

# 运动后心力及心率同时遥测的心力恢复趋势与 心率恢复趋势的对比研究

陈历明, 田学隆, 肖守中, 彭承琳

(重庆大学生物工程学院, 教育部生物力学与组织工程重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为了更加全面地研究和评估心机的变时性和变力性, 研制了能够在运动场地同时采集心力和心率的心音信号遥测系统。采集了 50 名体育系学生和 30 名其他系学生在完成规定运动量的登梯运动后, 5 min 内连续变化的心音信号。对采集的数据经过 3 次样条插值、均匀采样和小波变换滤波后, 得到了平滑的心力恢复趋势曲线和心率恢复趋势曲线。统计分析表明, 大负荷运动量下的心脏储备主要来自于心力储备而不是心率储备 ( $P < 0.001$ ), 和其他系学生相比, 体育系学生具有的高水平心功能不仅在于具有更大的心力储备指数 ( $P < 0.001$ ), 而且还在于具有更快的心力恢复速度 ( $P < 0.001$ )。同时检测心力恢复趋势与心率恢复趋势会有益于全面评估心脏功能。

**关键词:** 心力储备; 心率储备; 心力恢复; 心率恢复; 遥测

**中图分类号:** Q811.3, R318.01

## 1 引言

心脏储备 (cardiac reserve) 作为评估心脏功能的重要指标, 反映了心输出量随机体代谢的需要而增加的能力, 它取决于心率储备和心肌收缩能力储备 (即心力储备)<sup>[1]</sup>。由于受测试技术和测试成本的限制, 目前在运动医学领域以及体育界, 对心脏储备的日常测试仍侧重于心率储备。国际上关于心音和心肌收缩能力关系的动物实验, 以及有创和无创临床对照研究表明, 第一心音 (S1) 幅值的大小与心肌收缩能力强弱密切相关, S1 幅值是心肌收缩力 (即心力) 的标准量度, 故可以用 S1 幅值的变化趋势来评估心力储备<sup>[2]</sup>。由于运动状态能够同时改变心机的变力性 (心力随时间而变化的性质) 和变时性 (心率随时间而变化的性质), 重庆大学肖守中教授等<sup>[3]</sup>1998 年提出并进行了心音图运动试验 (phonocardiogram exercise testing, PCGET) 的系统研究, 把完成规定运动量后的 S1 幅值对安静时 S1 幅值增加的相应倍数定义为心力储备指数 (cardiac contractility reserve index, CCRI), 它体现了心机的变力性; 而把运动后心率对安静时心率增加的相应倍数定义为心率储备指数 (heart rate reserve index, HRRI), 它体现了心机的变时性。初步研究表明, 体育系学生和其他系学生的 CCRI 有非常显著的差异, 而 HRRI 没有显著的差异。为了更加全面地研究和评估在大运动量下

心机的变时性和变力性, 我们研制了能够在运动场地同时采集心力和心率信号的心音信号遥测系统<sup>[4]</sup>。通过对遥测心音信号的分析, 进一步揭示了在大运动量下心力恢复趋势与心率恢复趋势的规律。

## 2 数据采集

我们利用自行研制的心音信号遥测系统<sup>[4]</sup>, 采集了 50 名体育系学生和 30 名其他系学生经过规定运动量的登梯运动 (做功量为 7 000 J) 后 5 min 内连续变化的心音信号。阶梯高 23 cm, 要求受试者在 3 min 内以最快速度完成。

本遥测系统由射频发射机 (RF TX)、射频接收机 (RF RX) 和笔记本电脑 (notebook computer) 三大部件组成 (图 1)。为了便于快速而准确地从遥测心音信号中提取心力数据和心率数据, 遥测系统利用胸部电极采集心电信号, 通过自适应阈值检测电路提取 R 波同步脉冲 (心率信号), 来标注一个心动周期的心音信号中 S1 的起始时刻, 而 S1 就出现在 R 波过后 20~175 ms 的时间范围

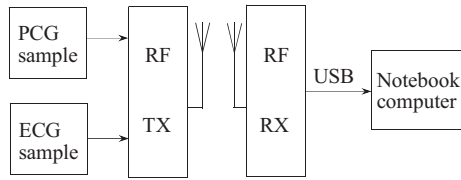
收稿日期: 2004-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30270377)

通讯作者: 陈历明, 电话: (023)65103812,

E-mail: clmswip@tom.com

内, 其峰值即为  $S1$  的幅值 (即心力信号)。



**Fig.1** Structure of heart sound telemetry system

遥测发射机每次发射一个心动周期的心音信号, 并且以心电信号中 R 波同步脉冲出现时刻作为数据包的帧头标记。心音信号的采样频率为 1 000 Hz, 这样, 第  $n$  个心拍的心动周期 (ms) 便等于数据包的长度, 用  $RR(n)$  表示, 对应的心率

$$HR(n) = 60\,000 / RR(n) \text{ (bmp)} \quad (1)$$

而数据包中前 175 个数据中的最大值便是  $S1$  的幅值 (即心力信号), 用  $S1(n)$  表示。这样便达到了心力和心率同时遥测的目的。

### 3 数据处理

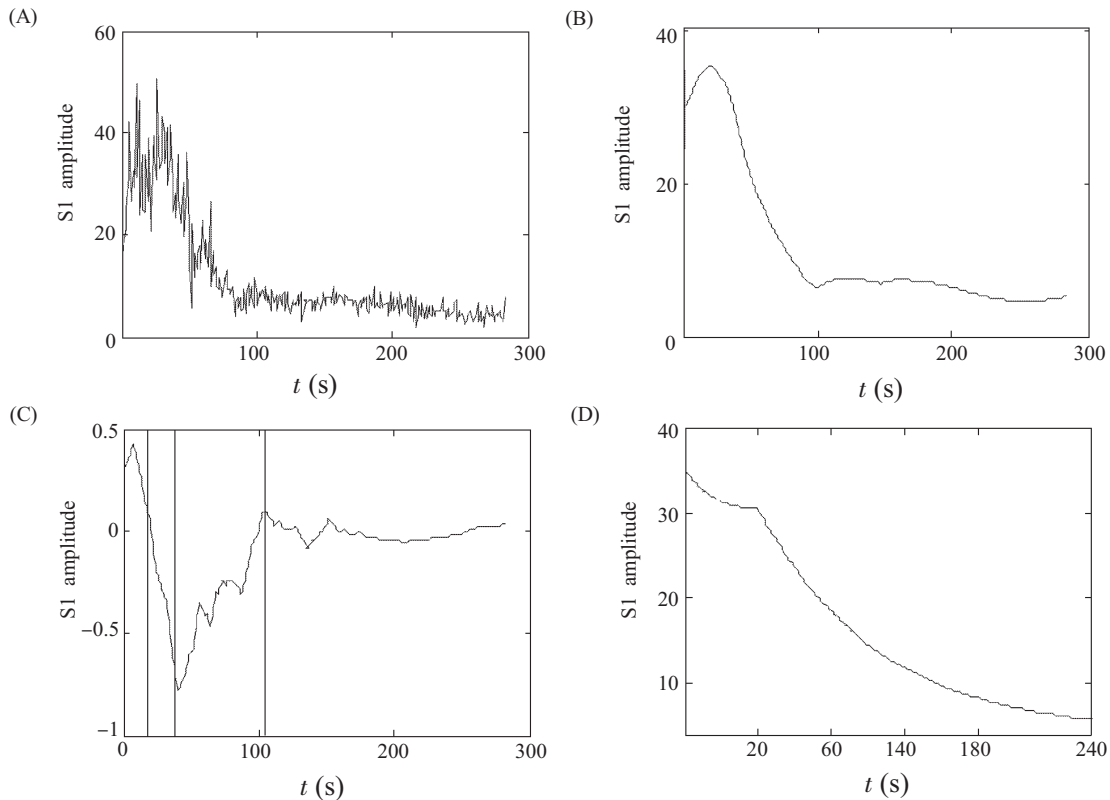
由于相邻心拍的时间间隔并不完全一致, 故  $S1(n)$  和  $HR(n)$  是非均匀采样的结果。为此, 我们采取 3 次样条插值<sup>[5]</sup>来获取随时间连续变化的心力信号  $S1(t)$  和心率信号  $HR(t)$ , 然后又用 1 Hz 频率进行均匀采样, 得到了采样频率为 1 Hz 的心力信号  $S1_s(t)$  (图 2A) 和心率信号  $HR_s(t)$  (图 3A)。再利用小波变换滤除高频噪声<sup>[6]</sup>, 重构出信号  $S1_{sa}(t)$  及其对应的平滑的心力恢复趋势曲线 (图 2B)。采用同样的算法可以得到  $HR_{sa}(t)$  和平滑的心率恢复趋势曲线 (图 3B)。

为了提取反映心力恢复趋势的特征指数, 我们对  $S1_{sa}(t)$  进行如下的差分运算:

$$Diff\_S1_{sa}(t) = S1_{sa}(t+1) - S1_{sa}(t), \quad 1 \leq t \leq N \quad (2)$$

这里  $N=300$  (s), 表示数据采集的时间。

登梯运动后人体的心力强度会因代谢需求的减少而不断衰减, 直至恢复到静息水平, 即进入心力



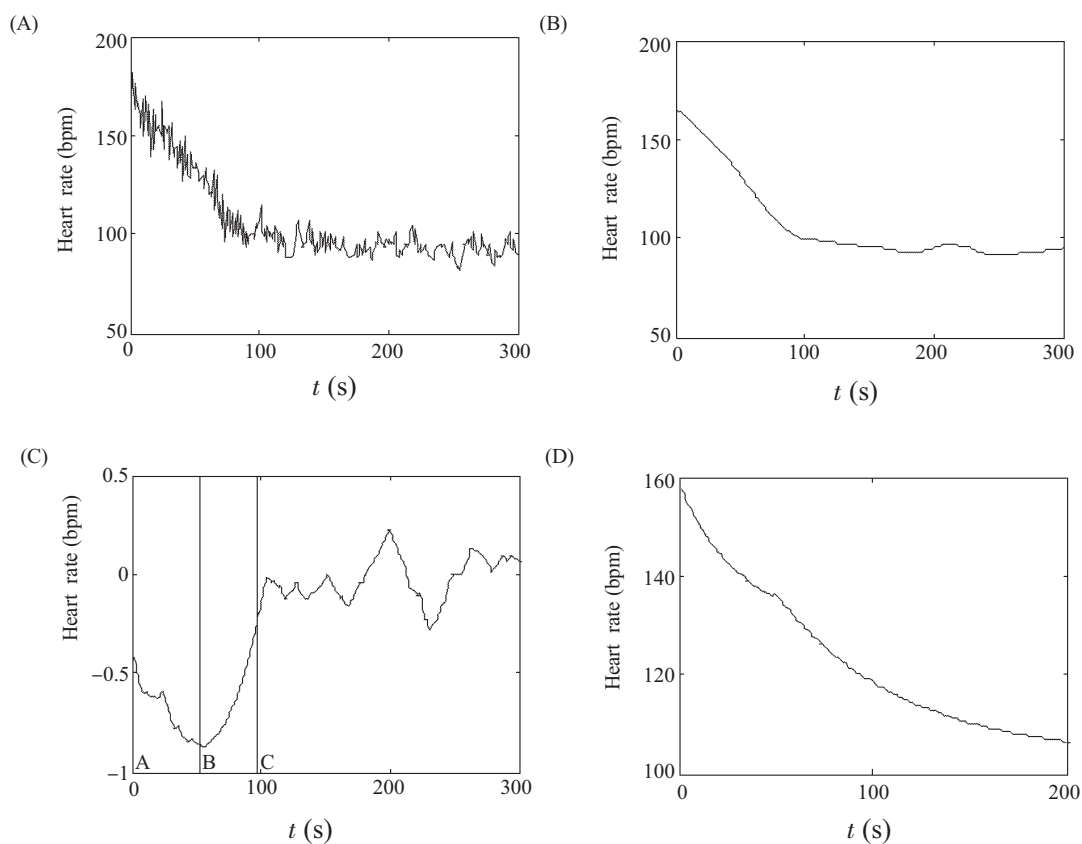
**Fig.2** Cardiac contractility recovery trend ( $S1$  amplitude represents cardiac contractility value) . (A) Evenly sampled cardiac contractility signal; (B) Smooth cardiac contractility recovery trend curve; (C) Differential computation result of cardiac contractility recovery trend curve; (D) Exponentially fitted curve of cardiac contractility recovery trend

恢复阶段。将  $Diff\_S1_{sa}(t)$  (图 2C) 分为 4 个时间区间: 区间 1:  $[0,A]$ , 表示  $S1_{sa}(t)$  仍处于持续增长阶段; 区间 2:  $[A,B]$ , 表示  $S1_{sa}(t)$  处于快恢复期; 区间 3:  $[B,C]$ , 表示  $S1_{sa}(t)$  处于慢恢复期; 区间 4:  $[C,300]$ , 表示  $S1_{sa}(t)$  恢复到一个相对的稳定状态。

相应地, 把区间 2 的长度定义为快恢复时间 (quick recovery time,  $QRT$ ); 区间 3 的长度定义为慢恢复时间 (slow recovery time,  $SRT$ );  $QRT+SRT$  定义为心力恢复时间 (cardiac contractility recovery time,  $CCRT$ );  $Diff_{min}/CCRT$  定义为心力恢复速度 (cardiac contractility recovery rate,  $CCRR$ )。

另外, 根据  $QRT$  和  $SRT$  这两个参数, 我们采用一阶指数曲线函数<sup>[7]</sup> $S1_{exp}(t)$  (图 2D) 来拟合在心力恢复趋势中出现的快恢复期和慢恢复期。

采用同样的算法也可得到以上表示心率恢复趋势的差分方程  $Diff\_HR_{sa}(t)$  (图 3C)、指数拟合曲线  $HR_{exp}(t)$  (图 3D) 以及对应的特征指数, 此外将 heart rate recovery time ( $HRRT$ ) 定义为心率恢复时间;  $Diff_{min}/HRRT$  定义为心率恢复速度 (heart rate recovery rate,  $HRRR$ )。同时将心率恢复期间的最大心率表示为  $HR_{max}$ , 恢复到相对稳态时的心率表示为  $HR_{rec}$ 。



**Fig.3** Heart rate recovery trend. (A) Evenly sampled heart rate signal; (B) Smooth heart rate recovery trend curve; (C) Differential computation result of heart rate recovery trend curve; (D) Exponentially fitted curve of heart rate recovery trend

## 4 结 果

对 50 名体育系学生和 30 名其他系学生的心率

恢复趋势和心力恢复趋势的特征指数采用  $t$  检验进行统计分析, 结果分别在表 1 和表 2 中列出。

**Table 1** Characteristic indices of heart rate recovery trend. 50 students in Physical education department (PE) and 30 students in other departments (OD)

	$HR_{\max}$	$HR_{\text{rec}}$	$QRT$	$SRT$	$HRRT$	$HRRR$	$HRRI$
OD	160±16	103±13	51.0±11.3	102.5±28.6	153.1±20.6	0.0045±0.0013	2.2±0.4
PE	166±15	101±12	47.2±10.8	101.4±24.3	148.2±31.4	0.0047±0.0012	2.3±0.5
<i>P</i>	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05

**Table 2** Characteristic indices of cardiac contractility recovery trend. 50 students in PE and 30 students in OD

	$QRT$	$SRT$	$HRRT$	$CCRR$	$CCRI$
OD	40.8±18.3	203.2±42.2	240.1±20.1	0.0018±0.00061	4.0±1.7
PE	39.3±17.00	142.8±27.4	181.3±45.3	0.0039±0.001	7.5±3.8
<i>P</i>	>0.05	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

## 5 讨 论

从表 1 和表 2 可以看出, 体育系学生和其他系学生的心率恢复趋势没有明显的差异 ( $P>0.05$ ); 而在心力恢复趋势上, 表征心力储备水平的  $CCRI$  指数以及表征心力恢复趋势的  $SRT$ 、 $CCRT$  和  $CCRR$  等参数则具有显著的差异 ( $P<0.001$ ), 表现为体育系学生的心力恢复要比其他系学生快。

此外, 我们将心率恢复时间和心力恢复时间进行比较, 发现无论是体育系学生还是其他系学生, 这两个参数间都存在显著性的差异 ( $P<0.001$ )。

体育系学生和其他系学生的心率恢复趋势和心力恢复趋势, 都表现为三个阶段: 开始是一个持续时间较短的快恢复期, 表明在大负荷运动刚结束时自主神经系统中副交感神经的活动占优势; 随后进入一个持续时间较长的慢恢复期, 表明副交感神经的活动开始降低而交感神经的活动开始逐渐恢复; 最后进入一个轻微波动的稳态期, 表明副交感神经的活动与交感神经的活动处于一个相对平衡的状态。而心力恢复时间与心率恢复时间之间存在的显著性差异, 表明心肌的变力性除了受自主神经系统的控制外, 还可能与其作为一种富有弹性的肌肉组织的特性有关。

无论是体育系学生还是其他系学生, 其  $CCRI$  指数都要比  $HRRI$  指数高出约 2 倍, 这表明在高强度运动中, 心脏储备主要是依靠心力储备而不是心率储备。和其他系学生相比, 体育系学生的  $CCRI$  值显著地高且  $CCRR$  显著地快, 这意味着体育系

学生高水平的心脏功能不仅体现在具有更大的心力储备上, 而且还体现在其具有更快的心力恢复速度上。

大运动量后体育系学生和其他系学生的心率恢复趋势与心力恢复趋势的对比研究, 提示我们在对运动员的心脏功能进行测试时, 除了心率指标外, 还可以把心力储备以及心力恢复速度等指标作为参考, 以期做到更全面和更准确的评估。

### 参考文献:

- [1] 姚泰. 生理学. 第 5 版. 北京: 人民卫生出版社, 2002. 85~86
- [2] Hansen PB, Luisada AA, Miletich DJ, Albrecht RF. Phonocardiography as a monitor of cardiac performance during anesthesia. *Anesth Analg*, 1989,68:385~387
- [3] Xiao SZ, Cao ZH, Zhou SY. An application of phonocardiogram exercise test in evaluation of cardiac reverse. In: IEEE EMBS'98 satellite conference proceedings. Beijing, 1998. 82~83
- [4] 陈历明, 田学隆, 肖守中, 彭承琳, 张平意. 同时采集多名运动员心力和心率的心音信号遥测系统的研制. *中国医疗器械杂志*, 2004,28(2):84~88
- [5] Aubert AE, Ramaekers D, Beckers F, Breem R, Benef C. Analysis of heart rate variability in unrestrained rats. Validation of method and results. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1999,60(3):197~213
- [6] Mallat SG. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989,11(7):674~693
- [7] Pierpont GL, Stolpman DR, Gornick CC. Heart rate recovery post-exercise as an index of parasympathetic activity. *Journal of the Autonomic Nervous System*, 2000,80:169~174

## COMPARATIVE STUDY OF CARDIAC CONTRACTILITY RECOVERY TREND AND HEART RATE RECOVERY TREND BASED ON SIMULTANEOUSLY TELEMETERING CARDIAC CONTRACTILITY AND HEART RATE SIGNALS FOLLOWING EXERCISE

CHEN Li-ming, TIAN Xue-long, XIAO Shou-zhong, PENG Cheng-lin

*(College of Bioengineering, Key Lab for Biomechanics & Tissue Engineering under the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)*

**Abstract:** To study and evaluate myocardial inotropism and chronotropism more comprehensively, a heart sound telemetry system with simultaneously sampling signals of cardiac contractility and heart rate at the sports site was developed. Five-minute continuous heart sound signals were sampled respectively from 50 students in physical education department and 30 students in other departments after completing designed workload during step-climbing exercise. Smooth cardiac contractility recovery trend curves and heart rate recovery trend curves were obtained by processing the data through cubic spline interpolation, evenly sampling and wavelet transform filtering. Statistical analysis showed that the cardiac reserve under the heavy exercise workload mainly depends on the cardiac contractility reserve rather than the heart rate reserve ( $P<0.001$ ). Compared with the students of other departments, the high level cardiac contractility reserve of the students in physical department may be reflected not only in cardiac contractility reserve, but also in faster cardiac contractility recovery rate ( $P<0.001$ ). Simultaneous measuring of both cardiac contractility recovery trend and heart rate recovery trend after exercise might be beneficial to comprehensive evaluation of cardiac function.

**Key Words:** Cardiac contractility reserve; Heart rate reserve; Cardiac contractility recovery; Heart rate recovery; Telemetry