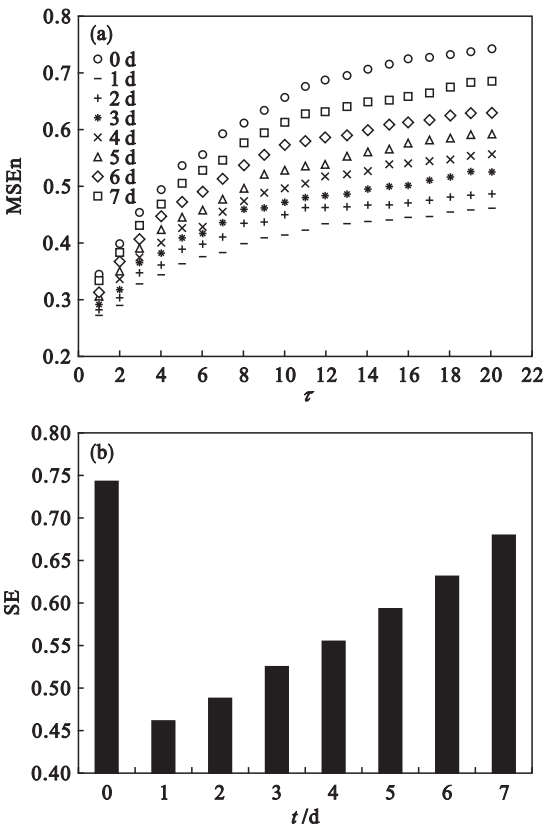


图 6 磁场暴露 20 min 大鼠心电信号多尺度熵

Fig. 6 Rat ECG MSEn on condition of magnetic field exposure for 20 min

(a)—1~20 多尺度熵;(b)—尺度 20 样本熵.

3 结 论

本文对比经磁场暴露与磁场暴露前大鼠心电信号多尺度熵变化,采用EMD分解方法对信号

去噪重构后,计算信号多尺度熵. 研究表明,正常大鼠心电信号的多尺度熵大,信号复杂度高,心脏动力学结构复杂;经过磁场暴露后,多尺度熵减小,信号复杂度降低,但磁场的影响是暂时的,随着暴露时间增加,心脏的自我调控使之适应磁场暴露的影响,信号多尺度熵有所回升;大鼠心脏自我调控能力有限,短时间内不能恢复正常值. 连续 7 d,每天同一时间,磁场暴露同一时长,排除任何外界干预的情况下,心脏经过自我调控将磁场对其影响逐渐减小. 20 mT, 50 Hz 交变磁场对心脏的影响不是永久的病理性的,大鼠通过长时间自我调控可以适应磁场环境.

参考文献:

[1] Fang Q, Mahmoud S S, Yang J Y, et al. An investigation on the effect of extremely low frequency pulsed electromagnetic fields on human electrocardiograms (ECGs) [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(11): 1171 – 1181.

[2] Zhou L, Wan B Q, Liu X F, et al. The effects of a 50 Hz magnetic field on the cardiovascular system in rats [J]. *Journal of Radiation Research*, 2016, 57(6): 627 – 636.

[3] Choi S H, Chung J S, Cho H J, et al. Study on the effect of ELF-MF on elementary school students in high-voltage transmission line [J]. *Journal of the Korean Society of Interior Environment and Odor*, 2015, 14(3): 199 – 207.

[4] Elmas O. Effects of electromagnetic field exposure on the heart; a systematic review [J]. *Toxicology and Industrial Health*, 2016, 32(1): 78 – 82.

[5] Baldi E, Baldi C, Lithgow B J. A pilot investigation of the effect of extremely low frequency pulsed electromagnetic fields on humans ' heart rate variability [J]. *Bioelectromagnetics*, 2007, 28: 64 – 68.

[6] Tenforde T S, Gaffey C T, Moyer B R. Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields; experimental observations and theoretical analysis [J]. *Bioelectromagnetics*, 2010, 4(1): 1 – 9.

[7] 刘春玲. 低频脉冲磁场对心脏刺激的实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006.

(Liu Chun-ling. Experimental study of low frequency pulsed magnetic stimulation on the heart [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006.)

[8] Kerimoglu G, Mercantepe T, Erol H S, et al. Effects of long-term exposure to 900 megahertz electromagnetic field on heart morphology and biochemistry of male adolescent rats [J]. *Biotechnic & Histochemistry*, 2016, 91(7): 445 – 454.

[9] Saili L, Hanini A, Smirani C, et al. Effects of acute exposure to WIFI signals (2. 45 GHz) on heart variability and blood pressure in Albinos rabbit [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2015, 40(2): 600 – 605.

[10] Costa M, Goldberger A L, Peng C K. Multiscale entropy analysis of biological signals [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(2): 1 – 18.