

# 脉率变异性估计心率变异性的可行性分析

徐礼胜<sup>1,2</sup>, 周树然<sup>1</sup>, 姚 阳<sup>1</sup>, 齐 林<sup>1</sup>  
(1. 东北大学 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 东北大学 教育部医学影像计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110169)

**摘 要:** 研究了心率变异性(heart rate variability, HRV)是否可以由脉率变异性(pulse rate variability, PRV)替代,以及HRV与PRV之间的定量关系.同步采集了健康青少年、老年人与心血管病人组各25人的脉搏和心电数据,并通过定量对比分析了HRV与PRV在时域、频域和非线性三个方面的特征参数.结果表明,HRV与PRV二者不是完全一致的,其中健康青少年组的全部参数(SDNN, RMSSD, PNN50, HF, LF, SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub>,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , SE, CD和AE; Ratio < 0.2)均具有一致性,故二者在一定程度上可以互相替代分析;而老年人组和心血管病人组只有部分参数(老年:SDNN, SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub>,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , CD, SE和AE;病人:SDNN, SD<sub>2</sub>,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , CD和AE; Ratio < 0.2)具有一致性,其余参数(老年:PNN50, RMSSD, LF和HF;病人:PNN50, RMSSD, LF, HF, SD<sub>1</sub>和SE; Ratio  $\geq$  0.2)都不具有充分的一致性,故二者不可以互相替代分析.

**关 键 词:** 心率变异性;脉率变异性;时域分析;频域分析;非线性分析

中图分类号: TP 391.4      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2017)01-0031-05

## Feasibility Analysis on Pulse Rate Variability as an Estimate of Heart Rate Variability

XU Li-sheng<sup>1,2</sup>, ZHOU Shu-ran<sup>1</sup>, YAO Yang<sup>1</sup>, QI Lin<sup>1</sup>  
(1. School of Sino-Dutch Biomedical and Information Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. Key Laboratory of Medical Image Computing, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: XU Li-sheng, professor, E-mail: xuls@bmie.neu.edu.cn)

**Abstract:** Whether pulse rate variability (PRV) can be a surrogate of heart rate variability (HRV) was investigated, and their quantitative relationship was also studied. Three groups (healthy adolescents, old people and patients with cardiovascular diseases) were enrolled. Each group has 25 subjects and their pulse waves and ECG data were acquired simultaneously. Furthermore, the differences and relationships between them were analyzed after comparing some characteristic parameters of HRV and PRV in the time domain, frequency domain and nonlinear domain. The results show that HRV and PRV are not exactly the same, but there are some agreements in healthy adolescent group for all the parameters (SDNN, RMSSD, PNN50, HF, LF, SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub>,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , SE, CD and AE; Ratio < 0.2), which, in a certain extent, can be replaced. There are insufficient agreements for other parameters (old people: PNN50, RMSSD, LF and HF; Patients: PNN50, RMSSD, LF, HF, SD<sub>1</sub> and SE; Ratio  $\geq$  0.2) while there are agreements in old people group and patients with cardiovascular disease group for some parameters (old people: SDNN, SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub>, SE,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , CD, SE and AE; patients: SDNN, SD<sub>2</sub>,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , CD and AE; Ratio < 0.2), so HRV cannot be replaced with PRV.

**Key words:** heart rate variability; pulse rate variability; time domain analysis; frequency domain analysis; nonlinear analysis

脉搏信号较心电信号而言,其幅值较大,噪声      干扰较小,信号质量较高,对设备的要求较低,采

集简单方便,并且心电信号和脉搏信号产生的原因相近<sup>[1]</sup>. 因此,本文通过分析 HRV 与 PRV 二者之间的关系,研究心电信号能否由易于检测的脉搏信号来估计心率变异性,将不容易测量的 HRV 参数转变成可以方便采集的 PRV 参数,从而实现预测和诊断心血管疾病的目 的.

心率变异性的研究主要分为神经方向和体液方向:①对于神经方向,学者们发现 HRV 参数会随着迷走神经活性的增强而变大,随着迷走神经活性的减弱而变小. Ponikowski 等<sup>[2]</sup> 研究发现 HRV 的 SDNN 与 LF 两个参数可以作为预测死亡的灵敏性参数. ②对于体液方向,由于不同的 HRV 可能表现出同一种疾病状态,研究者们认为 HRV 的预测意义并不恒定,如在严重心衰情况下会导致 HRV 下降<sup>[3-4]</sup>. 在 PRV 方面, Krishnaswamy 等<sup>[5]</sup> 分析发现对于运动障碍的病人,其 PRV 与血样饱和度存在一定的表现差异; Hayano 等<sup>[6]</sup> 提出一种能够调节脉冲频率的方法来使脉搏信号变得简单,通过 HRV 关联性分析,采集的脉搏信号很大程度上接近心电信号的变异性分析结果. HRV 和 PRV 二者结合分析主要分为两个研究方向:①通过外部刺激和神经特征结合进行研究,如 Gil 等<sup>[7]</sup> 认为在颈部刺激研究里, PRV 可以由 HRV 来替代,原因是发现 HRV 和 PRV 二者之间存在着较强的相关性. ②通过检测人体不同部位的脉搏信号来进行研究,如 Hart<sup>[8]</sup> 利用左右两侧脉搏信号和心电信号进行对比分析,认为 PRV 是可以替代 HRV 的. Constant 等<sup>[9]</sup> 通过采集不同体位的脉搏信号,并将呼吸进行结合分析,研究发现当处于卧姿状态下时 HRV 和 PRV 能够互相代替,而在站姿状态下二者是不能互相代替的.

因此,本文从平静状态的卧姿着手,同步采集健康青少年、老年人以及心血管病人的心电和脉搏信号各 25 组,将时域、频域和非线性三方面参数结合分析,从不同年龄和不同身体状况等多角度比较,进而找到心率变异性和脉率变异性更加准确的关系.

# 1 方 法

## 1.1 数据采集和处理

数据采集:心电信号采用标准 12 导联方式(Ⅰ导联)采集,脉搏信号采用加速度传感器采集,二者进行同步采集,采样频率为 1 000 Hz,采集时间为 5 min,受试者基本情况信息见表 1.

表 1 受试者基本情况信息表				
Table 1 Basic information of participants				
受试对象	来 源	身体状况	人数	年 龄
青少年	东北大学在校大学生	健康	25	24.0±2.1 (22~28 岁)
老年人	东北大学老年活动中心老年人	健康	25	71.8±7.8 (56~84 岁)
心血管病人	盛京医院患心血管疾病患者	房颤	4	66.0±11.6 (38~84 岁)
		心梗	5	
		冠心病其他	6	
			10	

数据处理:通过 Matlab 软件实现,基本流程为:①同步测量脉搏信号和心电信号;②获取脉搏信号和心电信号的间期数据;③进行心率变异性和脉率变异性分析<sup>[10]</sup>.

## 1.2 参数分析方法

### 1.2.1 时域分析法

时域分析法是利用一段时间的窦性心律的 RR 间期或者瞬时心率数据计算所得,一般用于长时间的心率变异性信号分析<sup>[11]</sup>,时域指标如下.

1) SDNN:所有正常窦性心搏间期(NN)的标准差,反映交感和副交感神经总的张力大小,单位为 ms. 计算公式为

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (RR_j - \overline{RR})^2} . \quad (1)$$

式中: $N$  为 RR 间期总数; $\overline{RR}$  为 RR 间期的平均值; $RR_j$  为第  $j$  个 RR 间期.

2) PNN50:相邻心搏间期(NN)差大于 50 ms 的心搏数占整体心搏数的比例,反映副交感神经张力大小,单位为%. 计算公式为

$$PNN50 = \frac{NN50}{N-1} \times 100\% . \quad (2)$$

式中,NN50 为相邻 RR 间期相差大于 50 ms 的总数.

3) RMSSD:全程相邻心搏间期(NN)差的均方根,是 HRV 短时成分估计值,反映副交感神经张力大小,单位为 ms. 计算公式为

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (RR_{j+1} - RR_j)^2} . \quad (3)$$

1.2.2 频域分析法

频域分析法是将心搏期间的变化进行频谱分析,计算功率谱密度<sup>[11]</sup>,频域指标如下.

1) LF(低频功率):频率在 0.04~0.15 Hz 范围内的低频功率,单位为  $ms^2$ . 低频功率通常反映交感神经兴奋的程度,其受到交感神经和副交感

神经共同作用。

2) HF (高频功率):频率在 0.15 ~0.4 Hz 范围内的高频功率,单位为  $\text{ms}^2$ 。高频功率通常反映了副交感神经兴奋的程度,其受到迷走神经调节。

1.2.3 非线性分析法

非线性参数中以去波动趋势分析 (DFA, detrended fluctuation analysis)、庞加莱散点图 (PP, poincare plot)、近似熵 (AE, approximate entropy)、样本熵 (SE, sample entropy)、相关维 (CD, correlation dimension) 等参数为主<sup>[11-13]</sup>。

1) 去波动趋势分析是一种用来对时间序列的长程相关性进行分析和计算标度指数的方法。计算公式如下：

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - y_n(k))^2} \quad (4)$$

通常有短时程参数  $\alpha_1$  与长时程参数  $\alpha_2$  两类。在本文中,  $4 < \alpha_1 < 16, 16 < \alpha_2 < 64$ 。

2) 庞加莱散点图是以 RR 间期作为横坐标,把下一个 RR 间期作为纵坐标所描绘成的散点图,可以清晰地表征出心率的改变情况,单位为 s。两个定量分析参数分别是向量角度指数  $SD_1$  和向量长度指数  $SD_2$ 。计算公式如下：

$$SD_1^2 = \frac{1}{2}SDSD^2, \quad (5)$$

$$SD_2^2 = 2SDNN^2 - \frac{1}{2}SDSD^2. \quad (6)$$

式中:SDNN 为序列标准差;SDSD 为序列差值标准差。

3) AE (近似熵)反映了动力系统的差别和信息量的改变,利用统计分析的方法区分时间的复杂程度。计算公式为

$$AE(m, r, N) = \Phi^m(r) - \Phi^{m+1}(r) \quad (7)$$

4) SE (样本熵)与近似熵类似,区别在于计算上,样本熵则排除了自身与自身的比较。计算公式为

$$SE(m, r, N) = \ln(C^m(r)) - \ln(C^{m+1}(r)) \quad (8)$$

5) CD (相关维)是一种检测混沌动力学吸引子的方式,表征了混沌自由度的信息。计算公式为

$$CD(m) = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\lg C^m(r)}{\lg r} \quad (9)$$

式中,  $(\lg r, \lg C^m(r))$  为双对数曲线,利用线性回归方法可求解曲线的线性部分,此时曲线的斜率即为相关维数。

1.3 统计分析方法

本研究利用 Bland - Altman 分析方法对

HRV 和 PRV 的三类参数的一致性进行统计分析。采用医学统计软件 MedCalc15.2 进行分析。HRV 和 PRV 的统计数据使用中位数和四分位数范围,即中位数 (1/4 分位点 ~ 3/4 分位点范围) 进行表示。通过计算一致性界限范围 (LA) 和两种测量方法的均值 (MPM) 的一半的比率 (Ratio),来判断两种测量方法是否具有一致性。当比率处在 0 ~ 0.1 范围内时,表明两种测量方法具有良好的一致性;当比率处在 0.1 ~ 0.2 范围内时,表明两种测量方法具有一般的一致性;当比率处在大于 0.2 范围内时,表明两种测量方法不具有充分的一致性<sup>[14-16]</sup>。

2 结果与讨论

青少年组:SDNN, RMSSD, LF,  $SD_1$ ,  $SD_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  和 SE 参数的比率均小于 0.1,表明这些参数具有良好的一致性;PNN50, HF, CD 和 AE 参数的比率均在 0.1 ~ 0.2 之间,表明这些参数具有一般的一致性,见表 2。老年人组:SDNN,  $SD_2$ ,  $\alpha_2$  和 AE 参数的比率均小于 0.1,表明这些参数具有良好的一致性; $SD_1$ ,  $\alpha_1$ , CD 和 SE 参数的比率均在 0.1 ~ 0.2 之间,表明这些参数具有一般的一致性;PNN50, RMSSD, LF 和 HF 参数的比率均大于 0.2,表明这些参数不具有充分的一致性,见表 3。心血管病人组:SDNN,  $SD_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , CD 和 AE 参数的比率均在 0.1 ~ 0.2 之间,表明这些参数具有一般的一致性;PNN50, RMSSD, LF, HF,  $SD_1$  和 SE 参数的比率均大于 0.2,表明这些参数不具有充分的一致性,见表 4。

通过对比三类参数发现:1) 心率变异性和脉率变异性的参数值总体上是相近的,但在参数 PNN50 和 HF 上三组人群同时都表现出了相对其他参数比较差的一致性。2) HRV 和 PRV 的差异与年龄有关,健康青少年组的所有参数都具有一致性,而老年人组只有部分参数具有一致性,其余参数都不具有充分的一致性,因此青少年差异较小,老年人差异较大。3) 二者差异还与健康状态有关,健康青少年组所有参数都具有一致性,而心血管病人组只有部分参数具有一致性,其余参数都不具有充分的一致性,故健康人差异较小,心血管病人差异较大。

表 2 健康青少年心率变异性和脉率变异性的 Bland – Altman 分析  
Table 2 Bland-Altman analysis of HRV and PRV in healthy adolescents group

指标	HRV	PRV	LA	MPM	Ratio
SDNN/ms	57. 91 (40. 63 ~ 63. 46)	58. 98 (41. 48 ~ 64. 50)	- 3. 20 ~ 0. 80	58. 45 (40. 93 ~ 63. 94)	0. 03
PNN50/%	0. 298 (0. 203 ~ 0. 459)	0. 336 (0. 236 ~ 0. 485)	- 0. 070 ~ 0. 030	0. 317 (0. 221 ~ 0. 467)	0. 16
RMSSD/ms	50. 26 (40. 00 ~ 63. 83)	50. 66 (41. 95 ~ 65. 74)	- 6. 00 ~ 2. 20	50. 85 (40. 89 ~ 64. 81)	0. 08
LF/ms <sup>2</sup>	534. 3 (250. 9 ~ 730. 0)	553. 1 (255. 8 ~ 766. 5)	- 58. 5 ~ 20. 9	543. 7 (253. 3 ~ 748. 2)	0. 07
HF/ms <sup>2</sup>	726. 8 (91. 6 ~ 1 263. 1)	746. 0 (91. 0 ~ 1 389. 5)	- 78. 7 ~ 90. 1	736. 4 (91. 3 ~ 1 314. 2)	0. 12
SD <sub>1</sub> /s	0. 036 (0. 029 ~ 0. 046)	0. 036 (0. 030 ~ 0. 047)	- 0. 004 ~ 0. 002	0. 036 (0. 029 ~ 0. 046)	0. 08
SD <sub>2</sub> /s	0. 071 (0. 050 ~ 0. 077)	0. 070 (0. 050 ~ 0. 078)	- 0. 004 ~ 0. 001	0. 071 (0. 050 ~ 0. 080)	0. 04
α <sub>1</sub>	0. 83 (0. 71 ~ 0. 94)	0. 83 (0. 71 ~ 0. 93)	- 0. 06 ~ 0. 07	0. 83 (0. 71 ~ 0. 93)	0. 08
α <sub>2</sub>	0. 88 (0. 68 ~ 1. 03)	0. 86 (0. 70 ~ 1. 03)	- 0. 05 ~ 0. 06	0. 87 (0. 69 ~ 1. 03)	0. 06
CD	3. 85 (3. 63 ~ 3. 98)	3. 78 (3. 67 ~ 4. 05)	- 0. 37 ~ 0. 42	3. 84 (3. 67 ~ 4. 02)	0. 10
SE	1. 76 (1. 62 ~ 1. 90)	1. 75 (1. 60 ~ 1. 93)	- 0. 33 ~ 0. 01	1. 80 (1. 62 ~ 1. 95)	0. 09
AE	0. 86 (0. 74 ~ 1. 11)	0. 88 (0. 73 ~ 1. 09)	- 0. 08 ~ 0. 11	0. 86 (0. 74 ~ 1. 09)	0. 11

注:LA 为一致性界限(95% 置信区间);MPM 为 HRV 和 PRV 的均值;Ratio=0. 5 × (range of LA)/MPM;HRV,PRV 和 MPM 的数据表示形式为中位数(1/4 分位点 ~ 3/4 分位点范围)。

表 3 老年人心率变异性和脉率变异性的 Bland – Altman 分析  
Table 3 Bland-Altman analysis of HRV and PRV in old people group

指标	HRV	PRV	LA	MPM	Ratio
SDNN/ms	25. 46 (17. 44 ~ 44. 27)	26. 36 (18. 26 ~ 47. 81)	- 2. 50 ~ 4. 90	25. 91 (17. 85 ~ 46. 64)	0. 14
PNN50/%	0. 015 (0. 000 ~ 0. 189)	0. 010 (0. 000 ~ 0. 252)	- 0. 04 ~ 0. 06	0. 013 (0. 000 ~ 0. 221)	> 0. 2
rMSSD/ms	25. 30 (13. 61 ~ 42. 71)	25. 18 (14. 28 ~ 43. 25)	- 4. 60 ~ 8. 40	25. 24 (13. 95 ~ 43. 05)	> 0. 2
LF/ms <sup>2</sup>	100. 2 (17. 8 ~ 270. 2)	103. 8 (21. 2 ~ 292. 6)	- 26. 2 ~ 44. 6	102. 0 (19. 5 ~ 284. 3)	> 0. 2
HF/ms <sup>2</sup>	85. 4 (45. 6 ~ 303. 4)	104. 7 (54. 4 ~ 331. 4)	- 135. 1 ~ 147. 9	95. 06 (51. 85 ~ 317. 41)	> 0. 2
SD <sub>1</sub> /s	0. 018 (0. 010 ~ 0. 031)	0. 018 (0. 010 ~ 0. 031)	- 0. 003 ~ 0. 006	0. 018 (0. 010 ~ 0. 031)	> 0. 2
SD <sub>2</sub> /s	0. 032 (0. 021 ~ 0. 046)	0. 033 (0. 021 ~ 0. 047)	- 0. 002 ~ 0. 005	0. 033 (0. 021 ~ 0. 047)	0. 11
α <sub>1</sub>	0. 68 (0. 59 ~ 1. 14)	0. 76 (0. 55 ~ 1. 04)	- 0. 16 ~ 0. 08	0. 72 (0. 56 ~ 1. 09)	0. 17
α <sub>2</sub>	0. 92 (0. 82 ~ 1. 09)	0. 90 (0. 80 ~ 1. 08)	- 0. 14 ~ 0. 13	0. 91 (0. 79 ~ 1. 08)	0. 15
CD	3. 90 (3. 43 ~ 4. 25)	4. 03 (3. 45 ~ 4. 35)	- 0. 54 ~ 0. 84	3. 99 (3. 44 ~ 4. 29)	0. 17
SE	1. 64 (1. 47 ~ 1. 86)	1. 74 (1. 52 ~ 2. 00)	- 0. 45 ~ 0. 66	1. 71 (1. 60 ~ 1. 95)	> 0. 2
AE	0. 88 (0. 75 ~ 1. 08)	0. 93 (0. 69 ~ 1. 16)	- 0. 12 ~ 0. 14	0. 88 (0. 71 ~ 1. 11)	0. 15

注:LA 为一致性界限(95% 置信区间);MPM 为 HRV 和 PRV 的均值;Ratio=0. 5 × (range of LA)/MPM;HRV,PRV 和 MPM 的数据表示形式为中位数(1/4 分位点 ~ 3/4 分位点范围)。

表 4 心血管病人心率变异性和脉率变异性的 Bland – Altman 分析  
Table 4 Bland-Altman analysis of HRV and PRV in patients with cardiovascular disease group

指标	HRV	PRV	LA	MPM	Ratio
SDNN/ms	24. 51 (16. 12 ~ 29. 95)	25. 60 (16. 33 ~ 30. 65)	- 2. 04 ~ 0. 64	25. 06 (16. 23 ~ 30. 26)	0. 05
PNN50/%	0. 008 (0. 000 ~ 0. 044)	0. 009 (0. 000 ~ 0. 044)	- 0. 040 ~ 0. 030	0. 008 (0 ~ 0. 047)	> 0. 2
rMSSD/ms	14. 94 (11. 97 ~ 24. 68)	17. 27 (12. 58 ~ 25. 36)	- 4. 50 ~ 2. 40	16. 11 (12. 25 ~ 25. 04)	> 0. 2
LF/ms <sup>2</sup>	114. 1 ( 59. 4 ~ 193. 7)	122. 8 ( 63. 3 ~ 189. 9)	- 163. 7 ~ 124. 8	118. 4 (61. 1 ~ 191. 8)	> 0. 2
HF/ms <sup>2</sup>	76. 6 (37. 6 ~ 149. 2)	102. 8 (44. 7 ~ 171. 0)	- 636. 2 ~ 749. 4	86. 7 (40. 5 ~ 161. 4)	> 0. 2
SD <sub>1</sub> /s	0. 011 (0. 008 ~ 0. 018)	0. 012 (0. 009 ~ 0. 018)	- 0. 003 ~ 0. 002	0. 012 ( 0. 009 ~ 0. 018)	0. 20
SD <sub>2</sub> /s	0. 030 ( 0. 02 ~ 0. 04)	0. 030 (0. 020 ~ 0. 040)	- 0. 002 ~ 0. 001	0. 030 ( 0. 020 ~ 0. 040)	0. 05
α <sub>1</sub>	0. 92 (0. 80 ~ 1. 14)	0. 89 (0. 74 ~ 1. 06)	- 0. 12 ~ 0. 24	0. 92 (0. 79 ~ 1. 09)	0. 20
α <sub>2</sub>	0. 99 ( 0. 84 ~ 1. 22)	0. 97 ( 0. 83 ~ 1. 19)	- 0. 03 ~ 0. 06	0. 98 (0. 83 ~ 1. 20)	0. 05
CD	3. 99 ( 3. 65 ~ 4. 44)	4. 15 ( 3. 59 ~ 4. 28)	- 0. 75 ~ 0. 62	4. 10 ( 3. 62 ~ 4. 40)	0. 17
SE	1. 66 ( 1. 50 ~ 1. 83)	1. 69 ( 1. 52 ~ 1. 86)	- 0. 36 ~ 0. 28	1. 68 ( 1. 54 ~ 1. 84)	0. 19
AE	1. 12 ( 0. 96 ~ 1. 18)	1. 11 ( 1. 01 ~ 1. 20)	- 0. 10 ~ 0. 09	1. 12 ( 0. 97 ~ 1. 19)	0. 09

注:LA 为一致性界限(95% 置信区间);MPM 为 HRV 和 PRV 的均值;Ratio=0. 5 × (range of LA)/MPM;HRV,PRV 和 MPM 的数据表示形式为中位数(1/4 分位点 ~ 3/4 分位点范围)。

### 3 结 论

心率变异性与脉率变异性二者不是完全一致的,其中健康青少年组的所有参数 (SDNN, RMSSD, PNN50, HF, LF, SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub>,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , SE, CD 和 AE;Ratio < 0.2) 均具有一致性,故二者在一定程度上可以互相替代分析,而老年人组和心血管病人组只有部分参数 (老年:SDNN, SD<sub>1</sub>, SD<sub>2</sub>,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , CD, SE 和 AE;病人:SDNN, SD<sub>2</sub>,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , CD 和 AE;Ratio < 0.2) 具有一致性,其余参数 (老年:PNN50, RMSSD, LF 和 HF;病人:PNN50, RMSSD, LF, HF, SD<sub>1</sub> 和 SE;Ratio  $\geq$  0.2) 都不具有充分的一致性,故二者不能互相替代分析。

### 参考文献：

[ 1 ] Biel L, Pettersson O, Philipson L, et al. ECG analysis: a new approach in human identification [ J ]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50 ( 3 ) : 808 – 812.

[ 2 ] Ponikowski P, Anker S D, Chua T P, et al. Depressed heart rate variability as an independent predictor of death in chronic congestive heart failure secondary to ischemic or idiopathic dilated cardiomyopathy [ J ]. *American Journal of Cardiology*, 1997, 79 ( 12 ) : 1645 – 1650.

[ 3 ] Fauchier L, Babuty D, Cosnay P, et al. Heart rate variability in idiopathic dilated cardiomyopathy: characteristics and prognostic value [ J ]. *Journal of the American College of Cardiology*, 1997, 30 ( 4 ) : 1009 – 1014.

[ 4 ] Goldsmith R L, Bigger J T, Bloomfields D M, et al. Long-term carvedilol therapy increases parasympathetic nervous system activity in chronic congestive heart failure [ J ]. *American Journal of Cardiology*, 1997, 80 ( 8 ) : 1101 – 1104.

[ 5 ] Krishnaswamy U M, Higgins S E, Kosky C A, et al. Diagnosis of PLMD from increased pulse rate variability on overnight oximetry [ J ]. *Nature and Science of Sleep*, 2010, 2 : 107 – 114.

[ 6 ] Hayano J, Barros A K, Kamiya A, et al. Assessment of pulse rate variability by the method of pulse frequency demodulation [ J ]. *Biomedical Engineering Online*, 2005, 4 ( 1 ) : 62 – 73.

[ 7 ] Gil E, Orini M, Bailon R, et al. Time-varying spectral analysis for comparison of HRV and PPG variability during tilt table test [ C ] // 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology. Buenos Aires : IEEE Conference Publications, 2010 : 3579 – 3582.

[ 8 ] Hart J. Association between heart rate variability and manual pulse rate [ J ]. *Journal of the Canadian Chiropractic Association*, 2013, 57 ( 3 ) : 243 – 250.

[ 9 ] Constant I, Laude D, Murat I, et al. Pulse rate variability is not a surrogate for heart rate variability [ J ]. *Clinical Science*, 1999, 97 ( 4 ) : 391 – 397.

[ 10 ] Xu L S, Zhang D, Wang K Q, et al. Baseline wander correction in pulse waveforms using wavelet-based cascaded adaptive filter [ J ]. *Computers in Biology and Medicine*, 2007, 37 ( 5 ) : 716 – 731.

[ 11 ] Malik M, Cerutti S, Coumel P, et al. Guidelines heart rate variability [ J ]. *European Heart Journal*, 1996, 17 : 354 – 381.

[ 12 ] Pincus S M. Approximate entropy as a measure of system complexity [ J ]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1991, 88 ( 6 ) : 2297 – 2301.

[ 13 ] Guzzetti S, Signorini M G, Cogliati C, et al. Nonlinear dynamics and chaotic indices in heart rate variability of normal subjects and heart-transplanted patients [ J ]. *Cardiovascular Research*, 1996, 31 ( 3 ) : 441 – 446.

[ 14 ] Bland J M, Altman D G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement [ J ]. *Lancet*, 1986, 327 ( 8476 ) : 307 – 310.

[ 15 ] Radespiel T M, Rauh R, Mahlke C, et al. Agreement of two different methods for measurement of heart rate variability [ J ]. *Clinical Autonomic Research*, 2003, 13 ( 2 ) : 99 – 102.

[ 16 ] Wong J S, Lu W A, Wu K T, et al. A comparative study of pulse rate variability and heart rate variability in healthy subjects [ J ]. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 2012, 26 ( 2 ) : 107 – 114.