

论 著

功能近红外光谱技术测量短时心率变异性的准确性评估

王宁馨^{1,2}, 张绪柘^{1,3}, 雷皓^{1,2,3}, 龙克鸿^{1,3*}¹武汉磁共振中心(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院)波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071;²华中科技大学武汉光电国家研究中心, 武汉 430074; ³中国科学院大学, 北京 100049

[摘要] **目的** 评估利用功能近红外光谱(fNIRS)测量短时心率变异性(HRV)的准确性。**方法** 纳入2020年10月—2021年9月武汉大学及其周边高校的16名在校学生作为被试志愿者。利用心电图(ECG)与fNIRS同步测量被试志愿者在静息状态下的短时HRV; 评估fNIRS在头部与手指处所测结果的一致性; 以心电图结果为金标准, 评估fNIRS测量结果的准确性。**结果** fNIRS在头部与手指处所测得的短时HRV参数[交感神经指数(SNS指数)、副交感神经指数(PNS指数)、压力指数、RR间期的平均值(Mean RR)、RR间期的标准差(SDNN)、RR间期直方图的底宽(TINN)、近似熵(ApEn)、样本熵(SampEn)]差异均无统计学意义; 除衡量时间序列复杂度的熵参数ApEn($P<0.05$)和SampEn($P<0.01$)外, fNIRS所测得的短时HRV参数(PNS指数、SNS指数、压力指数、Mean RR、SDNN、TINN)与ECG金标准间差异也无统计学意义。**结论** 利用fNIRS数据测量短时HRV具有可行性和良好的准确性。

[关键词] 心率变异性; 功能近红外光谱; 准确性**[中图分类号]** R318.5**[文献标志码]** A**[文章编号]** 0577-7402(2021)11-1118-05**[DOI]** 10.11855/j.issn.0577-7402.2021.11.09**Accuracy evaluation of heart rate variability measured by functional near-infrared spectroscopy**Wang Ning-Xin^{1,2}, Zhang Xu-Zhe^{1,3}, Lei Hao^{1,2,3}, Long Ke-Hong^{1,3*}¹State Key Laboratory of Spectrum and Atomic and Molecular Physics, National Center for Magnetic Resonance in Wuhan (Innovation Institute for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences), Wuhan 430071, China²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author, E-mail: kehonglong@126.com

[Abstract] **Objective** To evaluate the accuracy of applying functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for measurement of short-term heart rate variability (HRV). **Methods** Sixteen college students were recruited from Wuhan University and surrounding universities as the volunteer subjects from October 2020 to September 2021. The short-term HRV of subjects in resting state was simultaneously measured with electrocardiogram (ECG) and fNIRS. The consistency of the results measured with fNIRS on the forehead and at the finger was evaluated; and the accuracy of fNIRS measurements was assessed using the result of ECG measurement as the golden standard. **Results** No statistically significant differences existed between the fNIRS measurements on the forehead and at the finger in these short-term HRV parameters including sympathetic nervous system index (SNS index), parasympathetic nervous system index (PNS index), pressure index, Mean RR, standard deviation of normal-to-normal RR intervals (SDNN), triangular interpolation of normal-to-normal intervals (TINN), approximate entropy (ApEn) and sample entropy (SampEn). Excepting for the entropy parameters (ApEn: $P<0.05$ and SampEn: $P<0.01$) that are for measuring the complexity of time series, no statistically significant differences were observed in most short-term HRV parameters (PNS index, SNS index, pressure index, Mean RR, SDNN and TINN) between the fNIRS measurements and the ECG golden standard. **Conclusion** With satisfactory accuracy, it is feasible to use fNIRS in measuring short-term HRV.

[Key words] heart rate variability; functional near-infrared spectroscopy; accuracy

心率变异性(heart rate variability, HRV)是指连续心动周期之间在时间上的微小差异, 是自主神经系统活动的一个非侵入性指标, 可反映交感与

副交感神经系统之间的平衡^[1-2], 在生理和临床研究中均具有重要作用^[3], 因此, 方便且准确地测量HRV具有重要意义。目前, HRV的测量主要基于以心电图(electrocardiography, ECG)为代表的电生理信号和以容积描记仪(photoplethysmography, PPG)为代表的光学信号。由ECG得到的RR间期

[作者简介] 王宁馨, 硕士研究生, 主要从事功能近红外光谱相关的心率变异性检测方面的研究

[通信作者] 龙克鸿, E-mail: kehonglong@126.com

(RR intervals, RRI)分析是HRV测量的金标准。功能近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是一种基于修正的朗伯比尔(Beer-Lambert)定律来测量血流动力学响应的光学监测方法,在监测大脑活动时具有无创、安全、便携的特点,已广泛用于疾病的预测及认知神经科学领域,如检测工作负荷、情绪压力或反应抑制等^[4]。fNIRS技术在心率测量方面准确性较高,且有研究证实其相较于PPG测量的HRV能更好地描述自主神经系统的短时变化^[5]。因此,本研究以ECG测量的HRV为参照,利用fNIRS技术对16名在校学生静息状态下的大脑和手指血氧信号进行监测,估算HRV,并评估fNIRS测量HRV的可行性及准确性。

1 资料与方法

1.1 研究对象 纳入2020年10月—2021年9月武汉大学及其周边高校的16名在校学生作为被试志愿者。其中男11名,女5名,年龄(21.6 ± 2.5)岁,均为右利手,视力正常或矫正正常。纳入标准:年龄 ≥ 18

岁,身体健康,无心脑血管疾病史,无精神疾病史。试验方案由中国科学院精密测量科学与技术创新研究院伦理委员会批准(批准号:APMH20001),参与研究者均签署书面知情同意书。

1.2 试验设计 本研究以ECG信号作为分析HRV的金标准,采用HeaLink(R211A型)微型心电记录仪采集ECG信号,采样频率为400 Hz。fNIRS信号通过NIRX公司台式近红外脑功能成像系统采集,采样频率为31.25 Hz, fNIRS在头部的通道布局及其在大脑皮质的映射位置如图1所示,由1个发射器和4个接收器组成,形成4个通道。左手食指佩戴1个发射器和1个接收器,形成1个通道;发射器和接收器之间的距离为3 cm。试验中每一位被试志愿者进行20 min的静息态测量,整个过程中实时同步采集ECG数据与fNIRS数据。根据不同方法或部位采集的数据分为三组:ECG组(ECG采集的数据);fNIRS头部组(fNIRS在头部采集的4个通道的平均数据);fNIRS手指组(fNIRS在左手食指采集的数据)。

1.3 数据处理 从fNIRS中采集的原始数据为波长

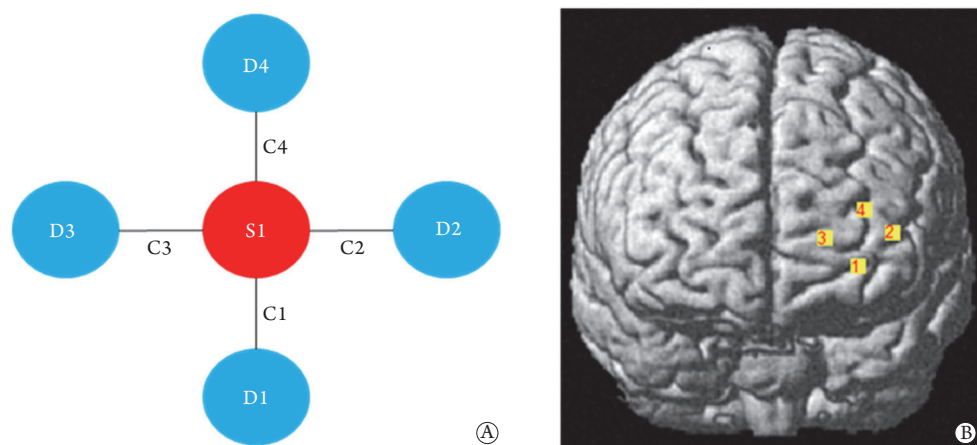


图1 功能近红外光谱(fNIRS)脑通道分布及其映射位置

Fig.1 Distribution of the brain channel and the projection of the channel

A. 脑部fNIRS光极的分布与通道的构成,其中S1代表光源,D1-D4代表接收器,C1-C4代表通道;B. fNIRS通道在大脑皮质的映射位置,其中1-4分别代表通道C1-C4在大脑皮质的位置

780 nm和830 nm两种光源的光强信号,基于修正的朗伯比尔定律将其转换为血氧信号。将原始数据进行小波变换去趋势、去运动伪迹后,再在1~2 Hz间选取频带,利用带通滤波提取心跳成分,最后使用基于自动多尺度的峰值检测(automatic multiscale-based peak detection, AMPD)算法^[6]来识别峰点,计算出RR间期,进一步分析得到HRV。

1.4 HRV参数 HRV分析可分为超短时(<5 min)、短时(5~60 min)和长时(1~24 h),本研究主要分析短时HRV,评估了部分时域、频域、非线性指标中比较有代表性、应用较为广泛的HRV参数:交感神经指数(sympathetic nervous system index, SNS指数)、

副交感神经指数(parasympathetic nervous system index, PNS指数)、压力指数、RR间期的平均值(Mean RR)和标准差(standard deviation of normal-to-normal RR intervals, SDNN)、RR间期直方图的底宽(triangular interpolation of normal-to-normal intervals, TINN),以及与RR间期时间序列复杂度相关的近似熵(approximate entropy, ApEn)和样本熵(sample entropy, SampEn)。

1.5 统计学处理 采用SPSS 20.0软件进行统计分析。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,首先使用Kolmogorov-Smirnov(K-S)法对所有数据进行正态性检验,对其中不符合正态分布的HRV参数(PNS指数、SNS指

数、SDNN和TINN)使用正态得分法进行正态性转换; fNIRS在手指与头部测量短时HRV的一致性采用配对t检验; fNIRS在手指与头部测量的短时HRV与ECG金标准的一致性采用单因素方差分析, 进一步两两比较采用LSD-t检验。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 fNIRS在手指与头部测量的短时HRV的一致性

对基于手指1个通道分析的短时HRV参数与基于头部4个通道整体叠加平均得到的短时HRV参数进行对比, 所有短时HRV参数差异均无统计学意义, fNIRS在手指与头部测量的短时HRV具有良好的一致性, 但是手指测量到的短时心率变异性参数相较于头部测量的参数在自主神经系统相关参数(如PNS指数、SNS指数)上总是出现偏低的趋势(表1)。

2.2 fNIRS与ECG测量的短时HRV的一致性 对ECG测量的HRV、fNIRS头部测量的HRV及fNIRS手指测量的HRV进行比较, 结果显示, 三组间大部分短时HRV参数(PNS指数、SNS指数、压力指数、Mean RR、SDNN及TINN)差异无统计学意义, 仅ApEn(P<0.05)和SampEn(P<0.01)差异有统计学意义。其中, ECG测量的短时HRV参数PNS指数、SNS指数、压力指数、Mean RR、SDNN及TINN与fNIRS头部测量的HRV参数差异无统计学意义, 二

表1 静息态下fNIRS在手指与头部测量的短时HRV参数比较

Tab.1 Comparison of short-term HRV parameters measured by fNIRS at the finger and on the forehead in resting state

HRV参数	fNIRS手指	fNIRS头部	t	P
PNS指数	-0.70 ± 0.83	-0.75 ± 0.78	0.82	0.43
SNS指数	0.86 ± 0.85	0.97 ± 0.86	-1.50	0.15
SDNN(ms)	38.63 ± 14.66	37.45 ± 13.04	0.84	0.41
TINN(ms)	268.75 ± 85.95	267.14 ± 69.54	0.06	0.95
压力指数	9.58 ± 2.67	10.36 ± 2.34	-1.22	0.24
Mean RR(ms)	763.09 ± 112.55	764.98 ± 107.41	-1.02	0.32
ApEn	1.14 ± 0.15	1.15 ± 0.15	-0.55	0.59
SampEn	1.21 ± 0.24	1.20 ± 0.24	0.80	0.44

fNIRS. 功能近红外光谱; HRV. 心率变异性; fNIRS手指. fNIRS手指测量的HRV; fNIRS头部. fNIRS头部测量的HRV; PNS指数. 副交感神经指数; SNS指数. 交感神经指数; Mean RR. RR间期的平均值; SDNN. RR间期的标准差; TINN. RR间期直方图的底宽; ApEn. 近似熵; SampEn. 样本熵

者间的一致性良好; 但ECG测量的复杂度相关参数ApEn(P<0.05)和SampEn(P<0.01)明显高于fNIRS头部测量的HRV参数, 差异有统计学意义。ECG测量的短时HRV参数(PNS指数、SNS指数、压力指数、Mean RR、SDNN及TINN)与fNIRS手指测量的HRV参数差异无统计学意义; 但ECG测量的HRV参数ApEn(P<0.05)和SampEn(P<0.01)明显高于fNIRS手指测量的HRV参数, 差异有统计学意义(图2)。

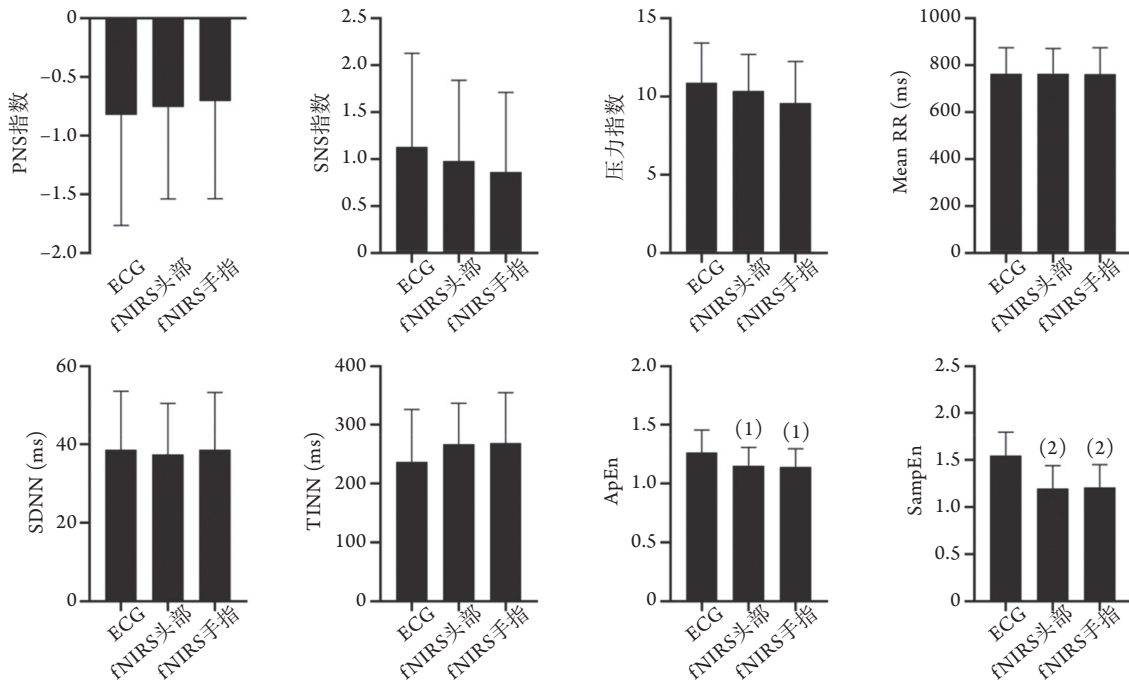


图2 静息状态下ECG、fNIRS头部与fNIRS手指测量的短时HRV参数比较

Fig.2 Comparison of short-term HRV parameters measured by ECG, fNIRS head and fNIRS finger in resting state

fNIRS. 功能近红外光谱; HRV. 心率变异性; ECG. ECG测量的HRV; fNIRS头部. fNIRS头部测量的HRV; fNIRS手指. fNIRS手指测量的HRV。PNS指数. 副交感神经指数; SNS指数. 交感神经指数; Mean RR. RR间期的平均值; SDNN. RR间期的标准差; TINN. RR间期直方图的底宽; ApEn. 近似熵; SampEn. 样本熵。与ECG组比较, (1)P<0.05, (2)P<0.01。

3 讨 论

本研究结果表明,手指测量的短时HRV参数相较于头部测量的短时HRV参数在自主神经系统相关参数(如PNS指数、SNS指数)上总是出现偏低趋势,这可能与fNIRS从头部测量的信号包含心跳成分和神经活动成分,fNIRS从手指测量的信号只包含心跳成分,而自主神经系统的活动会受到大脑神经活动的调控有关^[8]。此外,ECG测量的短时HRV参数与fNIRS测量的短时HRV主要差异在于复杂度相关熵参数,对于差异的来源,本研究认为是由于fNIRS采样频率(31.25 Hz)与ECG的采样频率(400 Hz)差异较大,使fNIRS提取到的RR间期的复杂度小,从而导致熵参数较小所致。已有研究发现,采样频率会对HRV的测量造成影响,如Giardino等^[33]观察到,PPG测量的HRV与ECG测量的HRV频域变量之间的相关性随着采样频率从1000 Hz下降到10 Hz而降低,且低于100 Hz时影响更为明显。因此,fNIRS采样频率过低会导致fNIRS测得的短时HRV结果在熵参数(如ApEn和SampEn)上不准确。此外,本研究发现,从总体趋势上看,用fNIRS在头部测量的HRV更接近于ECG测量的结果。Holper等^[5]的研究也发现,存在自主神经系统活动时(如在控制呼吸和温度变化的条件下),相较于PPG技术在手指测量的HRV,fNIRS技术在头部测量的HRV更接近于ECG金标准,这也证实了本研究的结果。

HRV监测分析已成为心理学、生理学,以及临床研究的一个重要组成部分。在健康领域,HRV被认为是衡量心脏健康及预测心源性猝死的指标。Shaffer等^[9]发现HRV可作为预测与抑郁相关的心血管疾病风险和死亡风险的生物标志物;Guzik等^[10]也发现HRV可用于预测心肌梗死后过早死亡或发生充血性心力衰竭的风险;HRV还能辅助诊断创伤后应激障碍(PTSD)^[11]并预测其症状严重程度^[12]等。在心理学方面,HRV能评估自主神经系统的状态,可反映广泛性焦虑障碍及PTSD等的焦虑严重程度^[13];HRV生物反馈训练干预可有效改善自主神经系统的功能^[14]。在认知方面,HRV较高的个体在注意力、工作记忆和执行功能等神经认知方面表现优异,主要是由于较高的HRV与心理弹性有关,使个体能有效适应变化并表现出良好的执行认知任务的能力^[7]。此外,在个体训练方面,HRV指导的训练可能是一种提高个体训练适应能力的有效方法^[15];以每日HRV为指导的训练能更有效地提高个体的体能和运动表现^[16-17]。

综上所述,本研究评估了fNIRS与ECG测量短

时HRV的一致性,发现除与复杂度相关的熵参数外,fNIRS测量的短时HRV参数与ECG测量结果基本一致,但这种一致性可能受到心跳、血压或其他生理参数以及个体差异等因素的影响。因此,需要采用更大样本的研究来进一步探索不同测量方法对短时HRV的影响。HRV已经广泛应用于各个领域,但是单一的HRV监测也有较大的局限性,因为受神经调节的生理系统如大脑系统、心脏系统、循环系统和呼吸系统之间,在不同的生理状态下均可表现出不同程度的活动和相互作用^[18],HRV分析难以表征各系统之间的这种相互作用。大脑与心脏之间存在紧密的相互作用,大脑可通过自主神经系统中的交感神经和副交感神经分支直接控制心脏,还可通过中枢系统自主命令直接改变心脏功能,而心脏也可通过向自主神经系统反馈来改变其功能以响应压力、情绪等的变化^[19]。fNIRS作为常用的脑功能活动测量设备,对被试环境非常友好,可用于一般日常活动的监测,而本研究进一步证明了fNIRS测量短时HRV的可行性与准确性。为了更好地评估大脑与心脏之间的相互作用^[20],未来可基于fNIRS原理设计出方便且隐蔽的可穿戴设备,实现一般日常活动过程中的脑功能活动与HRV的实时同步监测。

【参考文献】

- [1] Liu CX, Lin B, Ma Y, et al. Effect of post-traumatic stress disorder on human blood pressure, heart rate, and heart rate variability[J]. Med J Chin PLA, 2019, 44(2): 162-165. [刘崇霞, 林兵, 马勇, 等. 创伤后应激障碍对血压、心率及心率变异性的影响[J]. 解放军医学杂志, 2019, 44(2): 162-165.]
- [2] Thayer JF, Ahs F, Fredrikson M, et al. A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: Implications for heart rate variability as a marker of stress and health[J]. Neurosci. Biobehav. Rev., 2012, 36(2): 747-756.
- [3] Kleiger RE, Stein PK, Bigger JT Jr. Heart rate variability: measurement and clinical utility[J]. Ann Noninvasive Electrocardiol, 2005, 10(1): 88-101.
- [4] Durantin G, Gagnon JF, Tremblay S, et al. Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload[J]. Behav Brain Res, 2014, 259: 16-23.
- [5] Holper L, Seifritz E, Scholkmann F. Short-term pulse rate variability is better characterized by functional near-infrared spectroscopy than by photoplethysmography[J]. J Biomed Opt, 2016, 21(9): 091308.
- [6] Scholkmann F, Boss J, Wolf M. An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals[J]. Algorithms, 2012, 5(4): 588-603.
- [7] Thayer JF, Hansen AL, Saus-Rose E, et al. Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: the neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health[J]. Ann Behav Med, 2009, 37(2): 141-153.
- [8] Giardino ND, Lehrer PM, Edelberg R. Comparison of finger plethysmograph to ECG in the measurement of heart rate

- variability[J]. *Psychophysiology*, 2002, 39(2): 246-253.
- [9] Shaffer JA, Whang W, Shimbo D, *et al.* Do different depression phenotypes have different risks for recurrent coronary heart disease?[J]. *Health Psychol Rev*, 2012, 6(2): 165-179.
- [10] Guzik P, Piskorski J, Barthel P, *et al.* Heart rate deceleration runs for postinfarction risk prediction[J]. *J Electrocardiol*, 2012, 45(1): 70-76.
- [11] Minassian A, Maihofer AX, Baker DG, *et al.* Association of predeployment heart rate variability with risk of postdeployment posttraumatic stress disorder in active-duty marines[J]. *JAMA Psychiatry*, 2015, 72(10): 979-986.
- [12] Ginsberg JP, Berry ME, Powell DA. Cardiac coherence and posttraumatic stress disorder in combat veterans[J]. *Altern Ther Health Med*, 2010, 16(4): 52-60.
- [13] Blechert J, Michael T, Grossman P, *et al.* Autonomic and respiratory characteristics of posttraumatic stress disorder and panic disorder[J]. *Psychosom Med*, 2007, 69(9): 935-943.
- [14] Schuman DL, Killian MO. Pilot study of a single session heart rate variability biofeedback intervention on veterans' posttraumatic stress symptoms[J]. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 2019, 44(1): 9-20.
- [15] Javaloyes A, Sarabia JM, Lamberts RP, *et al.* Training prescription guided by heart rate variability in cycling[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2018: 1-28.
- [16] Vesterinen V, Nummela A, Heikura I, *et al.* Individual endurance training prescription with heart rate variability[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2016, 48(7): 1347-1354.
- [17] Kiviniemi AM, Hautala AJ, Kinnunen H, *et al.* Endurance training guided individually by daily heart rate variability measurements[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 101(6): 743-751.
- [18] Shaffer F, McCraty R, Zerr CL. A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability[J]. *Front Psychol*, 2014, 5: 1040.
- [19] Silvani A, Calandra-Buonaura G, Dampney RAL, *et al.* Brain-heart interactions: physiology and clinical implications[J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2016, 374(2067): 20150181.
- [20] Stankovski T, Petkoski S, Raeder J, *et al.* Alterations in the coupling functions between cortical and cardio-respiratory oscillations due to anaesthesia with propofol and sevoflurane[J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2016, 374(2067): 20150186.

(收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-09-06)

(责任编辑: 张小利)