

# 成都体育学院

## 硕士研究生学位论文

题    目: 运动后心率恢复和心率变异性  
与运动负荷相关性的研究

培养单位: 成都体育学院  
姓    名: 度 伟  
学    号: 2015100166  
一级学科: 体育学  
专    业: 体育教育训练学  
研究方向: 田径教学训练理论与方法  
导师姓名: 李良刚 教授

二〇一八 年 五 月 二十 日

# 成都体育学院

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校对本人递交的学位论文《运动后心率恢复和心率变异性与运动负荷相关性的研究》保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许在校内和与学校有协议的部门公布论文并被查阅和借阅。

本人授权成都体育学院可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文作者签名：侯伟

2018 年 5 月 24 日

# 成都体育学院

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交《运动后心率恢复和心率变异性与运动负荷相关性的研究》是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明并致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

缩略语表  
(Abbreviations)

英文缩写	中文全称
ANS	自主神经系统
HRR	运动后心率恢复
HRV	心率变异性
HRr%	运动后心率恢复的百分比
Pre5	运动前静息状态下的-5 分钟~0 分钟
Post5	运动终止后休息状态下的 0—5 分钟
Post30	运动终止后休息到 30 分钟以后的 5 分钟
RMSSD	相邻 RR 间期之差的均方根值
TL <sub>HRV</sub>	运用心率变异性来评定运动负荷的一个值（比值）
VO <sub>2</sub> max	最大摄氧量
△HRR	运动中峰值心率与运动终止后恢复期某一时间点心率的差值

# 运动后心率恢复和心率变异性与运动负荷相关性的研究

专业：体育教育训练学

研究生：庾伟      导师：李良刚      教授

## 摘要：

### 【研究目的】：

无论是在专业运动员训练，还是大众健身锻炼以及运动康复治疗等领域，为了达到提高运动成绩、强身健体以及身体康复等的目的，就需要运用适宜的运动负荷对机体进行刺激，然而，运动负荷的适宜程度是因人而异、因运动目标而异的，这就使得评估“运动负荷是否适宜”变得尤为重要而又多变复杂。所以长期以来，如何评估人体运动过程中的适宜运动负荷一直是体育科学研究领域的重要课题，主要体现为由最开始的调查问卷和训练日志，逐渐发展成为实验室采取的生理学指标。其中调查问卷受个体差异以及运动员主观性等因素影响较多，所以精准性不强。实验室所采取的生理学指标虽做到了高精度度，但是它们几乎是来源于对血液和耗氧量等的采集，对于这些样本的采集大多是不方便的且部分还带有创伤性，加之监测设备昂贵，以至于取样和监测都比较麻烦。所以，研究者们便又将焦点聚集在了便于快速采集，且对训练或锻炼过程没有影响的和无创性的心电信号的相关指标上。因为研究表明运动负荷的改变能够引起自主神经系统的变化，而心电信号中的 HRR、HRV 指标是反映自主神经系统变化的直接指标。所以，本研究尝试将心电信号中的 HRR、HRV 变化与运动负荷的变化建立联系。由此，对通过实验采集的相关指标值与运动负荷进行相关性的研究，旨在为运用 HRR、HRV 来估运动负荷提供一些理论参考。

### 【研究方法】：

(1) 最大摄氧量（以下称 VO<sub>2</sub>max）的采集实验：运用 ers.2ergoline 心肺功能康复系统的功率自行车和便携式最大摄氧量系统对每个人的最大摄氧量进行直接测试，测试过程中便携式最大摄氧量测试设备蓝牙链接到电脑，电脑的专用分析软件会自动算出该名受试者的最大摄氧量数值。

(2) 确定研究所需的运动负荷：根据每名受试者的 VO<sub>2</sub>max 值，按每个人的 90%VO<sub>2</sub>max、70%VO<sub>2</sub>max、50%VO<sub>2</sub>max 来分别确定他们的大、中、小负荷。

(3) 心电信息及指标的采集实验: 在为期 3 个月的实验过程中, 记录下运动过程中的最高心率、运动终止后 1、2、3 分钟三个时间点所显示的心率、运动终止后休息状态下的 0 到 15 秒的平均心率。并同时分别对各个负荷下 Pre5、Post5 和 Post30 三个阶段的心电图进行采集。

(4) 统计处理数据: 利用 Excel, 首先对心电图 Pre5、Post5 和 Post30 三个阶段呈现的 R-R 间期值进行统计, 从而计算出反映 HRV 的 RMSSD 值、 $TL_{HRV}$  值。其次, 对采集到的相关心率进行统计并计算, 得出反映 HRR 的  $\Delta HRR$  值、 $HRr\%$  值。

(5) 数据分析: 运用 SPSS19.0 统计分析软件来对各指标值进行正态分布检验、单因素方差分析等检验, 从而进一步分别进行 RMSSD 值、 $TL_{HRV}$  值、 $\Delta HRR$  值和  $HRr\%$  值与运动负荷变化的相关分析。

(6) 运用逻辑分析法对研究结果进行分析讨论。

#### 【研究结果】:

(1) 经检验, 不同负荷下的  $\Delta HRR$  值、 $HRr\%$  值、 $TL_{HRV}$  值以及各阶段的 RMSSD 值均具有统计学意义。即各值在不同负荷下的组间变化有显著性差异 ( $P<0.05$ ), RMSSD 值在 Pre5 与 Post5、Post5 与 Post30 阶段之间呈现显著性差异 ( $P<0.05$ )。所以这些数据能进一步与运动负荷进行相关性分析。

(2)  $\Delta HR1$  值与运动负荷的相关系数  $R$  为  $-0.862$  ( $P<0.05$ ), 所以它们之间具有极强的负相关性;  $\Delta HR2$ 、 $\Delta HR3$  与运动负荷的相关系数分别为  $0.777$  和  $0.607$  ( $P<0.05$ )。所以呈现出正相关性, 但是相关性不强。

(3)  $HRr\%$  值与运动负荷的相关系数  $R$  为  $-0.829$  ( $P<0.05$ ), 所以它们之间的变化具有极强的负相关性

(4) RMSSD 值与运动负荷的变化具有极强的负相关性: 即在 Post5 阶段的 RMSSD 值与运动负荷之间的负相关性很大 ( $R=-0.818$ ;  $P<0.05$ ), 在 Post30 时间段的 RMSSD 值与运动负荷之间具有极强的负相关性 ( $R=-0.930$ ;  $P<0.05$ )。

(5)  $TL_{HRV}$  值与运动负荷的相关系数  $R$  为  $0.943$  ( $P<0.05$ )。所以它们之间具有极强的正相关性。

#### 【研究结论】:

(1) 运动后心率恢复指标 ( $\Delta HR1$  和  $HRr\%$ ) 与运动负荷呈现极强的负相关关系。随着运动负荷的增加,  $\Delta HR1$  和  $HRr\%$  值会减少。

(2) 在心率变异性的指标值中, 运动后 5 分钟和运动后 30 分钟的 RMSSD 值与运动负荷呈现极强的负相关关系, 随着运动负荷的增加, RMSSD 值会减少;  $TL_{HRV}$  值与运动负荷呈现极强的正相关关系。随着运动负荷的增加,  $TL_{HRV}$  值会增加。

**关键词:** 运动后心率恢复; 心率变异性; 运动负荷; 自主神经系

## Abstract

### 【Research purposes】:

Whether in professional athlete training and mass fitness training or sports rehabilitation therapy, in order to improve sports performance, physical fitness, and physical rehabilitation, the body needs to be stimulated with appropriate exercise load. However, the degree suitability of the exercise load varies from person to person and varies from one sporting goal to another, which makes it particularly important and complex to assess whether exercise load is appropriate. Therefore, how to assess the appropriate exercise load in the process of body movement has been an important issue in the field of sports science research for a long time, mainly reflected from the initial survey questionnaire and training log, and gradually developed into the physiological indicators taken by the laboratory. The questionnaires are affected by individual differences and subjective players and other factors, so the accuracy is not strong. Although the physiological indicators adopted by the laboratory are highly precise, they are almost always derived from the collection of blood and oxygen consumption. Most of these samples are inconvenient to collect and some are traumatic. The monitoring equipment is so expensive that sampling and monitoring are bothersome. Therefore, researchers have again focused on related indicators that facilitate rapid acquisition and have no impact on the training or exercise process and non-invasive ECG signals. Because studies have shown that changes in exercise load can cause changes in the autonomic nervous system, the HRR and HRV indicators in ECG signals are direct indicators of changes in the autonomic nervous system. Therefore, this study attempts to link the HRV and HRR changes in ECG signals with changes in exercise load. Therefore, the correlation between the relevant index values collected through the experiment and the exercise load is intended to provide some theoretical references for estimating the exercise load using HRV and HRR.

### 【Research methods】:

(1) Collection of maximum oxygen uptake (hereinafter referred to as VO<sub>2</sub>max): The ers.2ergoline cardiopulmonary function recovery system's power cycle and portable VO<sub>2</sub>max system were used to directly test the maximal oxygen uptake of each person. The maximal oxygen uptake test device is Bluetooth-linked to a computer, and the computer's dedicated analysis software automatically calculates the maximal oxygen uptake value of the subject.

(2) Determine the exercise load required for the study: According to the VO<sub>2</sub>max

value of each subject to determine their large, medium, and low load based on each person's 90%VO<sub>2</sub>max, 70%VO<sub>2</sub>max, 50%VO<sub>2</sub>max.

(3) Collection of ECG information and indicators: During the 3-month experiment, the highest heart rate during exercise was recorded, the heart rate and movement displayed at three time points of 1, 2, and 3 minutes after the termination of exercise were recorded. The average heart rate from 0 to 15 seconds in the resting state after termination were recorded. At the same time, the electrocardiograms of Pre5, Post5 and Post30 were collected at each load.

(4) Statistical processing data: Using Excel to firstly count the R-R interval values of the three phases of the electrocardiogram Pre5, Post5, and Post30, and calculate the RMSSD value and the TLHRV value that reflect the HRV. Secondly, using Excel to count and calculate the relevant heart rate collected, and obtain the  $\Delta$ HRR value and HRr% value reflecting the HRR.

(5) Data analysis: SPSS19.0 statistical analysis software was used to perform normal distribution test, one-way analysis of variance, and other tests of each index value, so as to further perform Correlation analysis between RMSSD value, TLHRV value,  $\Delta$ HRR value, HRr% value and exercise load changes separately.

(6) Using logical analysis to analyze the research results.

#### 【Research result】:

(1) After testing, the values of  $\Delta$ HRR, HRr%, TLHRV, and RMSSD at each stage have statistical significance. In other words, there was a significant difference between groups in the values of each load ( $P<0.05$ ). RMSSD values showed significant differences between Pre5 and Post5, Post5 and Post30 ( $P<0.05$ ). So these data can be further correlated with the exercise load.

(2) The correlation coefficient R between  $\Delta$ HR1 and exercise load was -0.862 ( $P<0.05$ ), so there was a strong negative correlation between them. The correlation coefficients between  $\Delta$ HR2,  $\Delta$ HR3 and exercise load were 0.777 and 0.607 respectively ( $P<0.05$ ). Therefore, there is a positive correlation, but the correlation is not strong.

(3) The correlation coefficient R between HRr% and exercise load is -0.829 ( $P<0.05$ ), so the change between them has a strong negative correlation.

(4) There was a strong negative correlation between the RMSSD value and the change of exercise load: the negative correlation between the RMSSD value and exercise load during the Post5 stage ( $R=-0.818$ ;  $P<0.05$ ). There was a strong negative correlation between the RMSSD value and exercise load at Post30 ( $R=-0.930$ ;  $P<0.05$ ).



(5) The correlation coefficient  $R$  between TLHRV and exercise load was 0.943 ( $P < 0.05$ ). So there is a strong positive correlation between them.

**【Research conclusion】:**

(1) After exercise, heart rate recovery indicators ( $\Delta HR1$  and  $HRr\%$ ) showed a strong negative correlation with exercise load. As the exercise load increases,  $\Delta HR1$  and  $HRr\%$  decrease.

(2) Among the index values of heart rate variability, the RMSSD values at 5 minutes post-exercise and 30 minutes post-exercise showed a strong negative correlation with exercise load. As the exercise load increased, the RMSSD value decreased; TLHRV values and the exercise load shows a strong positive correlation. As the exercise load increases, the TLHRV increases.

**Key words:** Heart rate recovery; Heart rate variability; training load; Autonomic nervous system

## 目录

1 绪论.....	1
1.1 选题依据.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究意义.....	2
1.3.1 理论意义.....	2
1.3.2 现实意义.....	2
2 文献综述.....	3
2.1 相关概念的阐述.....	3
2.2 运动后心率恢复的相关研究.....	3
2.3 心率变异性的相关研究.....	4
2.4 关于运动负荷评估方法的研究.....	5
2.5 相关指标的确定.....	8
2.5.1 反映 HRR 的相关指标确定.....	8
2.5.2 反映 HRV 的相关指标确定.....	9
3 研究对象.....	11
4 研究方法.....	11
4.1 实验研究法.....	11
4.1.1 实验场地和器材.....	11
4.1.2 实验内容设计.....	12
4.1.3 实验指标的采集.....	14
4.2 数理统计法.....	15
4.3 逻辑分析法.....	16
5 研究结果.....	16
5.1 运动后心率恢复与运动负荷的相关研究.....	16
5.1.1 运动后心率恢复相关数据的检验.....	16
5.1.2 $\Delta$ HRR 值与运动负荷之间的相关性分析.....	21

5.1.3 HRr%值与运动负荷之间的相关性分析.....	23
5.2 心率变异性与运动负荷的相关研究.....	24
5.2.1 心率变异性相关数据的检验.....	24
5.2.2 RMSSD 值与运动负荷之间的相关性分析.....	29
5.2.3 TLHRV 值与运动负荷之间的相关性分析.....	31
6 分析与讨论.....	32
6.1 运动后心率恢复与运动负荷相关性的可能机理分析.....	32
6.2 心率变异性与运动负荷相关性的可能机理分析.....	34
7 结论与建议.....	37
7.1 结论.....	37
7.2 建议.....	37
8 参考文献.....	38
致谢.....	45
攻读学位期间的主要科研成果.....	46

# 1 绪论

## 1.1 选题依据

如何评估人体运动过程中适宜的运动负荷是体育科学研究领域一直以来的重要课题<sup>[1]</sup>。首先,对于专业运动员来说,在训练过程中,为了优化训练方案,使得运动员在特殊的时间点上发挥出最佳的竞技状态,通常是通过控制训练的负荷和积极有效的恢复过程来达到的。虽然运动员的最终比赛成绩与其在运动过程表现出来的体、智、战、心、智等多方面的能力因素有关,但是随着信息科学的发展,精英运动员之间的比赛的差距越来越小。例如:在100米自由泳项目中,冠军运动员与第8名运动员的比赛成绩,由1976年蒙特利尔奥运会中相差2.16秒减少到2016年里约奥运会上相差0.83秒。这就意味着运动员必须得付出更多的时间和精力去在这些微小的成绩差异之间进行角逐。这也就需要教练去制定更加合理的训练计划方案,对运动员每天的训练负荷情况进行有效评估,从而去了解运动员的整个状态<sup>[2]</sup>。其次,对于大众健身人群而言,在运动的过程中出现心脏病和猝死的概率虽然很小,但是经研究表明:运动时过大的负荷或是突然增加运动负荷,会让机体产生过度训练或产生意外伤害,同时也会大大增加心血管疾病的风险。然而过小的负荷对于机体没有刺激,无法达到机体锻炼的效果。所以无论是对于专业运动员还是大众健身人群,只有通过长期的适宜负荷刺激,才会使机体产生良好的适应反应,来提高运动成绩或是达到强身健体的效果<sup>[3]</sup>。由此,在制定训练计划或者运动计划的过程中,对运动负荷进行科学有效的评估成了体育科学研究的长期话题。

然而,长期以来,运动过程中运动负荷的评估方法及手段虽然一直在变化:由最开始的通过运动员自身的一些训练日志以及调查问卷进行运动负荷评估(如运动员表述的主观疲劳程度感受等),逐渐发展为以实验室采取生理学指标为依据来进行评估(如血乳酸、最大摄氧量、心率等)。但是训练日志和调查问卷受个体差异以及运动员主观性等因素影响较多,所以精准性不强。实验室所采取的生理学指标虽是做到了高精度度,而由于运动员在训练的各个周期中,其状态必须实时被监控以便于调整运动负荷以及训练内容<sup>[4]</sup>。所以对于血液样本的采集是不方便且具有创伤性的,以至于取样和监测都比较麻烦。加之监测设备昂贵,如何去选择可靠的、容易使用的、快速的、无创的以及对于训练过程没有影响的方法来评估运动负荷也是一个急待解决的问题<sup>[5]</sup>。

随着科技的发展,大量的研究都将此问题的解决方式聚焦在了心率的相关指

标上。因为许多智能可穿戴设备和智能手机 APP 都可以进行心率的实时的监控和采集,设备价格相对比较便宜且无创伤,无论是专业训练队还是大众人群都能够去接受。与此同时,有研究表明,可以通过运动后心率恢复(Heart Rate Recover,以下简称 HRR)和心率变异性(Heart Rate Variability,以下简称 HRV)等相关指标来监控自主神经系统(autonomic nervous system 简称 ANS)的状态<sup>[6]</sup>。而同时也有大量研究表明运动负荷的改变会引起自主神经系统的改变<sup>[7]</sup>。基于以上认识,笔者认为 HRR、HRV 与运动负荷的变化具有紧密的联系。所以就开展了 HRR、HRV 与运动负荷的相关性研究。旨在为运用 HRV、HRR 来估运动负荷提供一些理论参考,促进一种运动负荷新的评估方法的形成。从而进一步为我国专业运动训练效果最佳化,即通过负荷评估来选择适宜的运动负荷,避免过度训练和伤病,优化训练方案等提供有效的参考依据。同时也为大众健身锻炼效果的最佳化等提供有效的参考依据。

## 1.2 研究目的

(1)本研究主要通过测出参与者的心电信号,从中提取出能反应 HRV 和 HRR 的 RMSSD 值、TLHRV 值、 $\Delta$ HRR 值和 HRr%值,将它们分别与运动负荷进行相关分析。

(2)从分析结果出发,尝试对 HRR、HRV 与运动负荷存在相关关系的生理机制进行探讨,为运用 HRR、HRV 评估运动负荷提供一定的理论参考。

## 1.3 研究意义

### 1.3.1 理论意义

为运用 HRR、HRV 来评估运动负荷提供一定的理论参考和数据参照,对促进一种新的运动负荷评估方法的形成具有重要的理论意义。

### 1.3.2 现实意义

(1)通过研究运动的心电信号中 HRR 和 HRV 与运动负荷变化之间的规律,促进一种新的运动负荷评估方法的形成,对进一步为我国专业运动训练效果最佳化具有重要的现实意义。即通过对负荷进行即时有效的评估来选择适宜的运动负荷,

在一定程度上能避免过度训练和伤病，对优化训练方案等提供有效的参考依据。

(2) 通过研究运动的心电信号中 HRR 和 HRV 与运动负荷变化之间的规律，对促进一种新的运动负荷评估方法的形成，来指导大众选择适宜负荷锻炼，为健身锻炼效果的最佳化等提供有效的参考依据。

## 2 文献综述

### 2.1 相关概念的阐述

运动后心率恢复 (HRR) 是一个通过计算运动过程中的最大心率 (峰值心率) 和运动终止后恢复期的心率之间的差值或比值，从而来评估受试者自主神经系统功能的强弱<sup>[8]</sup>。

心率变异性 (HRV)，主要是指逐次心跳 R-R 间期之间的一种随时间变化发生波动的生理现象。此现象产生的主要生理机制是，由于交感神经和副交感神经系统对心脏窦房结起搏所起的一种相互的协调作用，具体主要表现在心电图上每个心动周期之间产生的一些不规则变化<sup>[9]</sup>。

运动负荷：负荷在相关辞典中被解释为“一定时间内承受的工作量”<sup>[10][11]</sup>。由此，运动负荷就是指运动训练过程中我们的机体在一定时间内所承受的工作量。其大小是通过一系列的负荷指标来衡定的，如机体在一定运动时间内的负重重量或做功功率<sup>[12]</sup>。所以，在本次研究中，运动负荷的大小主要由通过设定功率自行车不同的瓦数，让测试者使用其在规定时间内进行运动来体现。

### 2.2 运动后心率恢复的相关研究

运动后心率恢复 (HRR)，最开始提出来，主要是用在运动康复领域中，即通过其来评估受试者的自主神经系统，以达到对某种疾病进行预测或干预的效果。

Sheppard 等人<sup>[13]</sup>通过对 78 名心衰患者做平板实验进行了关于心率恢复异常与心力衰竭之间关系研究，表明运动后 90S 和 120S 的 HRR 值如果出现异常情况，这会是心衰患者的病情产生恶化的一个十分重要的生理临床指标。Jouven 等人<sup>[14]</sup>对运动后心率恢复异常与心源性猝死关系也进行了一个长期的跟踪实验研究，该研究选择了 5713 名健康的人群，23 年后进行调查研究，发现有 81 例人员发生猝死，研究结果表明运动后一分钟末的心率与运动中的峰值心率之差 ( $\Delta HR1$ ) 延迟是心源性猝死的重要指标。同时也有研究表明心率恢复异常是冠心病<sup>[15]</sup>和心房颤动<sup>[16]</sup>的重要临床预测指标。申慧祥等人<sup>[17]</sup>选择 60 名男兵，让其在功率自行车的不同运动负荷下进行运动，实时监控运动中和运动后的心率恢复状况。研究结论表明，在不同的运动负荷下，恢复期的心率与时间的变化存在显著性的联系，可以

通过运动后的心率来推测运动过程中的心率，同时在某种特定的运动负荷下，运动后心率恢复指标具有多次测量之后的稳定性。Heffernan 等人<sup>[18]</sup>选择了 14 名健康男性受试者，通过进行交叉抗阻训练，去研究 HRR 随着时间的变化趋势，通过一段时间的练习之后，发现受试者运动后心率恢复情况有见好转，这有可能是受试者经过了一段时间的训练，从而渐渐的适应了这样的训练运动负荷，使得运动后心率恢复指标变小，同时也可以认为是受试者的运动能力得到提高。证明了运动后心率恢复可以运用来评价运动员的心肺功能指标，长期进行耐力性运动的人员比不经常锻炼的人员运动后心率恢复要快。Darr 等人<sup>[19]</sup>的研究发现在经常训练的人群（平均  $VO_{2MAX}$  是  $60\text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ）比不经常训练的人群（平均  $VO_{2MAX}$  是  $40\text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ）运动后 HRR 值快 6 次/分钟。

以上学者都是在运动负荷条件下开展的运动后心率恢复（HRR）的有关研究，这里虽然都是将运动后心率恢复相关指标用来作为身体某种疾病预测的重要指标。但同时这也表明运动后心率恢复（HRR）指标的形成，是以在运动的机体上施加运动负荷为前提的，所以，在此基础上，我们也可以运用该指标来立与运动负荷建立联系，用该指标来评估我们的运动负荷。

## 2.3 心率变异性的相关研究

对心率变异性开展的相关研究很多，都是通过负荷运动来干预某种疾病，从而探讨负荷运动前后心率变异性指标的变化情况。

Galetta F 等<sup>[20]</sup>人通过对 20 名老年人群进行运动干预来研究小负荷运动前后心率变异性指标的变化情况，得出长时间进行小负荷有氧耐力的运动干预，可引起 HRV 指标的升高和提高日常生活能力的结论。也有对于慢性疾病患者的运动干预之后的 HRV 的变化情况研究，Nakayama 等<sup>[21]</sup>人对于高血压患者进行了为期 6 个月的小负荷运动干预，通过有效干预之后发现 HRV 频域信号中 HF 得到显著升高。对于 II 型糖尿病患者，Goit 等人<sup>[22]</sup>对 20 名受试者进行低负荷，每周运动 3 次，时间长达 6 个月的有氧运动，研究结果表明：频域信号中的 HF 也得到很大提高。SHIN K 等人对 I 型糖尿病患者进行了研究，他们对选定的 15 名实验对象进行了持续 12 周每周 3 次的小负荷运动，研究结果表明，运动可以使 TP 得到显著性的增加，同时 HF 得到显著升高<sup>[23]</sup>。Wei GX 等人<sup>[24]</sup>通过采取太极拳进行运动干预，研究表明太极拳运动通过呼吸节奏的控制能够有效的提高交感神经和副交感神经的协调控制能力，也能够提高迷走神经活性，从而影响 HRV 的变化。也有一些通过正常人群作为实验对象的研究。Nummela A 等<sup>[25]</sup>人通过对 24 名平时静坐时间较长而缺乏运动的人群进行运动干预的研究表明：每周小负荷运动时间保持在 2 小时，干预的时间达到 4 周，通过测量的 HRV 指标显示了迷走神经活性得到提高。Tulppo M

P 等<sup>[26]</sup>人对于平时运动参与较少,长时间久坐的人群进行了每周 3 次每次持续 30 分钟的中等负荷运动干预,发现经过为期 6 周的运动后,参与者的副交感神经活性增强,交感神经的活性减弱。Mclanson E I 等<sup>[27]</sup> 41 人也用中等负荷对长时间久坐正常年轻人群进行为期 12 周,每周 3 次每次持续 30 分钟的运动干预,发现经过这段时间的运动后,迷走神经的活性也有明显增强。Arto .I. Hautala 等<sup>[28]</sup>人也有研究结果表明:进行中等负荷的有氧运动与副交感神经活性增强高度相关。也有研究对一些疾病人群的研究,Borghi-Silva 等<sup>[29]</sup>人对于慢性阻塞性肺疾病患者进行中负荷的运动干预,研究结果表明:通过 6 周的练习,相对于运动前正常每搏心率 RR 间期的标准差(SNDD)得到明显的提高。通过以上的研究结果表明:通过长时间中等负荷的运动能够增大 HRV 指标,从而提高迷走神经的活性,增强体质。Kivimäki A M 等人<sup>[30]</sup>选择 26 名平时运动较少的人群进行运动干预,每周进行 3 次运动。研究大负荷间歇运动与有氧运动对于他们的自主神经功能的影响。研究结果表明:大负荷的间歇训练组的频域信号中的高频信号(HF)高于有氧运动组,从而表明大负荷的间歇运动比传统的有氧运动更能够提高自主神经系统的活性。然而,Gamelin FX 等人<sup>[31]</sup>的研究与 Kivimäki A M 等人研究结果不同。Gamelin FX 等人通过对 22 名青春期前期的儿童,进行每周训练 3 次每次 30 分钟的大负荷间歇运动干预,经过 7 周的运动干预后,受试者的有氧能力得到了改善,但是他们的自主神经功能并未得到提高。研究结果表明:通过 7 周的大负荷间歇运动并不足以改善自主神经系统的活性。

以上对于不同负荷对机体刺激的研究虽然表明了它们可能会对 HRV 造成影响,但是没有表明不同运动负荷所造成的 HRV 值变化程度。所以探讨不同负荷下 HRV 值的变化规律,对于运用 HRV 来估运动负荷,从而科学地指导运动康复、大众健身、以及竞技训练是必要的。

## 2.4 关于运动负荷评估方法的研究

本研究的目的是为了去探讨 HRV、HRR 与运动负荷之间的关系,从而为评估运动负荷提供一些理论参考。所以,对运动负荷的评估方法的相关研究进行总结整理,对本研究的实验设计以及结果讨论具有重要的借鉴意义。

在最开始,问卷调查和训练日志被使用来评估运动的负荷。运动员通过填写调查问卷来反映机体的疲劳状况,其次就是记录训练日志。其中训练日志比起调查问卷要频繁很多,基本上是每天最少记录一次<sup>[32]</sup>。关于调查问卷,最开始是针对训练人数较多的时候来使用的方法。因为调查问卷是容易操作,价格相对便宜,又不影响训练的过程,所以运用得相对较多。然而,调查问卷和训练日志的共同缺点都是运动员的填写都是主观的感受。Borresen 等人<sup>[33]</sup>的研究表明:24%



的训练者都会过高的估计他们的训练量;17%的训练者会过低的估计他们的训练量。可见,这种误差范围会严重性的影响训练计划的制定。比起实验室测得的指标数据来评定运动的负荷,运用调查问卷来评定的运动负荷信效度较低<sup>[34]</sup>。调查问卷由于细节和长度的关系,会对不同的调查对象产生不一样的理解,有些人们也会由于调查问卷的篇幅太长或者形式太单调而觉得无聊和不耐烦,这些,都会影响个人对于调查问卷填写的结果,从而使得最后的结果和实际之间出现很大的差异。运用调查问卷来量化运动过程中的运动负荷还是相对不充分的。

随着科学的发展,这样的评价方法逐渐的被一些客观的生理测量指标所代替。然而对于评定运动负荷并没有“黄金标准”<sup>[35]</sup>。这些方法总体上可以分为运用外部负荷指标和运用内部负荷指标2类的评估方法。评估外部负荷指标的方法主要包括有记录评估训练的距离,训练的时间,训练重量和训练做功的多少以及重复的次数等等;评估内部负荷指标的方法主要是测量评估运动过程中的心率(Heart Rate)、耗氧量( $VO_2$ )、血乳酸浓度(Lactate)、临界功率(Critical Power)等指标,他们在实际训练以及研究领域涉及得较多。所以有必要对内部负荷指标的评估方法进行总结研究,从而筛选出对本研究有重要的借鉴和参考意义的指标。

血乳酸的浓度的采集已经变得越来越容易是不可否认的,只需要针刺受试者的手指采集一滴血液就可以了。但是,为了去量化运动的负荷,每次都即时地去采集血液,让所有的注意力都去放在让运动的过程一直维持在相应的乳酸阈水平范围就显得不切实际<sup>[36]</sup>。有研究发现使抽出血液的血乳酸浓度维持在4 mmol/L,在该浓度下的运动负荷只是利于耐力性项目的运动员维持该负荷下训练能够产生更理想的生理适应<sup>[37]</sup>。然而,Stegmann et al 等人<sup>[38]</sup>通过研究表明,血乳酸浓度在2-7.5 mmol/L 的范围值内运动员也能产生理想的生理适应,而不仅仅是这种4 mmol/L 的“理想血乳酸浓度水平”。对于人们运用锻炼中的血乳酸浓度来表示运动的负荷,在实际的运用中仍有许多的局限性。例如外界环境中的高温、干燥等情况会影响人体血乳酸浓度;运动员处于脱水状态、运动中肌肉受伤同样会影响血乳酸的浓度<sup>[39]</sup>;以及采集血乳酸的时间、采集身体的部位、采集时所采取的工具、采集的血液量都会对最后分析血乳酸浓度有很大的影响。这些因素都会使得最终运用血乳酸浓度来评估运动负荷产生很大的影响。

临界功率(Critical power)是一个理论概念,临界功率是指运动机体在没有疲劳状态下的最大输出功率,这种临界状态能够维持在一种稳定的状态中<sup>[40]</sup>。这就给出了一种标准,通过这种标准来观看运动员在这个过程中的变化。如果,这种临界功率有生理学意义,那么就要求在锻炼过程中拥有一种稳定的状态。Brickley et 等人<sup>[41]</sup>的研究发现当在临界功率状态下做功时,运动的负荷大约在80% $VO_{2max}$ ,并且没有达到生理学的稳定,同时伴随着耗氧量、血乳酸、心率的增加。Brickley 等人认为临界功率可以界定为最高负荷但是不能维持在稳定状态,这种负荷能够

维持的时间在 20-40 分钟。Vanhataloet 等人<sup>[42]</sup>的研究表明可以将临界功率定义为很高的运动负荷，他们的研究表明：能够运用临界功率来代替传统的力竭性试验。

测量心率具有直接性和便捷性的特点，所以在不同场合不同时间里运用心率指标来评估运动负荷已经变成了一种流行的方法，例如被测试者可以在运动场或是实验室进行测量，同时可以在锻炼前、锻炼中以及锻炼后的任何时期进行测评。运用心率来监控运动负荷的主要原理是心率与做功功率之间所存在的线性关系<sup>[43]</sup>。虽然心率、最大心率的百分比在一定程度上能够被用来描述运动负荷的变化，但是心率相关指标的变化会受许多内外因素的影响：例如身体状况变化、外界环境变化，以及我们人体每天心率和最大心率百分比的变化会有一个分别接近 6 次/分<sup>[44]</sup>和<6.5%<sup>[45]</sup>的差值。所以仅仅使用心率或者最大心率来表示运动负荷还不能达到评估的准确性。同时生理学的基础表明选择的心率指标不一样，所反映的心理学意义就有所不同<sup>[46]</sup>，对于体能、过渡训练和运动实际表现敏感性也是有所不同的<sup>[47]</sup>。大量的研究表明，与运动中的心率以及最大心率百分比相比，心率变异性（HRV）以及运动后心率恢复（HRR）指标可作为更好的指标，运用 HRV 和 HRR 指标比直接用最大心率的百分比（HR<sub>MAX</sub>%）来评估运动的运动负荷更加的准确<sup>[48]</sup>。并且 HRR 指标和 HRV 指标都是紧密联系到自主神经系统（ANS）活性的<sup>[49]</sup>。该研究的理论认识为本研究去探讨运动负荷与 HRR 和 HRV 指标之间的具体联系提供了思路 and 理论参考。

有研究表明耗氧量（VO<sub>2</sub>）和运动做功之间存在着线性关系，这种关系是人们普遍认可的<sup>[50]</sup>。在运动的过程中耗氧量已经作为一种评定运动负荷的重要指标。最大摄氧量（VO<sub>2max</sub>）是指长时间进行激烈的运动过程中使呼吸系统到达极限，此时单位时间内摄入的氧量一般用来表示机体的有氧能力。无论是在生理学指标还是动力学指标的表现中，耗氧量的相对指标（%VO<sub>2max</sub>）比起绝对指标（VO<sub>2</sub>）更加能够表达运动的负荷，同时在周期性耐力性运动中，运用%VO<sub>2max</sub> 能够有效的反映运动的运动负荷<sup>[51]</sup>。由于能量消耗和摄氧量相关，同时能量消耗和运动负荷也相关，所以可以用最大摄氧量百分比 VO<sub>2max</sub>%来确定我们的运动负荷。同时，运动负荷也可根据最大摄氧量的百分比来分为 5 个等级：小负荷：接近于或低于本人 VO<sub>2max</sub> 的 50%；中等负荷：接近于本人 VO<sub>2max</sub> 的 55%~65%；亚极量负荷：接近于本人 VO<sub>2max</sub> 的 70%~80%；近极量负荷：接近于本人 VO<sub>2max</sub> 的 85%~90%；极量负荷：接近于本人 VO<sub>2max</sub> 的 95%~100%<sup>[52]</sup>。此指标对负荷的等级评定标准能够帮助本研究确定各阶段的运动负荷，所以最大摄氧量评估运动负荷的方法对本研究的实验设计具有借鉴和参考意义。

## 2.5 相关指标的确定

心率指标的采集可以是多种形式的,通常人们运用的最多的指标是运动过程中的最大心率( $HR_{MAX}$ )或者最大心率的百分比( $HR_{MAX}\%$ )这样来进行运动负荷的简单界定。但随着科学的发展也新生了心率的衍生物即运动后心率恢复和心率变异性,大量的研究表明运用 HRR 和 HRV 指标比直接用  $HR_{MAX}\%$  来评估机体运动过程中的机能状态更加的准确<sup>[53]</sup>,因为运动后心率恢复是反映在运动后的整个过程中交感神经活性的受到抑制以及去追踪副交感神经活性的信号。

### 2.5.1 反映 HRR 的相关指标确定

影响运动后心率恢复的主要机制包括:心输出量和血压的调控,类似于麦太保反射刺激一样<sup>[54]</sup>。然而,对于运动后心率恢复与运动后这些生理机制的变化之间发现了大量的信息<sup>[55]</sup>。对于 HRR 的分析方法包括运动后一段时间(一般是 60 秒)心率的绝对值或者这段时间的均值,以及基于一些线性模型来分析 HRR;指数和非指数模型去获取一些参数,其中包括:时间常数和渐进值<sup>[56]</sup>。然而分析运动后的绝对值与运动中的峰值心率之间的关系来表达 HRR 指标更加的适用。因为它能够反映心脏副交感神经的变化量<sup>[57]</sup>。该指标的变异系数(CV)值小更加的稳定<sup>[58]</sup>。在实际的测量操作中 HRV 和 HRR 指标记录时:对身体的姿势,无论是标准站位、一般站位、坐姿和仰卧位对于副交感神经活性都没有影响<sup>[59]</sup>。所以,大量的研究就主要运用以下 2 种指标来反应运动后心率恢复:

(1)  $\Delta HRR$ : Framingham 心脏研究中心将  $\Delta HRR$  定义作为,在进行平板支撑实验之后的第 1 分钟末、第 2 分钟末、第 3 分钟末等的心率值与运动过程中的峰值心率之差的值。最开始提出来是为了评价受试者的心脏自主神经系统<sup>[60]</sup>。如公式 1 所示其中: HRT 是指运动后恢复期的心率(T 是一个时间常数;即运动后 1 分钟末;运动后 2 分钟末;运动后 3 分钟末;运动后 4 分钟末;运动后 5 分钟末等);  $HR_{max}$  指运动过程中的峰值心率。作为运动后心率恢复指标中首次被普遍采用的指标是  $\Delta HRR$ ,  $\Delta HRR$  能够与身体的机能状况建立紧密的联系,对于心脏病变事件和全球死因具有十分重要的预测作用和价值<sup>[61]</sup>。在运动训练过程中,  $\Delta HRR$  能够反映机体对于运动训练的适宜状态,同时也被推荐作为人体机能水平的综合检验指标<sup>[62]</sup>。  $\Delta HRR$  反映了受到外界运动负荷刺激后恢复期心率相对运动过程中的最大心率的变化情况。有研究对  $\Delta HRR$  的重复性测试,2 次测试结果表明,2 次测试组间无明显差异( $P>0.05$ ),组内相关系数( $ICC=0.915$ ),这就可以证明运用  $\Delta HRR$  值来评估身体的机能状态具有极强的稳定性和可靠性<sup>[63]</sup>。同时也能证明运用  $\Delta HRR$  值来代表运动后心率恢复来反映机体受到外界运动负荷刺激后,恢复期心率相对运动过程中的最大心率的变化情况是具有极强的稳定性和可靠性<sup>[64]</sup>。所

以本研究尝试建立 $\Delta\text{HRR}$  与不同运动负荷之间的关系研究。

$$\Delta \text{HRR} = \text{HRmax} - \text{HRT} \quad \text{公式 1}$$

注:  $\Delta\text{HRR}$ : 运动中峰值心率与运动终止后恢复期某一时间点心率的差值

$\text{HRmax}$ : 峰值心率值;

$\text{HRT}$ : 运动后恢复期的平均心率 (T 代表时间常数; 运动后 1 分钟; 运动后 2 分钟; 运动后 3 分钟; 运动后 4 分钟; 运动后 5 分钟)

(2)  $\text{HRr\%}$ ; 如公式 3 所示:  $\text{HRstage1}$  是指在运动结束后 15S 的平均心率;  $\text{HR1min}$  指在运动后 1 分钟的平均心率。本研究选择  $\text{HRr\%}$  指标来作为运动后心率恢复指标, 是因为运动后 15 秒和运动后 1 分钟的心率都能够相当精确地去侦察到随着不同的运动负荷条件下的细微变化<sup>[65]</sup>。同时, 运动后心率恢复的百分比 ( $\text{HRr\%}$ ) 是一个很好的指标, 能够反映出由于受到不同的运动负荷的刺激机体的疲劳累积和身体机能恢复的状态<sup>[66]</sup>。所以本研究尝试建立  $\text{HRr\%}$  与 3 种不同运动负荷 (50%、70%、90%) 之间的联系研究。

$$\text{HRr\%} = \left( \frac{\text{HRstage1} - \text{HR1min}}{\text{HRstage1}} \right) \times 100\% \quad \text{公式 2}$$

注:  $\text{HRr\%}$ : 运动后心率恢复的百分比

$\text{HRstage1}$ : 运动结束后 15S 的平均心率;

$\text{HR1min}$ : 运动后 1 分钟的平均心率

## 2.5.2 反映 HRV 的相关指标确定

心率变异性的分析方法已经运用发展得较为成熟, 常见的主要有以下的 3 种: 时域分析; 频域分析, 线性分析。

时域分析包括: (1) 连续正常 RR 间期的标准差 (standard deviation of the NN interval 简称 SNDD), 这个指标能够反映心率变异总的变化。(2) 相邻 RR 间期之差的均方根值。(root mean square of SDs between adjacent NN intervals 简称 RMSSD), 反映交感神经和副交感神经的综合调节。(3) 相邻正常 RR 间期差值大于 50 毫秒的个数占总心跳次数的百分比 (percentage of successive interval differences larger than 50 ms 简称 PNN50), 反映心率变异的大小。

频域分析包括: (1) 低频功率 (low frequency 简称 LF); LF 的标准化值 normalized LF 简称 LFn) 反映交感神经和副交感神经的综合调节。(2) 高频功率 (high frequency 简称 HF); HF 的标准化值 (normalized HF 简称 HFn), 反映副交感神经的调节。(3)

低频功率与高频功率比值(LF/HF),反映交感神经和副交感神经的均衡性。

非线性分析包括:(1)正常RR间期的标准差(对应纵坐标)standard descriptor 1 简称SD1),主要反映副交感神经对心脏的调节。(2)正常RR间期的标准差(对应横坐标)(standard descriptor 2 简称SD2),反映交感神经和副交感神经的综合调节。

虽然HRV的分析指标和分析的方法有很多种,但是有大量的研究认为时域分析的方法比频域分析和线性分析的方法更加的准确<sup>[67]</sup>。例如:时域信号中的相邻RR间期之差的均方根值(RMSSD)与频域信号中的高频信号(HF)都是反映迷走神经活性的指标。但是二者的稳定性有很大的差别,相邻RR间期之差的均方根值(RMSSD)的变异系数CV远低于高频信号(HF)<sup>[68]</sup>。所以,本研究就选择稳定性较高的RMSSD值作为反应心率变异性的指标。

本研究所采取的指标是时域信号里面的连续相邻RR间期之差的均方根值(RMSSD),主要有一下原因:

- 1、RMSSD它能够代表短时间HRV指标的变化情况,并且它的变化是受到迷走神经的支配所导致的<sup>[69]</sup>。
- 2、HRV里面RMSSD的指标广泛被使用在运动生理领域<sup>[70]</sup>。
- 3、RMSSD指标它不会受到呼吸频率的影响,同时可以接受非仰卧的姿势的测量,有利于实验过程的操作。
- 4、这个指标能够及时的采集,对于运动员的评价具有极高的价值。
- 5、RMSSD的指标能够很容易的在Excel中进行计算。

对于大量的研究都是选取5分钟作为节点来进行评价的<sup>[71]</sup>。2SDANN(Standard Deviation of Average NN Intervals in all 5min Segments of the entire recording,全程每5min段R-R间期平均值的标准差),通常用以检测长于5min的周期成分所引起的变异。3SDNN index(基于24h记录的每5minRR间期标准差的平均值),用以测量短于5min的周期所引起的变异。所以本研究也选择5分钟的时间点。包括运动前-5到0分钟的阶段(Pre5);运动终止后0到5分钟的阶段(Post5);运动终止后30到35分钟的阶段(Post30);通过检测安静状态下和运动后的HRV指标能够去分析运动过程中心血管系统所承受的负荷压力和运动后的恢复状态,该研究是目前监控运动员的个体运动适应状态和个体的自主神经系统的功能状态的一种非常具有潜力性的研究方法体系<sup>[72]</sup>。本研究选择运动后休息时期的30-35分钟作为时间点,来提取这个时间段的5分钟,是因为之前大量的研究表明,30分钟这个时间点来能够很好的反映休息状态恢复状态的一个时间“中点”<sup>[73]</sup>。

无论是专业运动员还是大众健身人群,都会面临一个问题就是,身体的状态并不总是恒定保持不变的。外界的因素:环境、气温、饮食、睡眠质量、个人生理周期性的变化。还有就是训练因素,一个不可否认的因素是,随着训练的增强,运动员或者健身人群会逐渐的适应之前的运动负荷,例如:之前认为是中等负荷

的运动，也许现在只是小负荷的运动。这些因素的变化，就使得运动负荷的评估不是一成不变的，也不是一蹴而就的。根据时间运用运动前的 5 分钟 Pre5 减去运动后休息状态 5 分钟 Post5；即：Pre5- Post5，为了观察运动负荷对于身体迷走神经级活性和副交感神经影响的大小，。运用休息后的 30-35 分钟中的 5 分钟减去运动后 5 分钟；即 Post30-Post5，为了反映该负荷状态下的休息状况。同时为了减少日常活动；睡眠；饮食和个人身体状况的改变等因素的影响。我们还去求得了他的一个比值；即：Pre5- Post5/ Post30-Post5。运用这个比值能够去评估运动负荷。具体公式表示为如下：所以为了进一步深入分析 HRV 与运动负荷之间关系。本研究在 HRV 相关的 RMSSD 值采集的过程中会进一步运用该公式进行计算。

$$TL_{HRV} = \frac{Pre5 - Post5}{Post30 - post5} \quad \text{公式 3}$$

注： TL<sub>HRV</sub>：表示运用心率变异性来评定运动负荷值

Pre5:表示 Pre5 阶段 RMSSD 值

Post5：表示运动后 5 分钟 RMSSD 值

Post30：表示运动后 30-35 分钟的 RMSSD 值

### 3 研究对象

本研究的对象是运动后心率恢复、心率变异性与运动负荷之间的相关性。

## 4 研究方法

### 4.1 实验研究法

#### 4.1.1 实验场地和器材

本次实验在成都体育学院健康大厦实验中心的体育测量与评价实验室进行。

实验的主要器材包括(如图 1 所示)：Erdoline GmbH 公司生产的 ers.2ergoline 心肺功能康复系统功率自行车、北京泽澳医疗科技有限公司生产的便携式最大摄氧量测试设备(品牌：德国 CORTEX，信号：MetaMax 3B)。还有实验耗材：由上海钧康医用设备有限公司生产的 JK-1(A-H)型一次性心电电极片。



图1 ers.2ergoline 功率自行车、便携式最大摄氧量测试设备以及电极片

#### 4.1.2 实验内容设计

##### 1、实验对象

实验对象选自成都体育学院大三年级单招散打专项自愿者男生 28 名，平均竞技运动水平已达 2 级以上，身体四肢无残疾，无运动性障碍，无呼吸系统、心血管系统疾病和运动系统疾病，年龄  $22 \pm 1$  岁，身高  $176 \pm 5$  CM，体重  $72.6 \pm 8.6$  kg，静息心率  $57 \pm 6$  次/分，最大心率在  $195 \pm 7$  次/分，最大摄氧量  $48 \pm 6$  ml/kg\*min。测试的过程中没有出现运动损伤现象。

##### 2、实验注意事项

实验总进行时间约 3 个月。每个受试者分别参与 4 次以上的实验。整个过程中，为了避免其它因素对心电信息造成干扰，受试者禁止喝酒和服用咖啡因等禁忌食品，在测试当天避免其它一切运动安排。且每个人每周只能在自己固定的一天测试一次，如周一的被测对象就只能在每周的周一进行实验。

##### 3 实验步骤

第一步，运用 ers.2ergoline 心肺功能康复系统的功率自行车和的便携式最大摄氧量系统测试每个人的最大摄氧量。本次最大摄氧量的测试方案为直接测试。具体实施过程为：将便携式最大摄氧量测试设备蓝牙链接到电脑，被测对象佩戴该设备在功率自行车上（见图 2）以 100W 作为起始负荷运动 3 分钟，之后以每 3 分钟递增 50W 来的负荷作为下一个阶段的负荷，整个运动过程始终使功率自行车转速匀速保持在  $70 \pm 5$  转/分钟，直至某一负荷状态下不能保持该转速。此时电脑的专用分析软件会自动算出该名受试者的最大摄氧量数值。





图 2 实验进行图

第二步，根据所测运动员的  $VO_2\max$  的百分比来因人而异的确定大、中、小负荷。即将  $50\%VO_2\max$  作为小负荷， $70\%VO_2\max$  作为中等负荷， $90\%VO_2\max$  为大负荷。

第三步，采集受试者的心电信息（ECG）。如图 3 所示，首先，将电极片固定在受试者的待测部位，将功率自行车上的心电导联线的电极分别扣在电极片上，其中红色扣于右锁骨下一指处，黄色扣于两乳头连线中点处，黑色扣于左边第五肋与左腋前线交点处。其次，受试者在佩戴设备的状态下保持安静，平和地休息 5 分钟后，在功率自行车设定的负荷下骑行 20 分钟，运动终止后同样佩戴设备保持安静，平和地休息 35 分钟。整个过程耗时 60 分钟，时间分配如图 4 所示。链接功率自行车的电脑会完整地记录整个过程的心电信息。



图 3 受试者针对不同负荷运动过程的心电信息采集图



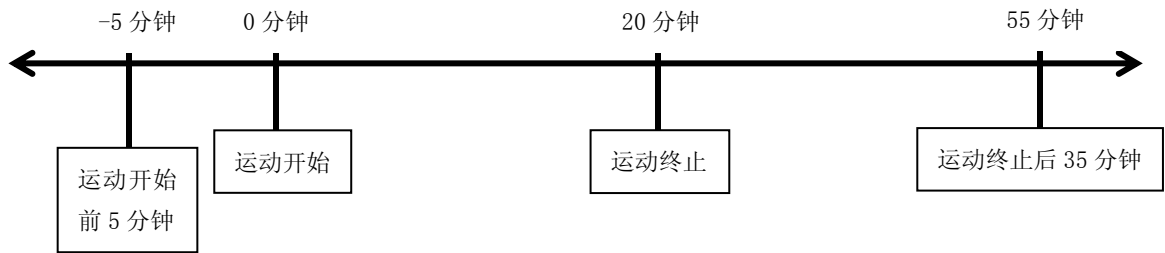


图 4 受试者运动过程时间分配图

#### 4.1.3 实验指标的采集

##### 1、HRR 指标采集

本研究选择了两个能反应运动后心率恢复的指标，即 $\Delta HRR$ 和 $HRr\%$ ，具体计算公式如下：

(1)  $\Delta HRR$ :指用运动过程中的峰值心率减去运动后恢复期的心率（如公式 1 所示）

$$\Delta HRR = HR_{max} - HRT \quad \text{公式 1}$$

注： $HR_{max}$ ：峰值心率值；

$HRT$ ：运动后恢复期的平均心率（ $T$ 代表时间常数；运动后 1 分钟；运动后 2 分钟；运动后 3 分钟；运动后 4 分钟；运动后 5 分钟）

(2)  $HRr\%$ ：运动结束后 15S 和 1 分钟的平均心率之差与运动结束后 1 分钟的平均心率的百分比（如公式 2 所示）： $HR_{stage1}$ 是指在运动结束后 15S 的平均心率； $HR_{1min}$ 指在运动后 1 分钟的平均心率。

$$HRr\% = \left( \frac{HR_{stage1} - HR_{1min}}{HR_{stage1}} \right) \times 100\% \quad \text{公式 2}$$

注： $HR_{stage1}$ ：运动结束后 15S 的平均心率；

$HR_{1min}$ ：运动后 1 分钟的平均心率

##### 2、HRV 指标采集

本研究选择了两个能反应心率变异性的指标，即 $RMSSD$ 和 $TL_{HRV}$ 。

(1) 实验完成后，对受试者的心电信息进行各个时间阶段每个 R-R 间期值的

采集（每个负荷条件下需要采集 R-R 间期值的运动时间段主要有 3 个，如图 5 所示：一、运动前静息状态下的-5 分钟~0 分钟，以下称为 Pre5；二、运动终止后休息状态下的 0—5 分钟，以下称为 Post5；三、运动终止后休息到 30 分钟以后的 5 分钟，以下称为 Post30）。

然后分别计算这三个阶段的 R-R 间期值的差值均方的平方根，即 RMSSD 值。

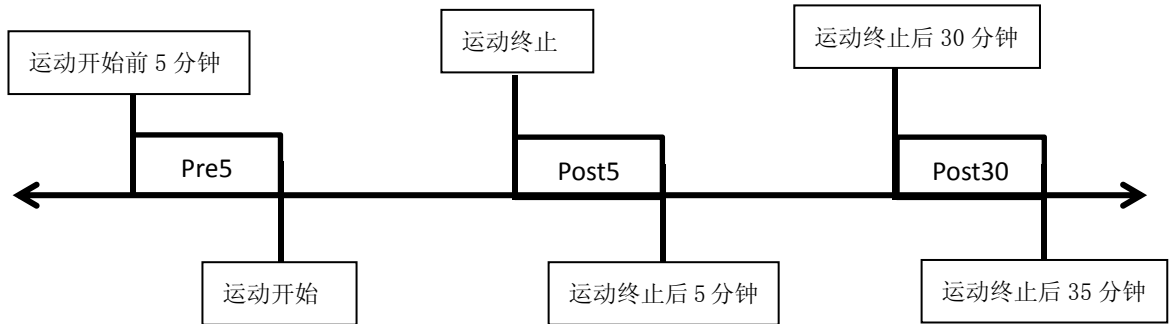


图 5 各指标采集阶段时间分配图

(2)  $TL_{HRV}$ : 运用每个阶段的 RMSSD 值进行如下公式的计算:

$$TL_{HRV} = \frac{Pre5 - Post5}{Post30 - post5} \quad \text{公式 3}$$

注:  $TL_{HRV}$ : 表示运用心率变异性来评定运动负荷值

Pre5:表示 Pre5 阶段 RMSSD 值

Post5: 表示运动后 5 分钟 RMSSD 值

Post30: 表示运动后 30-35 分钟的 RMSSD 值

## 4.2 数理统计法

运用 SPSS19.0 统计分析软件来检验所有指标数据的正态分布性、差异性，以进一步进行 HRR、HRV 相关指标与运动负荷的相关性分析。

(1) 正态性检验: 本研究采用 Shapiro-Wilk 检验 (W 检验)，检验 HRV 和 HRR 指标变量是否符合正态性分布。

(2) 单因素方差分析: 如果数据满足正态分布，则选择单因素方差分析 (One-way analysis of variance) 检验在不同负荷训练下各个时间点的 HRV 值的差异显著性，在进行方差检验的时候都需要进行方差检验，如果方差齐性。可以选择 Tukey 事后检验 (Tukey post hoc test) 进行两两比较。同时可以计算组间偏  $\eta^2$  (Partial eta-squared)， $\eta_p^2$  能够作为计算组间自变量对因变量变异的解释程度，大于 0.1 效应量小，0.25 左右效应量中等，大于 0.4 效应量大。

(3) 用 Cohen's d 系数 (ES) 计算两组数据之间差异的效应量, ES<0.2 效应量小; ES 接近 0.5 效应量中等; ES>1.2 效应量很大; ES>2.0 效应量非常大。计算公式如下:

$$\text{Cohen's } d = \frac{M_1 - M_2}{S_P^2}$$

$$S_P^2 = \sqrt{\frac{(N_1 - 1)S_1^2 + (N_2 - 1)S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$$

(4) 运用斯皮尔曼等级相关系数 (Spearman's rank correlation coefficient) 分析运动的负荷所对应的功率自行车的功率与 HRR 和 HRV 所对应的指标值之间的相关性。R 值被用来表示相关系数, R 值在 0.1-0.3 之间表示相关性较小; R 在 0.3-0.5 之间表示相关性适中; R 在 0.5-0.7 之间表示相关性比较大; R 在 0.7-0.8 之间表示相关性很大; R 在 0.9-1 之间表示相关性非常相关, 达到完美状态。

### 4.3 逻辑分析法

将收集的信息、文献与收集整理的数据进行分析和综合、分类与对比、归纳与演绎。运用相关学科中的理论, 实验研究结果进行分析讨论, 总结出 HRR、HRV 相关指标与运动负荷存在相关性的生理机制。

## 5 研究结果

### 5.1 运动后心率恢复与运动负荷的相关研究

#### 5.1.1 运动后心率恢复相关数据的检验

任何数据在进行相关的分析之前, 都需要对该数据进行相关的正态性分布检验、方差齐性检验或单因素方差分析等, 以确保样本数据具有统计学意义。

##### 5.1.1.1 不同运动负荷条件下 $\Delta$ HRR 值单因素方差分析

本研究通过实验测试, 采集并计算出了不同的运动负荷下的  $\Delta$ HR1、 $\Delta$ HR2、 $\Delta$ HR3 值 (详细值见表 1)

表 1 不同运动负荷下 $\Delta$ HRR 数值一览表

人数序号	运动负荷	$\Delta$ HR1	$\Delta$ HR2	$\Delta$ HR3
1	50%	60	58	61
2	50%	58	60	60
3	50%	57	62	59
4	50%	59	56	62
5	50%	58	58	64
6	50%	59	62	65
7	50%	62	58	60
8	50%	63	62	60
9	50%	57	61	59
10	50%	56	60	59
11	50%	59	57	62
12	50%	63	56	63
13	50%	62	56	64
14	50%	61	57	59
15	50%	60	62	60
16	50%	56	64	63
17	50%	57	63	54
18	50%	59	62	53
19	50%	60	64	54
20	50%	62	62	56
21	50%	57	57	57
22	50%	60	56	58
23	50%	59	58	60
24	50%	58	59	62
25	50%	63	59	63
26	50%	61	58	60
27	50%	60	60	61
28	50%	62	61	62
1	70%	49	64	70
2	70%	48	65	73
3	70%	50	67	70

4	70%	51	64	72
5	70%	46	63	74
6	70%	52	62	73
7	70%	47	60	75
8	70%	50	61	76
9	70%	49	64	70
10	70%	51	63	68
11	70%	47	58	69
12	70%	48	57	70
13	70%	49	60	69
14	70%	52	62	68
15	70%	50	63	70
16	70%	51	64	71
17	70%	49	66	72
18	70%	49	57	73
19	70%	48	58	72
20	70%	50	58	69
21	70%	47	57	70
22	70%	49	60	69
23	70%	52	62	70
24	70%	48	64	68
25	70%	47	63	67
26	70%	53	62	68
27	70%	47	60	69
28	70%	53	59	73
1	90%	42	67	71
2	90%	42	69	69
3	90%	41	70	73
4	90%	40	65	70
5	90%	43	64	69
6	90%	42	70	74
7	90%	45	71	73
8	90%	43	74	72
9	90%	39	73	69
10	90%	40	72	68

11	90%	38	74	69
12	90%	40	70	70
13	90%	45	68	67
14	90%	42	65	67
15	90%	42	64	68
16	90%	40	66	69
17	90%	41	67	70
18	90%	39	65	69
19	90%	38	70	73
20	90%	37	69	71
21	90%	40	68	70
22	90%	41	66	73
23	90%	40	65	76
24	90%	39	68	75
25	90%	38	69	73
26	90%	42	69	69
27	90%	41	70	72
28	90%	40	68	69

经检验，以上数据是满足正态分布和方差齐性的 ( $P>0.05$ )。所以可以进一步对不同负荷下的 $\Delta\text{HRR}$ 值组间变化差异情况进行单因素方差分析，同时计算出了组间偏 $\eta^2$ 方 $\eta_p^2$ ，从而了解组间的差异性的大小。检验结果如下（见表2）：

（1）、 $\Delta\text{HR1}$ 值对于50%运动负荷与70%运动负荷之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，对于50%运动负荷与90%运动负荷之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，对于70%运动负荷与90%运动负荷之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，它们组间偏 $\eta^2$ 方 $\eta_p^2=0.937>0.4$ 组间效果量大；

（2）、 $\Delta\text{HR2}$ 值对于50%运动负荷与70%运动负荷之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，对于50%运动负荷与90%运动负荷之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，对于70%运动负荷与90%运动负荷之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，它们组间偏 $\eta^2$ 方 $\eta_p^2=0.665>0.4$ 组间效果量大；

（3）、 $\Delta\text{HR3}$ 值对于50%运动负荷与70%运动负荷之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，对于50%运动负荷与90%运动负荷之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，对于70%运动负荷与90%运动负荷之间不具有显著性差异 ( $P>0.05$ )，它们组间偏 $\eta^2$ 方 $\eta_p^2=0.993>0.4$ 组间效果量大；

表 2 不同运动负荷下 $\Delta$ HRR 值单因素方差分析结果

运动负荷	50%运动负荷	70%运动负荷	90%运动负荷
$\Delta$ HR1 (次)	59.57 $\pm$ 2.15★	49.35 $\pm$ 1.96*	40.35 $\pm$ 1.96★*
$\Delta$ HR2 (次)	59.57 $\pm$ 2.54★	61.53 $\pm$ 2.83*	68.42 $\pm$ 2.84★*
$\Delta$ HR3 (次)	60.45 $\pm$ 3.07★	70.64 $\pm$ 2.31*	70.74 $\pm$ 2.39*

注：\*  $P < 0.05$ ，与 50%运动负荷比较；★  $P < 0.05$ ，与 70%运动负荷比较；

### 5.1.1.2 不同运动负荷条件下 HRr%值组间差异性检验

本研究通过实验测试，采集并计算出了不同的运动负荷下的 HRr%值（详细值见表 3）

表 3 不同运动负荷下 HRr%数据值一览表

人数序号	50%运动负荷下 HRr%数据值	70%运动负荷下 HRr%数据值	90%运动负荷下 HRr%数据值
1	18.699%	10.276%	7.609%
2	19.675%	12.984%	5.870%
3	19.376%	11.976%	5.672%
4	21.653%	9.563%	8.532%
5	19.347%	8.653%	9.652%
6	23.975%	9.853%	9.352%
7	16.388%	10.983%	8.671%
8	23.977%	14.536%	9.373%
9	22.654%	8.270%	6.873%
10	23.875%	12.087%	5.865%
11	21.362%	13.986%	5.782%
12	22.539%	12.964%	4.382%
13	20.981%	14.982%	9.653%
14	19.732%	12.367%	8.563%
15	19.543%	13.765%	6.538%
16	19.632%	12.865%	4.556%
17	18.382%	12.965%	4.398%
18	19.875%	11.630%	6.320%

19	18.372%	12.864%	9.873%
20	19.578%	10.562%	5.986%
21	20.864%	12.864%	8.644%
22	21.976%	10.965%	7.983%
23	22.987%	9.634%	6.984%
24	23.064%	10.640%	7.983%
25	20.086%	13.982%	9.382%
26	23.070%	9.362%	6.983%
27	20.634%	11.673%	6.382%
28	17.937%	12.763%	9.382%

通过非参数多个独立样本率的检验,进一步采用 Kruskai-Wallis H (K) 的检验方法进行显著性检验,研究结果表明(如表 4 所示):对于 50%运动负荷与 70%运动负荷之间 HRr%值具有显著性差异 ( $P<0.05$ ),Cohen's d 系数 ( $ES=4.67>2.0$ ) 组间效果量非常大,对于 50%运动负荷与 90%运动负荷之间 HRr%值具有显著性差异 ( $P<0.05$ ),Cohen's d 系数 ( $ES=7.12>2.0$ ) 效果量非常大,对于 70%运动负荷与 90%运动负荷之间 HRr%值具有显著性差异 ( $P<0.05$ ),Cohen's d 系数 ( $ES=2.48>2.0$ ) 效果量非常大。

表 4 不同运动负荷下 HRr%值组间显著性检验分析结果

	50%运动负荷 (%)	70%运动负荷 (%)	90%运动负荷 (%)
HRr%值	20.72±2.01★	11.78±1.80*	7.40±1.72*★

注: \*  $P<0.05$ , 与 50%运动负荷比较; ★  $P<0.05$ , 与 70%运动负荷比较;

### 5.1.2 $\Delta$ HRR 值与运动负荷之间的相关性分析

为了验证运动负荷与 $\Delta$ HRR 之间存在关系,从而进行了运动负荷与 $\Delta$ HRR 之间的相关性分析。研究结果如表 5 所示:

(1)、 $\Delta$ HR1 与运动负荷的相关系数  $R=-0.862$ , ( $P<0.05$ ), 表示相关性很大,如散点图 6 所示。

(2)、 $\Delta$ HR2 与运动负荷的相关系数  $R=0.777$ , ( $P<0.05$ ); 相关性很大,如散点图 7 所示。

(3)、 $\Delta$ HR3 与运动负荷的相关系数  $R=0.607$  ( $P<0.05$ ); 表示相关性比较大,如散点图 8 所示。



表 5 运动负荷与 $\Delta$ HRR 值相关系数一览表

运动负荷	相关系数 (R)
$\Delta$ HR1	-0.862 *
$\Delta$ HR2	0.777 *
$\Delta$ HR3	0.607 *

注: \*  $P < 0.05$ ,

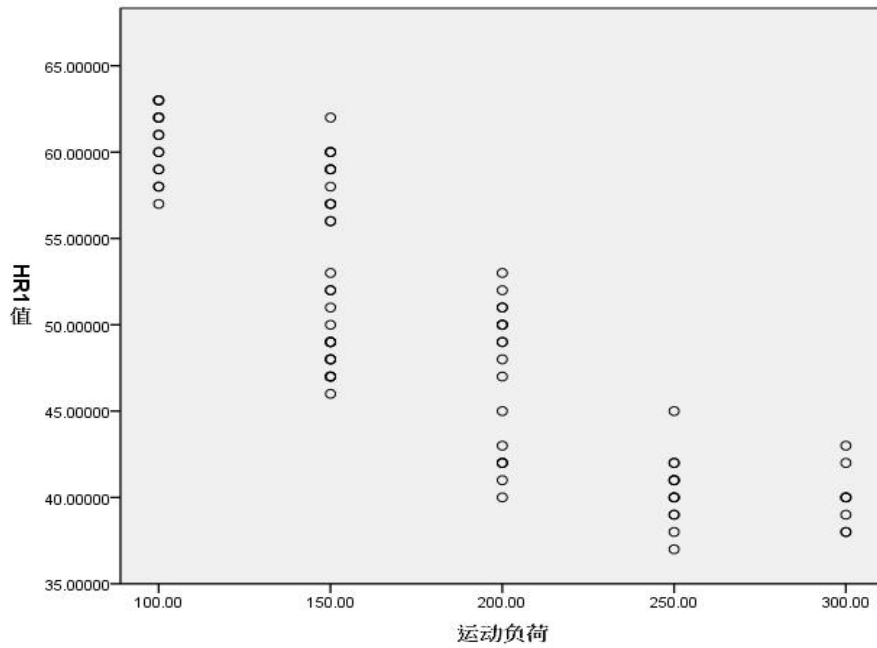


图 6 不同的运动负荷与 $\Delta$ HR1 的相关性散点分布图

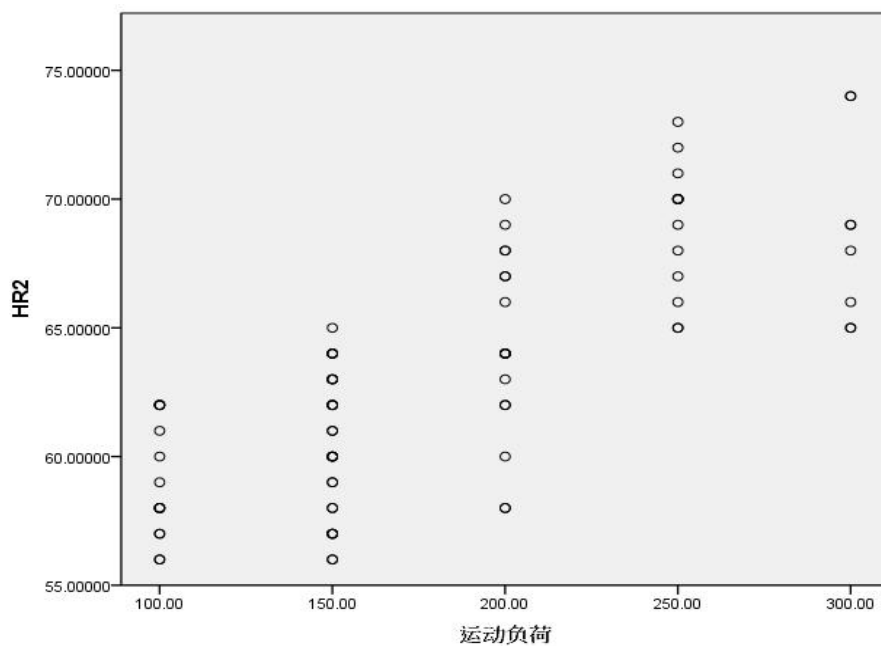


图 7 不同的运动负荷与 $\Delta$ HR2 的相关性散点分布图

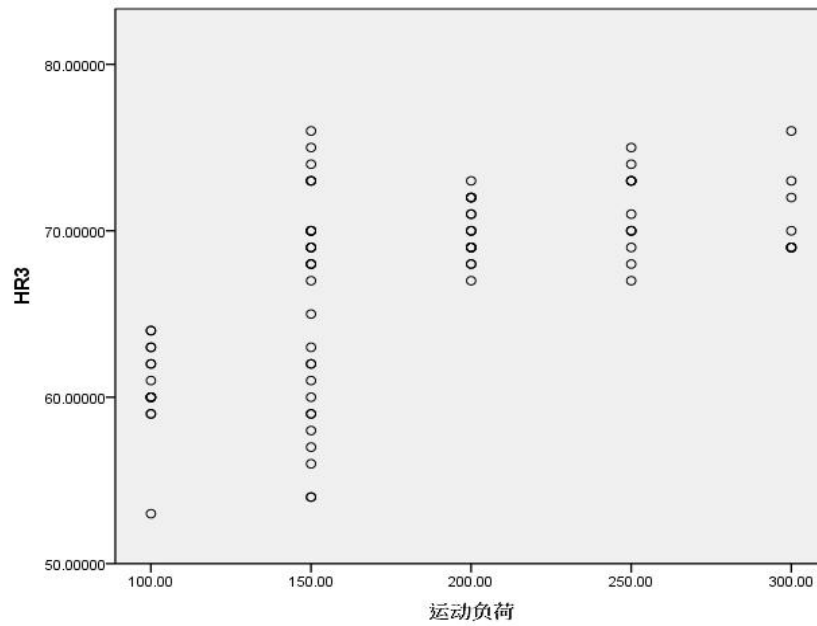


图 8 不同的运动负荷与 $\Delta$ HR3 的相关性散点分布图

### 5.1.3 HRr%值与运动负荷之间的相关性分析

为了进一步的了解运动后恢复心率与运动负荷之间的关系而进行两两运动负荷与 HRr%值的相关分析。得出相关系数系数  $R = -0.829$ ; ( $P < 0.05$ ), 表明运动后 HRr%值与运动负荷的相关性非常大 (见表 6、图 9)。

表 6 运动负荷与 HRr%值相关系数一览表

相关系数 (R)	
HRr%	-0.829 *

注: \*  $P < 0.05$ ,

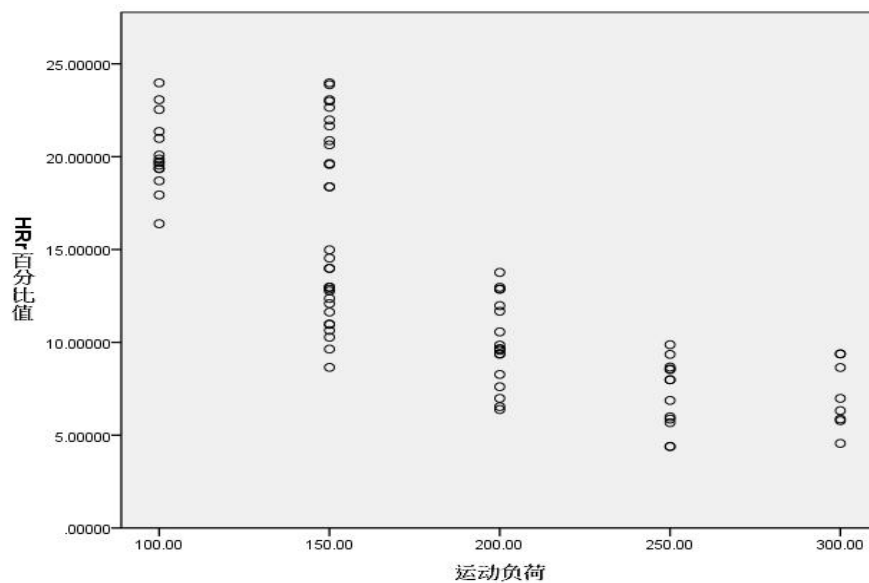


图 9 不同的运动负荷与 HRr%的相关性散点分布图

## 5.2 心率变异性与运动负荷的相关研究

### 5.2.1 心率变异性相关数据的检验

#### 5.2.1.1 相同运动负荷条件下各时间段 RMSSD 值的单因素方差分析

本研究通过实验测试,采集并计算出了不同的运动负荷下运动前后3个阶段受试者的RMSSD值(详细值见表7),分别是运动前-5分钟~0分钟(以下称为Pre5)的RMSSD值,运动后休息状态下的5分钟,即运动后0—5分钟(以下称为Post5)的RMSSD值,运动终止后休息到30分钟以后的5分钟(以下称为Post30)的RMSSD值。

表7 不同负荷下各阶段的RMSSD值一览表

序号	运动负荷	Pre5	Post5	Post30
1	50%负荷	76	50	81
2	50%负荷	72	46	73
3	50%负荷	72	41	72
4	50%负荷	76	46	74
5	50%负荷	73	44	78
6	50%负荷	76	48	75
7	50%负荷	73	46	80
8	50%负荷	69	52	80
9	50%负荷	81	41	79
10	50%负荷	80	48	73
11	50%负荷	72	34	77
12	50%负荷	71	38	80
13	50%负荷	74	41	81
14	50%负荷	75	45	82
15	50%负荷	76	47	83
16	50%负荷	82	46	79
17	50%负荷	70	47	71
18	50%负荷	76	42	81
19	50%负荷	83	48	75
20	50%负荷	76	43	72
21	50%负荷	78	39	72
22	50%负荷	77	43	72
23	50%负荷	78	37	82
24	50%负荷	82	36	71

25	50%负荷	84	42	80
26	50%负荷	76	45	76
27	50%负荷	84	48	76
28	50%负荷	79	40	74
1	70%负荷	72	34	68
2	70%负荷	79	31	64
3	70%负荷	81	35	50
4	70%负荷	73	33	59
5	70%负荷	72	38	63
6	70%负荷	74	34	59
7	70%负荷	70	28	61
8	70%负荷	76	31	64
9	70%负荷	70	29	56
10	70%负荷	69	27	58
11	70%负荷	74	29	68
12	70%负荷	72	34	64
13	70%负荷	73	27	62
14	70%负荷	74	26	61
15	70%负荷	74	28	54
16	70%负荷	75	20	51
17	70%负荷	84	31	58
18	70%负荷	69	21	65
19	70%负荷	76	23	57
20	70%负荷	74	24	56
21	70%负荷	75	32	64
22	70%负荷	71	31	59
23	70%负荷	74	28	60
24	70%负荷	73	30	61
25	70%负荷	78	29	58
26	70%负荷	84	24	50
27	70%负荷	84	32	51
28	70%负荷	71	28	60
1	90%负荷	82	19	40
2	90%负荷	76	18	31
3	90%负荷	78	9	32
4	90%负荷	75	19	38
5	90%负荷	78	18	39
6	90%负荷	74	21	38
7	90%负荷	82	14	34
8	90%负荷	76	16	33
9	90%负荷	81	16	38
10	90%负荷	74	8	29
11	90%负荷	74	17	29
12	90%负荷	74	17	36
13	90%负荷	72	16	35

14	90%负荷	74	14	34
15	90%负荷	64	13	35
16	90%负荷	73	15	31
17	90%负荷	72	20	38
18	90%负荷	74	25	32
19	90%负荷	74	9	31
20	90%负荷	72	15	36
21	90%负荷	84	14	35
22	90%负荷	77	18	37
23	90%负荷	74	13	29
24	90%负荷	73	10	30
25	90%负荷	74	15	31
26	90%负荷	72	12	34
27	90%负荷	75	14	42
28	90%负荷	71	12	37

经检验，不同负荷下各阶段的 RMSSD 值是满足正态分布和方差齐性的 ( $P>0.05$ )。所以可以进一步对相同运动负荷条件下 3 个阶段 RMSSD 值的组间变化差异情况进行单因素方差分析检验。同时计算出了组间偏 eta 方  $\eta_p^2$ ，从而了解组间的差异性的大小。结果如下（见表 8）：

（1）、在 50%的运动负荷下，运动前-5~0 分钟阶段（以下简称：Pre5）与运动后 30~35 分钟阶段（以下简称：Post30）不具有显著性差异 ( $P>0.05$ )；Pre5 与运动后 0~5 分钟（以下简称：Post5）具有显著性差异 ( $P<0.05$ )；Post5 与 Post30 具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，它们组间偏 eta 方  $\eta_p^2=0.935>0.4$  组间效果量大；

（2）、在 70%的运动负荷下，Pre5 与 Post30 具有显著性差异 ( $P<0.05$ )；Pre5 与 Post5 具有显著性差异 ( $P<0.05$ )；Post5 与 Post30 具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，它们组间偏 eta 方  $\eta_p^2=0.947>0.4$  组间效果量大；

（3）、在 90%的运动负荷下，Pre5 与 Post30 具有显著性差异 ( $P<0.05$ )；Pre5 与 Post5 具有显著性差异 ( $P<0.05$ )；Post5 与 Post30 具有显著性差异 ( $P<0.05$ )，它们组间偏 eta 方  $\eta_p^2=0.978>0.4$  组间效果量大。

表 8 相同负荷条件下不同阶段的 RMSSD 值的单因素方差分析结果

负荷	Pre5	Post5	Post30
50%负荷	76.46±4.22★	43.67±4.41*	76.75±3.89★
70%负荷	74.68±4.31★	29.18±4.28*	59.32±5.00*★
90%负荷	74.96±3.99★	15.25±3.87*	34.43±3.59*★

注：\*  $P<0.05$ ，与 Pre5 相比具有显著性，表示\*；

★  $P<0.05$ ，与 Post5 相比具有显著性，表示★；

### 5.2.1.2 不同运动负荷条件下各时间段 RMSSD 值的单因素方差分析

对不同运动负荷条件下3个阶段RMSSD值的组间变化差异情况进行单因素方差分析检验，以及组间偏 $\eta^2$ 的计算结果如下（见表9）：

（1）、在 Pre5 阶段，50%、70%、90%的运动负荷组间没有明显的差异（ $P>0.05$ ），它们组间偏 $\eta^2=0.035$  组间效果量中等；

（2）、在 Post5 阶段，50%运动负荷与 70%运动负荷具有显著性差异（ $P<0.05$ ），50%运动负荷与 90%运动负荷具有显著性差异（ $P<0.05$ ），70%运动负荷与 90%运动负荷具有显著性差异（ $P<0.05$ ），它们组间偏 $\eta^2=0.888>0.4$  组间效果量大；

（3）、在 Post30 阶段，50%运动负荷与 70%运动负荷具有显著性差异（ $P<0.05$ ），50%运动负荷与 90%运动负荷具有显著性差异（ $P<0.05$ ），70%运动负荷与 90%运动负荷具有显著性差异（ $P<0.05$ ），它们组间偏 $\eta^2=0.946>0.4$  组间效果量大。

表 9 相同时间阶段不同运动负荷下 RMSSD 值单因素方差分析结果

时间	50%负荷	70%负荷	90%负荷
Pre5	76.46±4.22	74.68±4.31	74.96±3.99
Post5	43.67±4.41★	29.18±4.28*	15.25±3.87*★
Post30	76.75±3.89★	59.32±5.00*	34.43±3.59*★

注：\*  $P<0.05$ ，与 50%运动负荷比较；

★  $P<0.05$ ，与 70%运动负荷比较；

### 5.2.1.3 不同运动负荷条件下 $TL_{HRV}$ 值的单因素方差分析

经检验， $TL_{HRV}$  值也是满足正态性和方差齐性的（ $P>0.05$ ），所以可以对其进行单因素方差分析检验。

对不同运动负荷下运动负荷评估值  $TL_{HRV}$ （见表10）的组间变化差异情况进行单因素方差分析检验，以及组间偏 $\eta^2$ 的计算结果表明（见表11）：50%运动负荷与 70%运动负荷下的  $TL_{HRV}$  值之间具有显著性差异（ $P<0.05$ ），50%运动负荷与 90%运动负荷的  $TL_{HRV}$  值之间具有显著性差异（ $P<0.05$ ），70%运动负荷与 90%运动负荷的  $TL_{HRV}$  值之间具有显著性差异（ $P<0.05$ ），它们组间偏 $\eta^2=0.804>0.4$ ，组间效果量大。

表 10 不同运动负荷的  $TL_{HRV}$  值一览表

人数序号	50%运动负荷	70%运动负荷	90%运动负荷
1	0.83871	1.117647	3
2	0.962963	1.454545	3.461538
3	1	1.638622	3
4	1.071429	1.538462	2.947368
5	0.852941	1.36	2.857143
6	1.037037	1.6	3.117647
7	0.794118	1.272727	3.4
8	0.607143	1.363636	3.529412
9	1.052632	1.518519	2.954545
10	1.28	1.354839	3.142857
11	0.883721	1.153846	2.6
12	0.785714	1.266667	3
13	0.825	1.314286	2.947368
14	0.810811	1.371429	3
15	0.805556	1.769231	2.318182
16	1.090909	1.774194	3.625
17	0.958333	1.962963	2.888889
18	0.871795	1.090909	3
19	1.296296	1.558824	2.954545
20	1.137931	1.5625	2.714286
21	1.181818	1.34375	3.333333
22	1.172414	1.428571	3.105263
23	0.911111	1.4375	3.8125
24	1.314286	1.387097	3.15
25	1.105263	1.689655	3.6875
26	1	2.307692	2.727273
27	1.285714	2.536842	2.178571
28	1.147059	1.34375	2.36

表 11 不同运动负荷下  $TL_{HRV}$  值的单因素方差分析结果

运动负荷	50%负荷	70%负荷	90%负荷
$TL_{HRV}$ 值	$1.002 \pm 0.183 \star$	$1.51 \pm 0.326 \star$	$3.029 \pm 0.396 \star \star$

注:  $\star P < 0.05$ , 与 50%运动负荷比较;  $\star \star P < 0.05$ , 与 70%运动负荷比较;

### 5.2.2 RMSSD 值与运动负荷之间的相关性分析

运动负荷与各阶段 RMSSD 值之间的相关性分析结果如表 12 所示：在 Pre5 时间段，运动负荷与 RMSSD 值之间的相关系数  $R=0.078$  ( $P>0.05$ )，由于  $R<0.1$ ，所以相关性非常小，如散点图 10 所示；在 Post5 时间段的运动负荷与 RMSSD 值之间的相关性很大 ( $R=-0.818$ ;  $P<0.05$ )，如散点图 11 所示；在 Post30 时间段的运动负荷与 RMSSD 值之间具有极强的相关性 ( $R=-0.930$ ;  $P<0.05$ )，如散点图 12 所示。

表 12 3 个时间段的 RMSSD 值与运动负荷相关性一览表

时间段	与运动负荷的相关性 (R)
Pre5	0.078
Post5	-0.818*
Post30	-0.930*

注：\*  $P<0.05$ ，

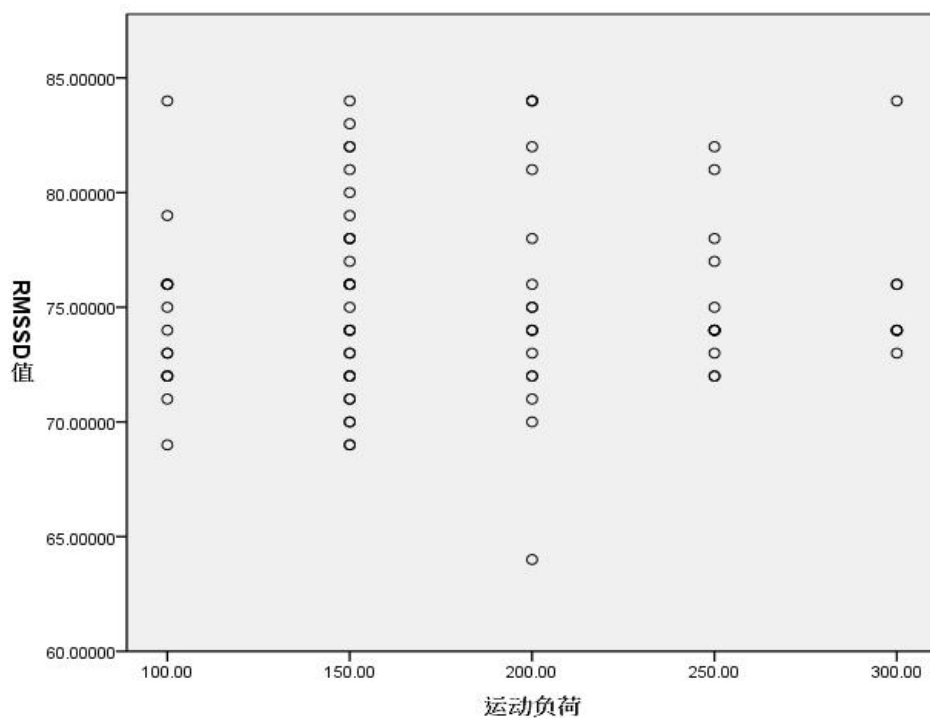


图 10 Pre5 时间段的 RMSSD 值与不同负荷之间的相关性散点图



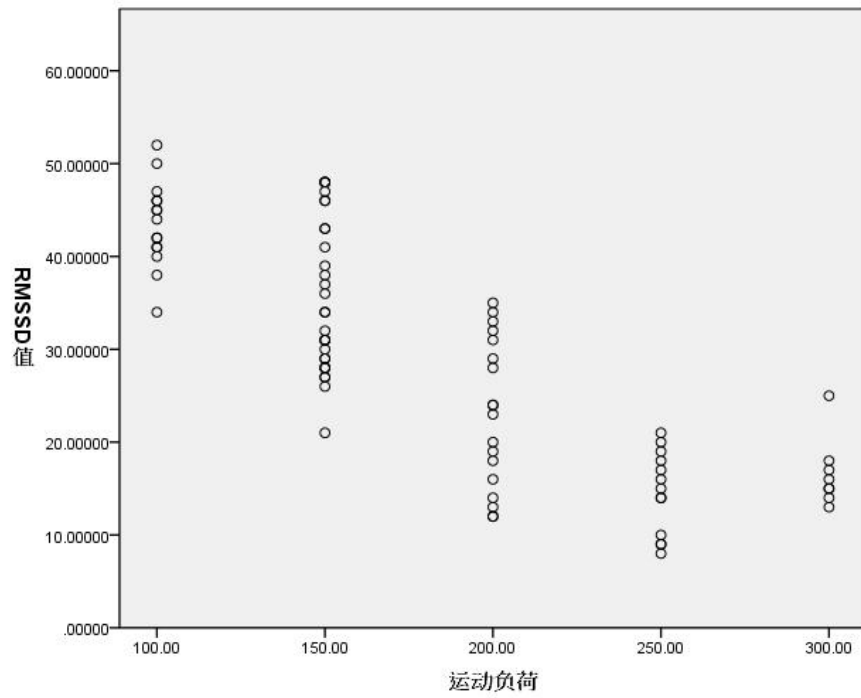


图 11 Post5 时间段的 RMSSD 值与不同负荷之间的相关性散点图

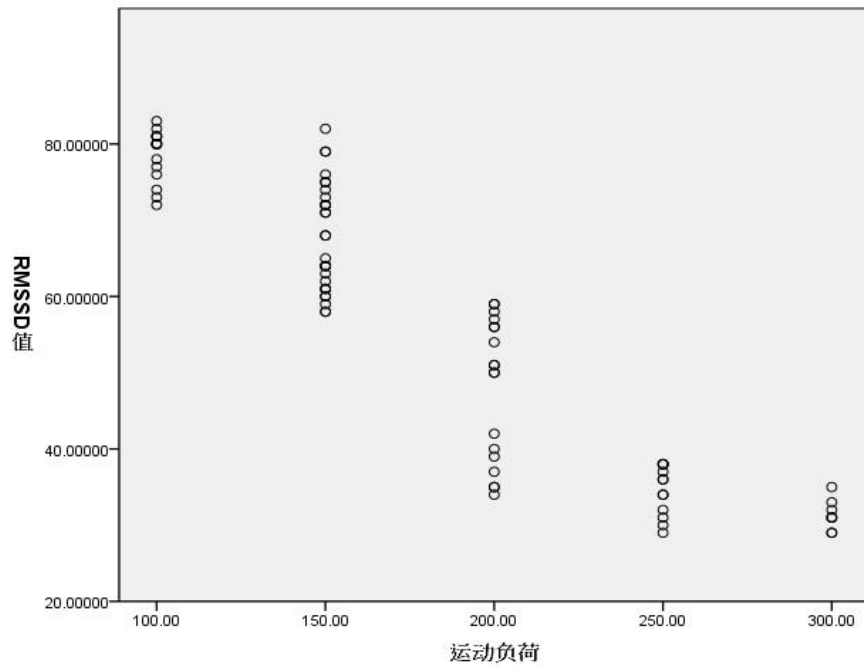


图 12 Post30 时间段的 RMSSD 值与不同负荷之间的相关性散点图

### 5.2.3 $TL_{HRV}$ 值与运动负荷之间的相关性分析

为了进一步的分析  $TL_{HRV}$  值与运动负荷的关系，本研究做了关于运动负荷与  $TL_{HRV}$  值的相关性分析。结果如表 13 所示运动负荷与  $TL_{HRV}$  值的相关系数  $R=0.943$  ( $P<0.05$ )， $R>0.9$ ，所以达到了完美的相关状态。如散点图 13 所示，他们之间是呈现正相关关系，即随着运动负荷的增大  $TL_{HRV}$  值也随着增大。

表 13  $TL_{HRV}$  值与不同运动负荷相关性一览表

与运动负荷的相关性 (R)	
$TL_{HRV}$ 值	0.943 *

注：\*  $P<0.05$ ，

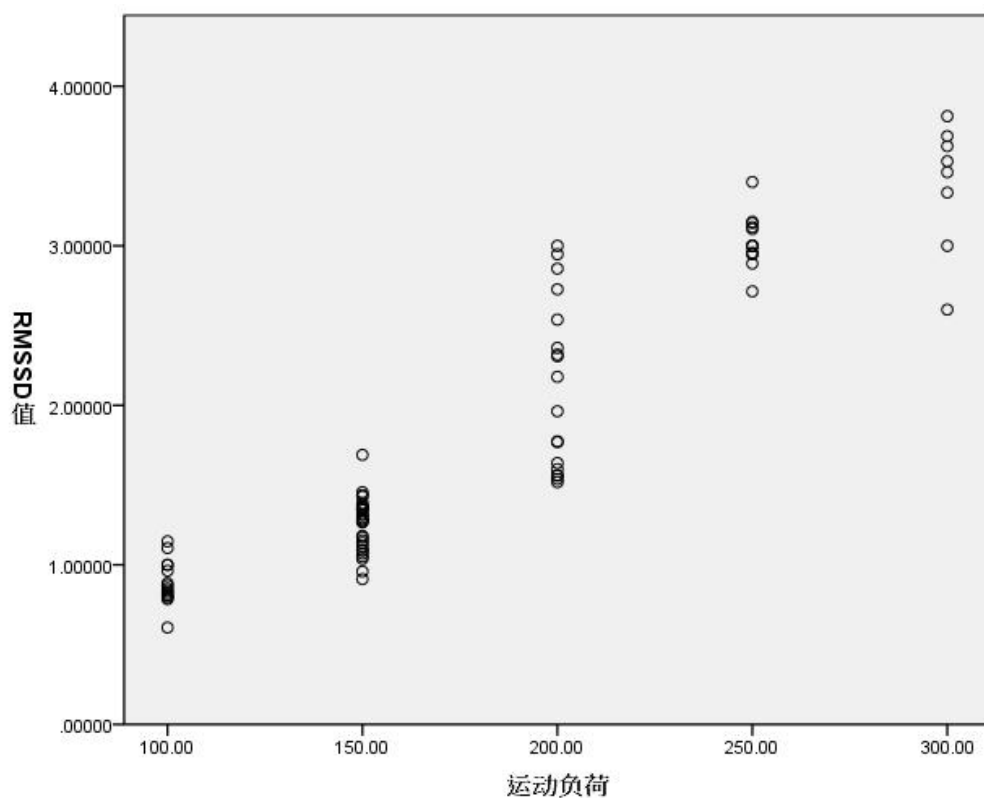


图 13  $TL_{HRV}$  值与不同负荷之间的相关性散点图

## 6 分析与讨论

通过研究结果我们可以发现：

(1)  $\Delta HR1$  值与运动负荷具有极强的负相关性，运动负荷越大， $\Delta HR1$  值就越小。

(2)  $HRr\%$  值与运动负荷具有极强的负相关性，运动负荷越大， $HRr\%$  值就越小。

(3) 运动后 Post5 和 Post30 阶段的 RMSSD 值与运动负荷的变化具有极强的负相关性，主要表现为运动负荷越大，Post5 和 Post30 阶段的 RMSSD 值就越小。

(4)  $TL_{HRV}$  值与运动负荷具有极强的正相关性，即运动负荷越大， $TL_{HRV}$  值就越大。

以上结果直观地验证了本研究的假设是成立的，即 HRR、HRV 与运动负荷的变化是存在紧密联系的。但是我们仍需要将对这一存在的联系，尝试进行可能的一些生理机理分析。

通过前人的研究我们可以知道，运动负荷的变化会引起自主神经的变化，自主神经的变化又会引起心脏功能的变化，从而引起心率的变化。而 HRR、HRV 与运动负荷存在紧密联系需要一个桥梁作为链接，所以，那个桥梁很大可能上就是我们的自主神经系统。自主神经系统 (Autonomic nervous system, 以下简称: ANS) 的功能主要表现在去维持机体的内在平衡；同时也会在受到外界训练负荷等影响下导致的身体的内在紊乱，锻炼和恢复过程中心血管功能的变化就是其表现之一。首先，ANS 控制心血管系统的功能主要是通过调控交感神经与副交感神经来进行调控的<sup>[74]</sup>。而自主神经的调节功能也是会受训练负荷的变化而变化的<sup>[75]</sup>。比如在锻炼结束时，由于负荷的突然消失，会引起副交感神经功能减弱，中枢神经系统的传导功能减弱，同时迷走神经的活性增加<sup>[76]</sup>。从而增加运动者的主动脉感受器的活性水平，以及调节心脏功能在运动前后的即刻改变，使心率的降低<sup>[77][78]</sup>。

### 6.1 运动后心率恢复与运动负荷相关性的可能机理分析

(1)  $\Delta HRR$  与运动负荷相关性的可能机理：

本研究通过分析  $\Delta HR1$ 、 $\Delta HR2$ 、 $\Delta HR3$  3 个指标与不同的运动负荷的关系。得出结果并分析如下：

$\Delta HR1$  在 50%、70% 和 90% 的运动负荷下，通过两两比较都具有明显的差异 ( $P < 0.05$ )，组间偏  $\eta^2_p = 0.937 > 0.4$  组间差异明显；同时  $\Delta HR1$  与运动负荷具

有极强的负相关性 ( $R=-0.862$ ), 即随着运动负荷的增大, 在运动后 1 分钟内的恢复值  $\Delta HR1$  就相对越小。这是由于机体在运动过程中被施加的负荷越大, 机体克服这个负荷进行运动就需要更多更快的能量及氧供给, 此时机体就会动员自主神经对其心脏的泵血功能进行调控, 使其搏动的频率增加, 单位时间内泵出的血液量就会为了适应而积极的增加, 直到达到机体的需求, 心脏就会维持该频率 (峰值心率)。当维持此状态运动一段时间后突然中止运动 (卸掉负荷), 机体对能量及氧供给的需求就会很快下降, 此时自主神经又会调控机体的心脏减少搏动频率直至恢复到静息时的搏动水平。但是在这个过程中, 负荷越大, 峰值心率就会越高 (在机体最大心率范围内), 运动终止后神经调节心脏需要的时间也就会越长, 心脏搏动频率恢复下降得也就越慢, 使得峰值心率与运动后 1 分钟末的心率的差值就越小。我们知道  $\Delta HR1$  值是运动过程中的峰值心率与运动终止第一分钟末心率的差值, 所以这就是导致  $\Delta HR1$  值与运动负荷成负相关的原因。

$\Delta HR2$  和  $\Delta HR3$  中呈现中等的正相关 ( $R=0.777$ ;  $R=0.607$ ;), 即随着运动负荷的增大, 心率下降的速度就越快。在第 2 分钟和第 3 分钟恢复时, 机体的恢复较快, 并且运动负荷大的在运动中的峰值心率就越高, 与运动后恢复心率的差值就越大。所以在第 2 分钟和第 3 分钟恢复运动负荷越大,  $\Delta HR2$  的差值就越大。在  $\Delta HR2$  和  $\Delta HR3$  中, 由于负荷较大, 所以在运动中的最大心率就较大, 而运动后  $\Delta HR2$  和  $\Delta HR3$  的值就越大。在运动后第一分钟的  $\Delta HR1$ , 下降的主要的机制是由于迷走神经系统的激活所引起的变化<sup>[79]</sup>。而这种变化是运动负荷越大,  $\Delta HR1$  的值就越小, 然而运动 2 分钟后的心率的恢复变化的机制, 主要是由交感神经功能的抑制和副交感神经功能的兴奋所导致的<sup>[80]</sup>, 从而使得  $\Delta HR2$  和  $\Delta HR3$  与运动负荷之间出现正相关, 随着运动负荷的增加  $\Delta HR2$  和  $\Delta HR3$  也随着增加。从相关系数上分析, 并且  $\Delta HR1$  的相关系数比  $\Delta HR2$  和  $\Delta HR3$  的相关系数更大, 相关性更加的明显。其次, 在  $\Delta HR3$  中对于 70% 运动负荷与 90% 运动负荷之间不具有显著性差异 ( $P>0.05$ ), 即在  $\Delta HR3$  中, 无论是 70% 的运动负荷还是 90% 的运动负荷, 他们  $\Delta HR3$  的值都一样。所以, 本研究表明  $\Delta HR1$  与运动负荷之间具有更强的相关性, 可以为运动负荷评估提供理论参考。

## (2) HRr%与运动负荷相关性的可能机理:

运动后 1 分钟的心率都是相当的精确去侦察到随着不同的运动负荷条件下的细微变化。所以本研究计算运动后 15 秒和运动后 1 分钟的恢复心率来与运动负荷建立联系。同时, 运动后心率恢复的百分比 (HRr%) 是一个很好的指标, 能够反映出由于受到不同的运动负荷的刺激机体的疲劳累积和身体机能恢复的状态<sup>[81]</sup>。是否受试者经过了不同运动负荷的刺激, 机体为了维持着机体的内在平衡, 而使得运动后心率恢复的百分比发生相应的变化。从研究结果中可以得知, 通过比较两两运动负荷之间, HRr%组间值具有显著性差异 ( $P<0.5$ ), 组间 Cohen' s d 系数

( $ES>2.0$ ), 说明组间差异明显。从结果表明, 机体在接受不同运动负荷的刺激后,  $HRr\%$ 值也相应的发生不同的变化。然后, 进一步分析运动后心率恢复的百分比值与运动负荷之间的具体变化规律。研究表明  $HRr\%$ 值与运动负荷之间存在负相关的关系, 相关系数  $R=-0.932$ ;  $P<0.05$ 。表明  $HRr\%$ 值是是与运动负荷紧密相连, 并且, 随着运动负荷的增加  $HRr\%$ 值会呈现下降的趋势。运动训练(锻炼)的基础机制是调动血液的分配, 为运动的肌肉和组织去提供氧和能量, 从而维持机体长时间的工作<sup>[82]</sup>。身体进行自我平衡调节的目的是维持运动训练(锻炼)和运动后恢复之间的平衡, 如果不能处理好运动训练和运动后恢复之间的平衡, 则会导致过度训练和伤病的产生<sup>[83]</sup>。运动后恢复指标就能够更好的去阐述运动和恢复之间的影响。在较大运动负荷条件下, 马上结束运动, 虽然运动是终止了, 但是身体的其他系统、器官、组织和细胞还在运转, 这时心脏还得进行做功来供给身体的需求, 所以运动负荷越大, 刚终止运动的时候心脏的负担就越重, 运动后恢复心率  $HRr\%$ 就相对较小。所以, 心率在锻炼的过程中能够反映心脏的工作负荷, 而  $HRr\%$ 也许能够反映自主神经系统以及身体对于外界负荷的适宜能力<sup>[84]</sup>。

总之, 运动后心率恢复是紧密的联系到运动负荷的。在逐渐增加的运动负荷中, 运动后心率恢复( $\Delta HR1$  和  $HRr\%$ )指标会下降。运动后心率恢复能够直接反映自主神经系统的指标。在接受外界的负荷刺激时, 自主神经系统与身体的其他系统相互作用, 那么自主神经系统的变化就能够反映整个身体的变化, 我们测量能够反映自主神经系统的运动后心率恢复指标, 也许就能够了解整个身体的对于外界负荷刺激所产生的整个变化。因此, 运用记录的运动后心率恢复来反映运动的运动负荷, 也许能够作为一种实际的、可靠的和量化的指标去评定整个身体的能力和身体状态。运用运动后心率恢复能够作为一种前沿的研究方法去控制着每次训练运动负荷的增加和减少, 同时分析交感神经和副交感神经在运动和恢复阶段的关系, 从而更好的去理解运动后心率恢复与运动负荷之间的关系, 从而可以增加运动运动后心率恢复来作为一种新的评定方法来评定运动的运动负荷。为运动负荷的评定增加一些理论基础。

## 6.2 心率变异性与运动负荷相关性的可能机理分析

### (1) RMSSD 与运动负荷相关性的可能机理:

首先,  $RMSSD$  值在 Pre5 阶段没有体现出与运动负荷的相关性和不同负荷之间的差异性(如图 10), 是由于受试者在 Pre5 阶段处于运动前的静坐休息状态, 所以心率不受任何负荷的影响, 使得各负荷之间的  $RMSSD$  值都没有明显的差异, 而在 Post5 和 Post30 阶段呈现了相关性, 如图 14 还表现出了不同负荷之间的一个阶梯状差异性。这就可靠地论证了  $RMSSD$  值的变化是由运动负荷引起这一假设。

同时也直观地反映出了 RMSSD 值在同一时间段会随着负荷的增加而减小;在同一负荷下随着恢复时间的往后而增大,直到恢复为 Pre5 阶段的水平。

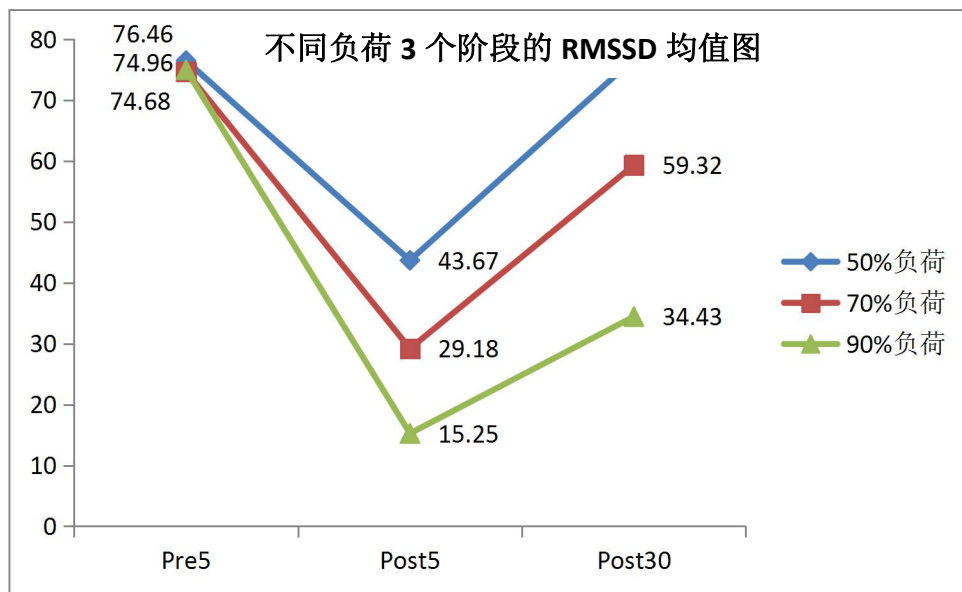


图 14 不同的运动负荷与不同时间阶段的 RMSSD 值折线图

其次, RMSSD 值与运动负荷的变化具有极强的负相关性, 相关系数  $R = -0.818$  ( $P < 0.05$ )。图 14 可以看出, 运动负荷越大, Post5 阶段和 Post30 阶段的 RMSSD 值就越小。这是由于机体在受到外界运动负荷的作用下, 而导致的身体的内在紊乱, 其中包括在锻炼和恢复过程的心血管功能, 自主神经系统在此时就需要去维持机体的内在生理平衡, 即通过调控交感神经与副交感神经来控制心血管系统的功能, 比如通过增加心脏跳动的次数来增加对机体的供血[85]。所以交感神经和副交感神经对心血管系统的功能控制会受到运动负荷的影响[86]。由此可知, Post5 阶段和 Post30 阶段的 HRV 指标的 RMSSD 值随运动负荷的变化而变化, 是由于身体受到了运动负荷的刺激, 使得机体的本身控制的身体稳定性的由迷走神经受到了干扰, 导致了运动后短时间 R-R 间期的变化, 从而引起 RMSSD 值的变化[87]。与此同时, 也有研究发现运动过程中血乳酸浓度的变化也会对 Post5 阶段心电波的 R-R 间期造成影响, 而血乳酸的产生与运动负荷是具有极强联系的[88]。所以, Post5 阶段 HRV 指标的 RMSSD 值与血乳酸浓度有极强的联系, 这归根结底仍是由运动负荷引起的。

关于 RMSSD 值与运动负荷呈现出极强的负相关, 是由于 RMSSD 值是心电图所显示相邻 RR 间期之差的均方根值。如前面所证实的一样, 负荷会引起心率的改变, 负荷越大, 心率就会适应性的变的越快, 而心率越快就会使得心电信号所显示 R 波间隔越小, 即 R-R 间期值就越小, 而当运动终止(卸掉负荷)的时候, 心率又会适应性的变慢, 即 R-R 间期值也就会慢慢变大。但是在这个过程中, 同样

地, 负荷越大就会导致心率变慢的速度越慢, 从而导致 R-R 间期值变化就越慢, 导致 R-R 间期值的差值均方越小, 使得这个过程中的 R-R 间期值的差值均方的平方根值也就越小, 即与运动负荷呈现出了负相关关系。同时这种极强的负相关关系也表明了 RMSSD 值能够很灵敏地反应运动负荷的大小。

## (2) $TL_{HRV}$ 与运动负荷相关的可能机理:

$TL_{HRV}$  是一个比值, 即是由 Pre5 与 Post5 阶段的 RMSSD 值的差值比上 Post30 与 Post5 阶段的 RMSSD 值的差值所得的, 其中 Pre5 表示运动开始前-5 到 0 分钟这个阶段 RMSSD 值; Post5 表示运动终止后 5 分钟内的 RMSSD 值; Post30 表示运动后 30-35 分钟这个阶段的 RMSSD 值。通过单因素方差分析和组间两两比较结果表明在 50%、70% 和 90% 运动负荷下  $TL_{HRV}$  值两两具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 它们组间偏  $\eta^2_p = 0.804 > 0.4$ , 组间效果量大。两组之间的差异比较明显。并对运动负荷与  $TL_{HRV}$  值做了相关性的分析, 得出  $TL_{HRV}$  值与运动负荷之间具有极强的相关性, 相关系数  $R = 0.943 > 0.9$ ,  $P < 0.05$ 。这表明运动负荷的改变会引起  $TL_{HRV}$  值的变化, 且不同的运动负荷会对机体产生不一样的影响。 $TL_{HRV}$  值与运动负荷呈现正相关关系, 是由于人体在运动终止后 30-35 分钟这个阶段的心率, 已经恢复到了接近于运动前静息心率的水平, Post30 阶段的 RMSSD 值也就接近于运动前的 Pre5 阶段的 RMSSD 值 (由图 14 可以看出), 而这个恢复程度是受人体运动过程中所承受的负荷大小决定的, 运动负荷越大就恢复得越慢, 使得 Post30 的 RMSSD 值就越小于 Pre5 阶段的 RMSSD 值, 导致比值越大, 即呈现出与负荷的正相关关系。

通过上面的分析研究表明, 对于 Pre5 阶段; Post5 阶段; Post30 阶段的 RMSSD 值以及利用这些值算出的  $TL_{HRV}$  值, 都是与运动负荷的变化是紧密联系的。而且这些指标值中包含了大量的信息: Pre5 阶段的指标表示了运动前的休息状态, 表示人们的每次活动的基线水平。无论是专业训练的运动员还是大众健身人群, 他们每天的基线水平都是不一样的, 所以, 了解每次运动的基线水平能够反映运动员当前短时间的身体疲劳状况 (严格记录每天 HRV 指标的波动情况) [89]。同时 Post5 阶段的 RMSSD 指标值是运动负荷以及机体接受运动负荷后短时间的恢复状况是紧密联系的 [90], 运动后 30 分钟的 RMSSD 值是与受试者的在恢复阶段的自主神经系统的恢复能力大小的功能性指标是紧密联系的 [91]。所以对于运动负荷的评定时, 可以考虑到运用这几个指标, 尤其是可以考虑运用  $TL_{HRV}$  值来代表运动负荷大小。

## 7 结论与建议

### 7.1 结论

(1) 运动后心率恢复指标 ( $\Delta HR1$  和  $HRr\%$ ) 与运动负荷呈现极强的负相关关系。随着运动负荷的增加,  $\Delta HR1$  和  $HRr\%$  值会减少。

(2) 在心率变异性的指标值中, 运动后 5 分钟和运动后 30 分钟的 RMSSD 值与运动负荷呈现极强的负相关关系, 随着运动负荷的增加, RMSSD 值会减少;  $TL_{HRV}$  值与运动负荷呈现极强的正相关关系。随着运动负荷的增加,  $TL_{HRV}$  值会增加。

### 7.2 建议

(1) 本研究只采取了具有代表性的 50%、70%、90% 这三种运动负荷进行了与相关指标的相关性研究。由于不同的运动负荷会使机体产生不同的生理反映, 这些生理反映会引起心脏功能系统的变化, 这些变化也会对运动后心率恢复和心率变异性指标产生变化。所以其他的运动负荷会引起机体怎样的变化, 还需要进一步的去研究。

(2) 通过对结果的研究分析我们得到: 首先, Pre5 阶段的 RMSSD 值反映了在运动前的休息状态, 表示人们的每次活动的基线水平。无论是专业训练运动员还是大众健身人群, 他们每天的基线水平都是不一样的, 所以, 通过严格记录每天 HRV 中 RMSSD 值的波动情况, 就可以了解每次运动的基线水平能够反映运动员当前短时间的身體疲劳状况<sup>[92]</sup>。其次, Post5 阶段和 Post30 的 RMSSD 值经检验都是与运动负荷的变化呈极强的相关性的, 这是由机体的自主神经系统在受到运动负荷的刺激后对心脏系统进行调节所引起的结果。所以, 在对运动负荷以及机体的基本状态进行评估时, 可以考虑到运用该指标。

(3)  $TL_{HRV}$  值是通过不同阶段的 RMSSD 值运算出来的一个反映不同运动负荷下运动后恢复情况的一个确切的值, 比如本研究得出  $TL_{HRV}$  为 1 时对应 50% 的运动负荷, 为 2 时对应 70% 的运动负荷; 为 3 时对应 90% 的运动负荷。并且该值与运动负荷的变化呈现极强的正相关关系, 所以可以考虑运用该指标来评估运动负荷, 并且还可以考虑利用该值来准确反映运动负荷的确切大小。

(4) 若要证明 RMSSD 值和  $TL_{HRV}$  值有运用来评估运动负荷的有效性, 后续还需增加更多的不同的运动负荷值进行相关研究, 以进一步更加准确地探讨他们之间所存在的变化规律。



## 8 参考文献

- [1] Borresen, J., & Lambert, M. I. (2009). The quantification of training load, the training response and the effect on performance. *Sports Medicine*, 39, 779–795.  
doi:10.2165/11317780-000000000-00000
- [2] Achten J, Jeukendrup AE. Heart rate monitoring. *Sports Med*. 2003;33: 517-538.
- [3] Bouchard, C., and Rankinen, T. (2001). Individual differences in response to regular physical activity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33, S446–451. doi:10.1097/00005768-200106001-00013
- [4] Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., and Buchheit, M. (2013a). Evaluating training adaptation with heart rate measures: a methodological comparison. *Int.J. Sports Physiol. Perform.* 8, 688–691.
- [5] Lamberts RP, Lambert MI. Day-to-day variation in heart rate at different levels of submaximal exertion: implications for monitoring training. *J Strength Cond Res*. 2009;23:1005-1010. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181a2dcde
- [6] Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., and Buchheit, M. (2013a). Evaluating training adaptation with heart rate measures: a methodological comparison. *Int.J. Sports Physiol. Perform.* 8, 688–691.
- [7] Borresen J, Lambert MI. Autonomic control of heart rate during and after exercise: measurements and implications for monitoring training status. *Sports Med*. 2008;38:633–46.
- [8] Morshedi-Meibodi A, Larson M G, Levy D, et al. Heart rate recovery after treadmill exercise testing and risk of cardiovascular disease events( The Framingham Heart Study) . *Am J Cardiol*, 2002, 90( 8) : 848-852
- [9] KARIM N, HASAN J A, ALI S S , et al. Heart rate variability-review[J]. *J Basic Appl Sci*, 2011,7 ( 1): 71-77.
- [10] 中国社会科学院语言研究所词典编辑室.现代汉语词典(第3版)[M].北京:商务印书馆, 2002.393.
- [11] 翟文明, 李治威.辞海[M].北京:光明日报出版社, 2002.338.
- [12] 熊焰,邱江涛,孔祥宁. 运动负荷本质论——运动负荷概念、定义与分类的思考[J]. 山东体育学院学报,2004(04):74-76.
- [13] Sheppard RJ, Racine N, Roof A, et al. Heart rate recovery a potential marker of clinical outcome in heart failure patients receiving beta-blocker therapy[J]. *Can J Cardiol*, 2007,23 ( 14): 1135-1138
- [14] Jouven X, Empana JP, Schwartz PJ, et al. Heart rate profile during exercise as a predictor of sudden death[J]. *N Eng L J Med*, 2005, 352 ( 19): 1951-1958
- [15] Gayda M, Bourassa MG, Tardif JC, et al. Heart rate recovery after exercise and long-term

- prognosis in patients with coronary artery disease[J]. Can J Cardiol, 2012, 28 (2): 201-207
- [16] Maddox TM, ROSS C, Ho PM, et al. Impaired heart rate recovery is associated with new onset atrial fibrillation: a prospective cohort study[J/OL]. BMC Cardiovasc Disord, 2009. <http://www.biomedcentral.com/1471-2261/9/11>
- [17] 申慧祥, 陈学伟, 董宏彬, 安改红, 李超, 王静, 马强. 不同运动负荷下恢复期心率推测运动心率的探讨[J]. 军事医学, 2016, 40(11): 915-918.
- [18] HEFFERNAN K S, FAHS C A, SHINSAKO K K, et al. Heart rate recovery and heart rate complexity following resistance exercise training and detraining in young men[J]. American Journal of Physiology Heart & Circulatory Physiology, 2007, 293(5): H3180-H3186. [27] KRIATSELIS C D, NEDIOS S, KELLE S, et al. Oxygen kinetics and heart rate response during early re-recovery from exercise in patients with heart failure[J]. Cardiology Research & Practice, 2012: 8.
- [19] Darr KC, Bassett DR, Morgan BJ, Thomas DP. Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise. Am J Physiol Heart Circ Physiol. 1988;254(2):H340-H343.
- [20] GALETTA F, FRANZONI F, FEMIA F R, et al. Life long physical training prevents the age-related impairment of heart rate variability and exercise capacity in elderly people[J]. Sports Med Physfitness, 2005, 45 (2): 217-221.
- [21] ANDREW ZIMBALIST. The economics of stadiums, teams and cities [J]. Rev Policy Res, 1998, (15): 17-29.
- [22] GOIT R K, PAUDEL B H, KHADKA R, et al. Mild-to-moderate intensity exercise improve cardiac autonomic drive in type 2 diabetes[J]. J Diabetes Investig, 2014, 5 (6): 722-727.
- [23] SHIN K, MORITANI T, WOO J, et al. Exercise training improves cardiac autonomic nervous system activity in type 1 diabetic children [J]. J Phys Ther Sci, 2014, 26 (1): 111-115.
- [24] TIAN Y, HUANG C Y, HE Z H, et al. Autonomic function responses to training: Correlation with body composition changes [J]. Physiol Behav, 2015, 11 (1): 308-313.
- [25] NUMMELA A, HYNYNEN E, KAIKKONEN P, et al. Endurance performance and nocturnal HRV indices[J]. Int J Sports Med, 2010, 31(3): 154-159.
- [26] TULPPO M P, HAUTALA A, MÄKIKALLIO T H, et al. Effects of aerobic training on heart rate dynamics in sedentary subjects[J]. J Appl Physiol, 2003, 95(1): 364-372.
- [27] MELANSON E I, FREEDSON P S. The effect of endurance training on resting heart rate variability in sedentary adult males[J]. Eur J Appl Physiol, 2001, 85(5): 442-449.
- [28] HAUTALA A J, MÄKIKALLIO T H, KIVINIEMI A, et al. Cardiovascular autonomic function correlates with the response to aerobic training in healthy sedentary subjects[J]. Am J Physiol Heart

Circphysiol,2003,285(4):1747-1752.

[29] BORGHI-SILVA A,MENDES R G, TRIMER R. Potential weeks of physical training on cardiac autonomic function and exercise capacity in chronic obstructive pulmonary disease[J]. Eur J Phy Rehab Med, 2015, 51(2):211-221

[30] KIVINIEMI A M,TULPPO M,ESKELINEN J J, et al. Cardiac autonomic function and high intensity interval training in middle-age men[J]. Med Sci Sports Exe,2014, 46(10):1960-1967.

[31] GAMELIN F X,BAQUET G,BERTHOIN S. Effect of high intensity intermittent training on heart rate variability in prepubescent children[J]. Eur J Appl Physiol,2009, 10(5) :731-738.

[32] Hopkins WG. Quantification of training in competitive sports: methods and applications. Sports Med 1991; 12(3): 161-83

[33] Borresen J, Lambert MI. Validity of self-reported training duration. Int J Sports Sci Coach 2006; 1 (4): 353-9

[34] Shephard RJ. Limits to the measurement of habitual physical activity by questionnaires. Br J Sports Med 2003;37 (3): 197-206

[35] Borresen, J., & Lambert, M. I. (2009). The quantification of training load, the training response and the effect on performance. Sports Medicine, 39, 779–795.

doi:10.2165/11317780-000000000-00000

[36] Pyne DB, Lee H, Swanwick KM. Monitoring the lactate threshold in world-ranked swimmers. Med Sci Sports Exerc 2001; 33 (2): 291-7

[37] Weltman A, Seip RL, Snead D, et al. Exercise training at and above the lactate threshold in previously untrained women. Int J Sports Med 1992; 13 (3): 257-63

[38] Stegmann H, Kindermann W, Schnabel A. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. Int J Sports Med 1981; 2 (3): 160-5

[39] Swart J, Jennings CL. Use of blood lactate concentration as a marker of training status. S Afr J Sports Med 2004;16: 3-7

[40] Deckerle J, Baron B, Dupont L, et al. Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. Eur J Appl Physiol 2003; 89 (3): 281-8

[41] Brickley G, Doust J, Williams CA. Physiological responses during exercise to exhaustion at critical power. Eur J Appl Physiol 2002; 88 (1): 146-51

[42] Vanhatalo A, Doust JH, Burnley M. Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. Med Sci Sports Exerc 2007; 39 (3): 548-55

[43] Arts FJ, Kuipers H. The relation between power output, oxygen uptake and heart rate in male athletes. Int J Sports Med 1994; 15 (5): 228-31

[44] Lambert MI, Mbamba ZH, St Clair Gibson A. Heart rate during training and competition for

long-distance run-ning. J Sports Sci 1998; 16: S85-90

[45] Bagger M, Petersen PH, Pedersen PK. Biological variation in variables associated with exercise training. Int J Sports Med 2003; 24 (6): 433-40

[46] Burton, A. R., Rahman, K., Kadota, Y., Lloyd, A., and Vollmer-Conna, U. (2010). Reduced heart rate variability predicts poor sleep quality in a case-control study of chronic fatigue syndrome. Exp. Brain Res. 204, 71–78. doi: 10.1007/s00221-010-2296-1

[47] Buchheit, M., Simpson, B. M., Schmidt, W., Aughey, R. J., Soria, R., Hunt, R., et al. (2013c). Predicting sickness during a 2-week soccer camp at 3600 m (ISA3600). Br. J. Sports Med. i124–i127. doi: 10.1136/bjsports-2013-092757

[48] Borresen, J., and Lambert, M. I. (2007). Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load. Eur. J. Appl. Physiol. 101, 503–511. doi: 10.1007/s00421-007-0516-6

[49] Buchheit, M., and Gindre, C. (2006). Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 291, H451–H458. doi: 10.1152/ajpheart.00008.2006

[50] Robinson DM, Robinson SM, Hume PA, et al. Training intensity of elite male distance runners. Med Sci Sports Exerc 1991; 23 (9): 1078-82

[51] Kohrt WM, Morgan DW, Bates B, et al. Physiological re-sponses of triathletes to maximal swimming, cycling, and running. Med Sci Sports Exerc 1987; 19 (1): 51-5

[52] Kohrt WM, Morgan DW, Bates B, et al. Physiological re-sponses of triathletes to maximal swimming, cycling, and running. Med Sci Sports Exerc 1987; 19 (1): 51-5

[53] Borresen, J., and Lambert, M. I. (2007). Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load. Eur. J. Appl. Physiol. 101, 503–511. doi: 10.1007/s00421-007-0516-6

[54] Buchheit, M., Papelier, Y., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2007). Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate recovery or heart rate variability? American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 293(1), H8-H10.

[55] Buchheit, M., Racinais, S., Bilsborough, J., Bourdon, P., Voss, S., Hocking, J., ... Coutts, A. (2013). Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players. Journal of Science and Medicine in Sport, 16(6), 550-555.

[56] Perini, R., Orizio, C., Comandè, A., Castellano, M., Beschi, M., & Veicsteinas, A. (1989). Plasma norepinephrine and heart rate dynamics during recovery from submaximal exercise in man. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 58(8), 879-883.

[57] Kannankeril, P. J., Le, K., Kadish, A. H., & Goldberger, J. J. (2004). Parasympathetic rate recovery after exercise. Journal of Investigative Medicine,

- [58] Al Haddad, H., Laursen, P., Chollet, D., Ahmaidi, S., & Buchheit, M. (2011). Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *International Journal of Sports Medicine*, 32(8), 598.
- [59] Buchheit, M., Al Haddad, H., Laursen, P., & Ahmaidi, S. (2009). Effect of body posture on postexercise parasympathetic reactivation in men. *Experimental Physiology*, 94(7), 795 — 804.
- [60] Morshedi-Meibodi A, Larson M G, Levy D, et al. Heart rate recovery after treadmill exercise testing and risk of cardiovascular disease events( The Framingham Heart Study) . *Am J Cardiol*, 2002, 90( 8) : 848-852
- [61] Garet M, Tournaire N, Roche F, Laurent R, Lacour JR, Barthelemy JC, and Pichot V. Individual Interdependence between nocturnal ANS activity and performance in swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 36: 2112–2118, 2004.
- [62] Hautala AJ, Makikallio TH, Kiviniemi A, Laukkanen RT, Nissila S, Huikuri HV, and Tulppo MP. Cardiovascular autonomic function correlates with the response to aerobic training in healthy sedentary subjects. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 285: H1747–H1752, 2003.
- [63] 黄传业,何子红,洪平,赵杰修,李然,王梅,田野. 16周前后两次运动后心率恢复测试的重复性研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2015, 34(09): 825-830.
- [64] 黄传业,何子红,洪平,赵杰修,李然,王梅,田野. 16周前后两次运动后心率恢复测试的重复性研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2015, 34(09): 825-830.
- [65] Hopkins, W. G. (2002). A new view of statistics: A scale of magnitudes for effect statistics. Retrieved December 26, 2012, from <http://www.sportsci.org/resource/stats/effectmag.html>
- [66] Lamberts, R. P., Swart, J., Capostagno, B., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (2009). Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(3), 449-457.
- [67] Buchheit, M., Chivot, A., Parouty, J., Mercier, D., Al Haddad, H., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2010). Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *European Journal of Applied Physiology*, 108, 1153–1167. doi:10.1007/s00421-009-1317-x
- [68] Saboul, D., Pialoux, V., & Hautier, C. (2013). The impact of breathing on HRV measurements: Implications for the longitudinal follow-up of athletes. *European Journal of Sport Science*, 13(5), 534–542. doi:10.1080/17461391.2013.767947 [Epub 2013 Feb 8].
- [69] Buchheit, M., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2007). Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise. *AJP: Heart and Circulatory Physiology*, 293(1), H133–H141. doi:10.1152/ajpheart.00062.2007
- [70] Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2012). Heart rate variability in elite triathletes, is variation invariability the key to effective training? A case comparison. *European*

Journal of Applied Physiology, 112, 3729–3741. doi:10.1007/s00421-012-2354-4

- [71] Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & Buchheit, M.(2013). Evaluating training adaptation with heart rate measures: A methodological comparison. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(6), 688–691. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23479420>. [Epub 2013 Mar 8].
- [72] Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & Buchheit, M.(2013). Evaluating training adaptation with heart rate measures: A methodological comparison. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(6), 688–691. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23479420>. [Epub 2013 Mar 8].
- [73] Kaikkonen, P., Nummela, A., & Rusko, H. (2007). Heart rate variability dynamics during early recovery after different endurance exercises. *European Journal of Applied Physiology*, 102(1), 79–86. doi:10.1007/s00421-007-0559-8
- [74] Robinson BF, Epstein SE, Beiser GD, et al. Control of heart rate by the autonomic nervous system: Studies in man on the inter-relation between baroreceptor mechanisms and exercise. *Circ Res*. 1966;19:400–11.
- [75] Pichot V, Busso T, Roche F, et al. Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: a laboratory study. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:1660–6.
- [76] Savin W, Davidson D, Haskell W (1982) Autonomic contribution to heart rate recovery from exercise in humans. *J Appl Physiol* 53:1572–1575
- [77] Miles D, Sawka M, Hanpeter D, Foster J, Doerr B, Basset Frey M (1984) Central hemodynamics during progressive upper and lower body exercise and recovery. *J Appl Physiol* 57:366–370
- [78] Arai Y, Saul J, Albrecht P, Hartley L, Lilly L, Cohen R, Colucci W (1989) Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise. *Am J Physiol* 256:H132–H141
- [79] Sundaram S, Shoushtari C, Carnethon M, et al. Autonomic and nonautonomic determinants of heart rate recovery[J]. *Heart Rhythm* L, 2004: s100-s101
- [80] Kannankeril PJ, Le FK, Kadish AH, et al. Parasympathetic effects on heart rate recovery after exercise [J]. *J Invest Med*, 2004, 52 (6): 394-401
- [81] Lamberts, R. P., Swart, J., Capostagno, B., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (2009). Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(3), 449-457.
- [82] Charlton GA, Crawford MH (1997) Physiologic consequences of training. *Cardiol Clin* 15:345–354
- [83] Uusitalo ALT (2001) Overtraining: making a difficult diagnosis and implementing targeted treatment. *Phys Sportsmed* 29:35–50
- [84] Borresen J., & Lambert, M. I. (2007). Changes in heart rate recovery on response to acute changes in training load. *European Journal of Applied Physiology*, 101, 503-511.

- [85] Robinson BF, Epstein SE, Beiser GD, et al. Control of heart rate by the autonomic nervous system: Studies in man on the inter-relation between baroreceptor mechanisms and exercise. *Circ Res.* 1966;19:400–11.
- [86] Pichot V, Busso T, Roche F, et al. Autonomic adaptations to intensive and overload training periods: a laboratory study. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34:1660–6.
- [87] Buchheit, M., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2007). Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise. *Heart and Circulatory Physiology*, 293(1), H133-H141. doi:10.1152/ajpheart.00062.2007
- [88] Seiler, S., Haugen, O., & Kuffel, E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: Intensity and duration effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, 1366–1373. doi:10.1249/mss.0b013e318060f17d
- [89] Borresen, J., & Lambert, M. I. (2008). Quantifying training load: A comparison of subjective and objective methods. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(1), 16-30.
- [90] Seiler, S., Haugen, O., & Kuffel, E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: Intensity and duration effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, 1366-1373. doi:10.1249/mss.0b013e318060f17d
- [91] Seiler, S., Haugen, O., & Kuffel, E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: Intensity and duration effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, 1366-1373. doi:10.1249/mss.0b013e318060f17d
- [92] Borresen, J., & Lambert, M. I. (2008). Quantifying training load: A comparison of subjective and objective methods. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(1), 16-30.

## 致谢

三年时间转眼即逝，人生又将步入下一站旅程。在即将毕业之际。首先我很感谢我的导师李良刚教授。感谢有机会能成为你的学生，感谢您三年孜孜不倦的教诲，感谢您给予我们学习启发，科研思维的开启。感谢您三年来传授我许多的知识。同时，也给予了我人生的许多启发，在往后的人生道路上受益匪浅。

其次感谢我女朋友肖文杉三年的同窗陪伴，在我的学习和生活中给予了许多帮助和支持。感谢缘分让我们经历了一段美好记忆，感谢一路有你。希望未来的日子里我们能够不忘初心、同舟共济，砥砺前行！

最后，很幸运能成为成都体育学院的学生，也很幸运能遇见那一群可爱的同学。感谢学校各位老师的辛勤培养，谢谢同学们的陪伴与帮助。祝愿母校能够蓬勃发展！



## 攻读学位期间的主要科研成果

### 期刊论文:

- [1] 参与者. 人造草坪运动场对人体健康影响的研究进展[J]. 中国运动医学杂志,2017,36(04):359-366.
- [2] 第一作者. 老年人运动健康服务产业发展的思路与对策——基于我国健康老龄化的背景下[J]. 辽宁体育科技,2016,38(05):15-18.
- [3] 第一作者 MOOC 时代背景下高校田径教学的发展研究[J]. 当代体育科技,2016,6(09):45-46.
- [4] 第一作者 “人的城镇化” 进程中休闲体育的发展研究[J]. 文体用品与科技,2017,7.
- [5] 第一作者. 田径 10000m 跑的速度模式研究[J]. 当代体育科技,2016,6(08):153-154.

### 获奖论文:

- [1] 第八届研究生硕博学术论坛, 主办单位: 成都体育学院; 题目: 《世界顶级赛事中 1500 米和 5000 米冠军运动员所采取的比赛策略行为研究》; 获奖等级, 二等奖; 第一作者。
- [2] 第八届研究生硕博学术论坛, 主办单位: 成都体育学院; 题目: 《10000 米跑的节奏策略研究》; 获奖等级, 二等奖; 第一作者。
- [3] 第七届研究生硕博学术论坛, 主办单位: 成都体育学院; 题目: 《喀斯特地区民族体育旅游产业化研究》; 获奖等级, 三等奖; 第一作者。

### 学术会议:

- [1] 第一作者. 不同海拔对高水平田径运动员比赛成绩影响研究[A]. 中国体育科学学会、青海省体育局. 第四届中国多巴高原训练与健康国际研讨会暨首届高原训练与体能培训班论文集[C]. 中国体育科学学会、青海省体育局.;2016:2
- [2] 第一作者. 专题报告. 阿尔茨海默病运动处方治疗研究进展[A]. 中国体育科学学会、广州体育学院. 第三届广州运动与健康国际学术研讨会[C]. 中国体育科学学会、广州体育学院.;2016:2
- [3] 第一作者. 专题报告. 喀斯特地区民族体育旅游产业化研究[A]. 中国体育科学学会、曲阜师范大学. 第八届全国青年体育科学学术会议[C]. 中国体育科学学会、曲阜师范大学.;2016:2

### 发表著作:

著作名称:《民族传统体育文化教学理论与实践创新探索》, 出版社: 吉林大学出版社, 出版时间: 2017 年 3 月; 撰写了第十二章第一节及第三节, 合计版面字数五万捌仟字(5.8 万字)担任副主编。