

# 运动后心率恢复——大众健身有氧评价新思路述评

朱成东, 林华

(辽宁师范大学 体育学院, 辽宁 大连 116029)

**摘要:** 梳理国内外关于运动后心率恢复用于评价有氧能力的相关文献, 发现运动后心率恢复具有作为有氧能力评价及监控工具的研究意义和研究价值: 部分运动后心率恢复指标被认为与最大摄氧量具有较高的相关性, 可以反映运动者的有氧能力; 运动后心率恢复具有再现性, 重测信度高, 除系统性训练外不会因单次运动负荷而发生较大改变。运动后心率恢复的有氧能力评价研究将有利于优化现有有氧能力评价方法, 推进运动训练科研理论在全民健身中推广进程。

**关键词:** 运动生理学; 运动后心率恢复; 有氧能力评价; 大众健身; 述评

**中图分类号:** G804.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2017)05-0134-06

## Heart rate recovery after exercise—a new idea for evaluating aerobic capacity in public fitness

ZHU Cheng-dong, LIN Hua

(School of Physical Education, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** By collating domestic and foreign literature on using heart rate recovery after exercise to evaluate aerobic capacity, the authors found that heart rate recovery after exercise has the research significance and value as an aerobic capacity evaluating and monitoring tool: some heart rate recovery after exercise indexes are considered as having a high correlation with maximum oxygen uptake, can reflect the exerciser's aerobic capacity; heart rate recovery after exercise is provided with high reproducibility and re-measurement reliability, will not change significantly due to a single exercise load, except systematic training. The research on evaluating aerobic capacity via heart rate recovery after exercise will be conducive to optimizing the existing aerobic capacity evaluation method and boosting the progress of popularization of sports training research theories in national fitness.

**Key words:** sports physiology; heart rate recovery after exercise; aerobic capacity evaluation; public fitness; review

运动后心率恢复(Heart rate recovery, HRR)是评价心脏自主神经功能和预测心血管疾病及死亡发生的诊断指标之一。在研究过程中发现, 运动后心率恢复受运动干预的影响, 与最大摄氧量具有相关性, 可以用来评价人体健康体适能水平。在运动训练实践中, 教练员根据强度训练后运动员的心率及心率恢复速度评价运动员的疲劳程度, 间接评价运动员的有氧能力基础及竞技状态。目前用运动后心率恢复来评价运动能力, 尤其是有氧能力的研究不多, 但运动后心率恢复具有评价有氧能力的作用不可忽略, 由于其指标采集简单方便, 利于在全民健身中推广。因此, 找到利用心率评价个体有氧能力的有效方法对未来大众健身事

业具有重要意义。

### 1 运动后心率恢复的概述

运动后心率恢复指运动结束后不同时间的心率与运动中峰值心率的差值, 常用的测量时间包括 1、2、3、4、5、7 min(记做 HRR<sub>t</sub>, t 对应 1、2、3、4、5、7 min)。目前对于心率恢复标准的界定存在争议: Framingham 心脏病研究中心<sup>[1]</sup>以 Bruce 平板运动为测试方案, 当心率达到由年龄预测的最大心率的 85% 时停止, 结束后受试者采用仰卧位, HRR<sub>1</sub> ≤ 12 b/min 为异常; Nishime 等<sup>[2]</sup>、Vivekanathan 等<sup>[3]</sup>同样以 Bruce 平板运动为测试方案, 当心率达到由年龄预测的最大

心率的85%时停止,但是采用站立位  $HRR1 \leq 12$  b/min 为异常; Cole 等<sup>[4]</sup>以 Bruce 平板运动为测试方案,当心率达到由年龄预测的最大心率的80%时停止,仰卧位  $HRR1 \leq 18$  b/min、 $HRR2 \leq 42$  b/min 为异常; Mora 等<sup>[5]</sup>以 Bruce 平板运动为测试方案,当心率达到由年龄预测的最大心率的90%时停止,采用仰卧位  $HRR2 \leq 22$  b/min 为异常。李大严等<sup>[6]</sup>以功率车递增负荷为测试方案,以出现“典型的胸闷胸痛、呼吸困难或心电图 ST 段压低”为实验终止标志,采用运动后坐位  $HRR2 < 42$  b/min 为异常。Nishime 等<sup>[2]</sup>将  $HRR1 < 12$  b/min 的称为积极性恢复,  $HRR1 < 18$  b/min 的称为被动性恢复。目前研究较多采用  $HRR1 \leq 12$  b/min<sup>[2-3, 7-8]</sup>、 $2 \text{ min} < 42$  b/min<sup>[9]</sup>作为心率恢复异常的诊断标准。在临床中,将  $HRR1 < 12$  b/min 和  $HRR1$  呈 S 型曲线<sup>[10]</sup>等异常情况用作判断心脏自主神经功能异常的实用指标。

运动后心率恢复主要应用在心脏自主神经和心血管疾病的预测中,可以反映心脏自主神经的调节能力<sup>[11-12]</sup>,是评定心脏自主神经功能的常用指标<sup>[13-14]</sup>,目前研究普遍认为,运动后心率恢复受心脏交感神经和迷走神经的共同影响<sup>[14-17]</sup>;也有研究认为,运动后心率恢复主要受副交感神经影响,是其再激活的结果<sup>[11-12]</sup>。运动后心率恢复异常,被认为包括两种原因,即早期生理性迷走神经激活的双曲线型和迷走神经再激活延迟的 S 型<sup>[17]</sup>。也有研究认为,运动后心率恢复异常意味着迷走神经的活性开始减弱<sup>[18]</sup>。另外,心率恢复被认为健康成年人心血管系统疾病患病率和全因死亡率的重要预测因子<sup>[11-12]</sup>,是预测心血管疾病死亡的独立危险因素<sup>[13, 19-20]</sup>,可以预测缺血性心脏病患者预后<sup>[7, 21]</sup>,有助于评价不同人群的心功能等级<sup>[22]</sup>。大量的临床试验研究发现心率恢复与患者的有氧能力呈相关关系,运动后心率恢复被推荐用于评价人体健康体适能水平<sup>[23]</sup>。

## 2 运动后心率恢复作为评价有氧能力方法的条件

### 2.1 运动后心率恢复与心肺耐力、最大摄氧量的相关性

Vicente-Campos 等<sup>[24]</sup>对 789 名健康男性通过跑台递增负荷进行最大摄氧量测试,通过以速度为 4 km/h、坡度为 0%的 2 min 跑台实验采集运动后心率恢复指标,站在跑步机上进行被动恢复,发现  $HRR3$ 、 $\%HRR3/HR_{peak}$  分别与最大摄氧量峰值具有高度相关性( $r=0.36$ ,  $P<0.001$ ;  $r=0.23$ ,  $P<0.001$ )。

赵依帆等<sup>[25]</sup>通过  $HRR2$  结果将 87 名心脏病患者分成两组,比较他们的静息心率(RHR)、峰值摄氧量(peak  $VO_2$ )、无氧阈(AT)、峰值通气量(peak VE)和峰值功率(peak power),认为  $HRR$  与冠心病患者的心肺储备和

运动耐力有一定的相关性。Heffernan 等<sup>[26]</sup>通过对 14 名健康男性进行交叉抗阻练习,发现  $HRR$  随恢复时间变化,一定周期运动训练后,运动后心率恢复速度的变化可能是身体对运动强度适应而产生的变化,并且认为是运动能力提高的一种表现。Kriatselis 等<sup>[27]</sup>发现,运动后心率恢复,尤其是  $HRR1$  与  $HRR2$  的变化与运动过程中峰值耗氧量呈显著负相关。Kalka 等<sup>[28]</sup>对 251 名心脏病患者进行为期 6 个月耐力训练的的心脏康复治疗,患者的  $HRR$  水平得到明显提高,并且大部分患者  $HRR1$ 、 $HRR2$  达到正常水平。之后,该研究对其中的 35 名患者进行第 2 轮的耐力恢复测试,发现结果不显著,研究认为心脏康复的训练强度并不影响  $HRR1$  的变化,超过 6 个月的心脏康复也不再对  $HRR1$  值的变化产生显著影响。该结论也可以认为耐力训练对  $HRR$  水平等级低的人具有明显改善  $HRR$  水平的作用,当达到一定水平后,效果不再明显,这说明  $HRR$  可能存在一个阈值,当达到这个阈值后,耐力训练对其影响不大,并且这个阈值并不高,仅相当于普通人  $HRR$  健康水平。但是该研究存在两点疑问:第一,研究采用的受试者为心脏病患者,而非健康人群,通过 6 个月的耐力训练  $HRR$  症状得到缓解,但心脏病症状并未完全消除,不能排除其他心脏病因素对结果的影响;第二,由于是心脏病患者,因此对于实验的运动强度并不会选择太高,在运动训练中也存在这种问题,即当运动员机能水平达到一定高度后,不增加训练强度和训练量时,运动成绩提高缓慢,甚至不会增长,同理,该研究出现此种结果可能是因为训练强度本身不高,当患者有氧耐力达到一定水平后  $HRR$  不会增长,如果训练强度相应提升,耐力训练与  $HRR$  的关系还有待研究。当训练水平达到一定高度后,  $HRR$  也保持一定水平,这说明  $HRR$  具有较好的评估作用,不会因运动量和运动时间的单方面增长而变化,即受试者有氧能力是  $HRR$  变化的重要变量。

周永平等<sup>[29]</sup>对心率恢复速度(斜率)进行了研究,心率恢复速度指的是台阶测试后心率下降回归方程中的斜率,虽然与运动后心率恢复不同,但也可以认为是  $HRR1$  与  $HRR2$  两点间直线的斜率,研究认为“台阶试验结束后心率恢复速度(斜率),特别是早期恢复速度能很好地反映有氧耐力和台阶试验指数,但不能很好地反映心血管系统功能。”

也有研究认为,运动后心率恢复与最大摄氧量无相关关系。刘元桥等<sup>[30]</sup>通过选取 23 名本科生为受试对象,进行 5 min 台阶测试,分别测试运动后即刻、30 s、1 min、2 min、3 min、4 min 心率,认为定量运动负荷后,心率恢复与个体  $VO_{2max}$  水平无关。

另外许多研究虽然没有直接介绍心率恢复与最大摄氧量的相关性,但是在实验设计时均采用心率恢复(HRR1、HRR2)与最大摄氧量共同监控被试者有氧能力提高情况,并表现出心率恢复和最大摄氧量共同与运动干预高度相关的现象<sup>[28, 31-32]</sup>。

心率恢复的研究虽然始于病理生理学和临床医学,但在竞技体育中也有很长的应用历史。在没有训练监控生化指标及测量仪器之前,教练员通过查看运动后心率恢复的情况评估运动员的疲劳程度,累积运动员平时心率水平,纵向评价其竞技能力。在运动训练中,有氧训练可以明显提高运动员的心肺功能,其心脏功能性的积极改变体现在左室腔增大、室壁增厚<sup>[33]</sup>。在训练中表现出在承受较大运动强度时,有氧能力强的运动员心率低于较弱的运动员,且心率恢复速度快。在训练中,教练员也通过心率和心率恢复速度的横向比较,评价运动员竞技能力,同时通过以往的纵向比较,来简易检测运动员疲劳情况及制定临时训练计划,定性地评价运动员的有氧能力<sup>[16]</sup>。另外,大量研究表明,具有训练经历的受试者其运动后心率恢复与无训练经历的受试者更快<sup>[34-35]</sup>,并且随竞技状态变化而变化<sup>[36-38]</sup>。

## 2.2 运动后心率恢复的再现性

Yawn 等<sup>[39]</sup>通过比较两次运动实验间隔在 18 周的 90 例患者,发现以  $HRR1 < 12$  b/min 为异常时,标准组的受试者其运动后心率恢复的再现率为 50%; 如果以  $HRR1 < 18$  b/min 为异常标准,以及以  $HRR1 < 21$  b/min 为异常标准,进行前后实验比较时,标准组受试者的再现率都是 55%。Tulumen 等<sup>[40]</sup>对 52 例健康志愿者进行递增负荷的跑台实验,采集 1~5 min 运动后心率恢复结果,并在实验后的第 7 d 和第 30 d 进行重测,比较 3 次测试的运动后心率恢复值。发现 3 次结果中 HRR1 差异显著( $P=0.66$ ,  $ICC=0.88$ ),但 HRR2、HRR3、HRR4、HRR5 的结果不具有统计学意义,但具有再现性。研究认为,通过平板测试后的健康成年人 5 min 内的运动后心率恢复在短期内具有可重复性。除此之外,大量研究针对两次最大摄氧量测试间隔时间实验,来讨论运动后心率恢复的再现性与间隔时间的关系, Buchheit 等<sup>[16, 41-42]</sup>对 24 h、72 h、2 周进行对比;黄传业等<sup>[43]</sup>就间隔 16 周进行对比;Yawn 等<sup>[44]</sup>就间隔 1 年进行对比,均具有相似的结果。另外, Buchheit 等<sup>[38]</sup>发现 HRR 的绝对值较相对值具有更高的可重复性。以上研究表明单次运动不会引起 HRR 的改变,单次的负荷运动不会使身体素质发生改变,而持续、系统的有氧运动则会使 HRR 发生改变,说明 HRR 是反映运动机能的指标,不会因为单次的运动刺激而发生变化,是具有稳定性的指标。另外,研究表明运动强度和运

动量对运动后心率恢复存在影响, HRR1 测试结果重复性明显高于 HRR2 和 HRR3, 亚极量跑运动(85%  $HR_{max}$  对应强度)后 HRR1 可靠性高于 HRR2; 亚极量跑运动后(90%  $HR_{max}$  对应强度)HRR1 可靠性低于 HRR2<sup>[43-45]</sup>。

## 2.3 运动后心率恢复作为测量工具的讨论

最大摄氧量是公认的评价有氧能力的金标准,大量的研究显示运动后心率恢复与最大摄氧量存在相关性,尤其是 HRR1、HRR2 等指标,这意味着运动后心率恢复具有作为测量工具的效度;另外,运动后心率恢复的再现性说明运动后心率恢复的结果具有可重复性,这解决了其作为测量工具的信度问题。虽然部分研究的受试者属于具有心脏疾病的特殊人群,其准确性还有待进一步研究,但是运动后心率恢复作为评价有氧能力测量工具的优势不可忽视,这更加说明运动后心率恢复作为评价有氧能力测量工具的意义和价值。

不同的运动强度、运动量会影响运动后的心率恢复<sup>[38, 45]</sup>,因此如果结合运动训练学原理,设计不同负荷的刺激强度将有利于心率恢复与最大摄氧量相关性的继续研究,比如台阶实验其原理也是通过运动后的心率变化来反映有氧能力,选择运动结束后 3 次心率的平均值,因为其结果与最大摄氧量相关性差,因此科学性受到质疑,但是如果合理地利用运动后心率恢复与最大摄氧量的相关关系,以及运动负荷与运动后心率恢复间的关系,则可以优化台阶实验,通过深入研究来确定更适宜的数学方程,这对于未来有氧能力评价方法的优化具有重要意义。

## 3 运动后心率恢复的研究意义

### 3.1 运动后心率恢复是运动与健康的融合

运动后心率恢复的研究则是通过对受心脏副交感神经控制的心率指标来推测有氧能力,使有氧能力和生命健康紧密联系起来。HRR 不但具有评价有氧能力的可能性,同时已被证实是预测心血管疾病和心血管事件发生有效的独立指标。因此, HRR 有氧能力评价法既可以对有氧能力进行评定,同时也可以起到运动风险评估及健康预测的作用,对运动训练、科学健身具有重要作用。

现阶段在评价体力活动、心肺耐力、有氧能力的研究手段中,均是以运动机能的外在表现来反映的,但真正影响其能力的器官或组织并非运动系统,而是机体的循环系统、呼吸系统、内分泌系统、神经系统,以及心脏、肺、血管等内脏器官,由于研究方法的局限和测量的难度,不能直接得到所需的数据,因此采用通过运动表现出的外显特征进行研究,虽然效果显

著,但对其机制的研究仍然重要。运动后心率恢复研究为当前有氧能力评价提供了新的思路,以神经特点为切入点,对运动能力及心脏状况共同研究,与现阶段评价方式相比,更注重心脏疲劳的监控,对运动能力、生命健康具有重要意义。

### 3.2 运动后心率恢复是传统有氧评价方法的优化

虽然运动后心率恢复与最大摄氧量之间的相关性以及与有氧能力不同区间运动强度的关系还有待进一步研究。但是其作为有氧能力评价测量工具的作用是显而易见的,对于运动后心率恢复的后续研究将有助于有氧能力测试方法的完善和优化。有氧能力与心肺机能、生命健康息息相关,而运动是促进健康发展的有效途径,有氧能力的评价帮助人们了解自身能力,安排健身计划,安全健身。目前,最经典的评价方法是最大摄氧量测试和无氧阈测试,但是需要复杂的仪器、实验流程较长、运动负担大,不适合全民健身评价的推广;国民体质监测用来评价有氧能力和心肺机能的指标还用到了台阶测试法,但许多研究都表明它与最大摄氧量相关性较差,因此其科学性受到质疑;还有研究建议向日本和欧美一些国家学习,采用12 min跑、20 m折返跑等测试方法,但不适合在全民评价中推广,这也是为什么台阶测试虽然与最大摄氧量相关性差却一直被使用的原因之一。所以优化现有有氧能力评价方法,研究新的评价工具,具有重要意义。运动后心率恢复因其采集的便捷性、安全性,使得作为评价有氧能力工具在大众健身中的推广将更具有优势,因此借鉴临床中运动后心率恢复的研究,结合训练学特点,制定新的有氧能力评价方法是运动训练的需要,也是全民健身的需要。

### 3.3 运动后心率恢复符合未来科学健身的趋势

随着时代的发展与进步,以及国家对全民健身发展的重视,越来越多的人开始健身,同时越来越关注健身的效果。电子信息悄然地改变着人们的生活,也改变着人们的健身理念。全民健身未来的发展将会与时俱进,与科技、信息、网络相结合。现在人们开始用手机中的APP来管理自身的运动、管理自己的健康,同时渴望更科学、更直观地了解自身状况。以前只用于专业训练的监控设备开始走进人们的生活,比如心率带等,由于其成本的降低以及蓝牙技术的发展,将会促进其在民用中的推广。运动后心率恢复指标就是利用民用的监控设备,为健身人群提供科学的运动健康反馈,将简单、高效、方便的监控方法应用于全民健身之中,培养人民群众自主健身意识、形成健康的生活方式、通过非医疗方式干预健康。

### 参考文献:

- [1] MORSHEDI-MEIBODIMA, LARSON M G, LEVY D, et al. Heart rate recovery after treadmill exercise testing and risk of cardiovascular disease events[J]. American Journal of Cardiology, 2002, 90(90): 848-852.
- [2] NISHIME E O, COLE C R, BLACKSTONE E H, et al. Heart rate recovery and treadmill exercise score as predictors of mortality in patients referred for exercise ECG[J]. Jama the Journal of the American Medical Association, 2000, 284(11): 1392-1398.
- [3] VIVEKANANTHAN D P, BLACKSTONE E H, POTHIER C E, et al. Heart rate recovery as a predictor of mortality independent of the angiographic severity of coronary disease[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2003, 42(5): 831-838.
- [4] COLE C R, FOODY J A M, BLACKSTONE E H, et al. Heart rate recovery after submaximal exercise testing as a predictor of mortality in a cardiovascularly healthy cohort[J]. Annals of Internal Medicine, 2000, 132(7): 552-555.
- [5] MORA S, REDBERG R F, CUI Y, et al. Ability of exercise testing to predict cardiovascular and all-cause death in asymptomatic women: a 20-year follow-up of the lipid research clinics prevalence study[J]. Jama the Journal of the American Medical Association, 2003, 290(12): 1600-1607.
- [6] 李大严,邢波,俸永红,等.心肺运动试验后冠心病患者心率恢复与心肺功能及生活质量的关系[J].中国老年学,2016,36(13): 3152-3154.
- [7] AKYÜZ A, ALPSOY S, AKKOYUN D C, et al. Heart rate recovery may predict the presence of coronary artery disease[J]. Anadolu Kardiyol Derg, 2014, 14(4): 351-356.
- [8] MADDOX T M, ROSS C, HO P M, et al. The prognostic importance of abnormal heart rate recovery and chronotropic response among exercise treadmill test patients[J]. American Heart Journal, 2008, 156(4): 736-744.
- [9] AZARBAL B, HAYES S W, LEWIN H C, et al. The incremental prognostic value of percentage of heart rate reserve achieved over myocardial perfusion single-photon emission computed tomography in the prediction of cardiac death and all-cause mortality: superiority over 85% of maximal age-predicted heart rate reserve[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2004, 44(2): 423-430.
- [10] LEEPER N J, DEWEY F E, ASHLEY E A, et al.

- Prognostic value of heart rate increase at onset of exercise testing[J]. *Circulation*, 2007, 115(4): 468-474.
- [11] ARENA R, MYERS J, ABELLA J, et al. The prognostic value of the heart rate response during exercise and recovery in patients with heart failure: influence of beta-blockade[J]. *International Journal of Cardiology*, 2010, 138(2): 166-173.
- [12] WATANABE J, THAMILARASAN M, BLACKSTONE E H, et al. Heart rate recovery immediately after treadmill exercise and left ventricular systolic dysfunction as predictors of mortality: the case of stress echocardiography[J]. *New England Journal of Medicine*, 1999, 341(18): 1351-1357.
- [13] FOUAD H, BOUAGUEL I, MERGHIT R, et al. Heart rate recovery after exercise and long-term prognosis in Algerian patients with coronary artery disease[J]. *Archives of Cardiovascular Diseases Supplements*, 2014, 6(14): 3.
- [14] IMAI K, SATO H, HORI M, et al. Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 1994, 24(6): 1529-1535.
- [15] LAMBERTS R P, SWART J, CAPOSTAGNO B, et al. Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2010, 20(3): 449-457.
- [16] LAMBERTS R P, MASKELL S, BORRESEN J, et al. Adapting workload improves the measurement of heart rate recovery[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2011, 32(9): 698-702.
- [17] OKUTUCU S, KARAKULAK U N, AYTEMIR K, et al. Heart rate recovery: a practical clinical indicator of abnormal cardiac autonomic function[J]. *Expert Review of Cardiovascular Therapy*, 2014, 9(11): 1417.
- [18] BUCHHEIT M, PAPELIER Y, LAURSEN P B, et al. Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate recovery or heart rate variability?[J]. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 2007, 293(1): H8-H10.
- [19] MYERS J, TAN S Y, ABELLA J, et al. Comparison of the chronotropic response to exercise and heart rate recovery in predicting cardiovascular mortality[J]. *European Journal of Cardiovascular Prevention & Rehabilitation*, 2007, 14(2): 215-221.
- [20] O'NEILL J O, YOUNG J B, POTHIER C E, et al. Severe frequent ventricular ectopy after exercise as a predictor of death in patients with heart failure[J]. *Acc Current Journal Review*, 2004, 44(4): 820-826.
- [21] JOHNSON N P, GOLDBERGER J J. Prognostic value of late heart rate recovery after treadmill exercise[J]. *American Journal of Cardiology*, 2012, 110(1): 45-49.
- [22] 李然, 江崇民, 蔡睿, 等. 运动后恢复期心率对心功能的评价——台阶指数对不同年龄段人群心功能评价的局限性[J]. *体育科学*, 2012, 32(6): 81-84.
- [23] TEKIN G, Tekin A. Heart rate recovery and physical fitness[J]. *International Journal of Cardiology*, 2014, 177(2): 122.
- [24] VICENTE-CAMPOS D, MARTIN LA, NUNEZ M J, et al. Heart rate recovery normality data recorded in response to a maximal exercise test in physically active men[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114(6): 1123-1128.
- [25] 赵依帆, 潘思京, 王磊. 运动试验后心率恢复与冠心病患者心肺功能及生存质量的相关性研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2014, 29(11): 1039-1043.
- [26] 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 recovery from exercise in patients with heart failure[J]. *Cardiology Research & Practice*, 2012: 8.
- [28] KALKA D, DOMAGALA Z, KOWALEWSKI P, et al. The influence of endurance training intensity on dynamics of post-exertional heart rate recovery adaptation in patients with ischemic heart disease[J]. *Advances in Medical Sciences*, 2013, 58(1): 50.
- [29] 周永平, 沈国琴. 不同高度台阶试验后心率反应、心率下降斜率与  $VO_{2max}$ 、12 min 跑、台阶指数关系的实验研究[J]. *体育科学*, 2005, 25(1): 38-41.
- [30] 刘元桥, 王玉侠. 有氧能力对心率恢复的影响研究[J]. *体育世界(学术版)*, 2013(2): 72-73.
- [31] MATSUO T, SAOTOME K, SEINO S, et al. Low-volume, high-intensity, aerobic interval exercise for sedentary adults:  $VO_{2max}$ , cardiac mass, and heart rate

- recovery[J]. *Arbeitsphysiologie*, 2014, 114(9): 1963-1972.
- [32] 王磊, 高真真, 潘化平. 个体化有氧运动对冠心病患者心率恢复及运动能力的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2015, 30(3): 242-246.
- [33] 马继政, 孙飘, 牛洁. 有氧运动和左室的舒张功能[J]. *中国组织工程研究*, 2004, 8(6): 1138-1139.
- [34] BUNC V, HELLER J, LESO J. Kinetics of heart rate responses to exercise[J]. *Journal of Sports Sciences*, 1988, 6(1): 39.
- [35] SEILER S, HAUGEN O, KUFFEI E. Autonomic recovery after exercise in trained athletes: intensity and duration effects[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2007, 39(8): 1366-1373.
- [36] BORRESEN J, LAMBERT M I. Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2007, 101(4): 503-511.
- [37] BUCHHEIT M, LAURSEN P B, AHMAIDI S. Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise[J]. *Ajp Heart & Circulatory Physiology*, 2007, 293(1): H133-H141.
- [38] BUCHHEIT M, MILLET G P, PARISY A, et al. Supramaximal training and postexercise parasympathetic reactivation in adolescents[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2008, 40(2): 362-371.
- [39] YAWN B P, AMMAR K A, THOMAS R, et al. Test-retest reproducibility of heart rate recovery after treadmill exercise[J]. *Annals of Family Medicine*, 2003, 1(4): 236.
- [40] TULUMEN E, KHALILAYEVA I, AYTEMIR K, et al. The reproducibility of heart rate recovery after treadmill exercise test[J]. *Annals of Noninvasive Electrocardiology the Official Journal of the International Society for Holter & Noninvasive Electrocardiology Inc*, 2011, 16(4): 365-372.
- [41] BOSQUET L, GAMELIN F X, BERTHOIN S. Reliability of postexercise heart rate recovery[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2007, 29(3): 238-243.
- [42] ARDUINI A, GOMEZ-CABRERA M C, ROMAGNOLI M. Reliability of different models to assess heart rate recovery after submaximal bicycle exercise[J]. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 2011, 14(4): 352-357.
- [43] 黄传业, 何子红, 洪平, 等. 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(9): 825-830.
- [44] MELLIS M G, INGLE L, CARROLL S. Variability in heart rate recovery measurements over 1 year in healthy, middle-aged adults[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2014, 35(2): 135-138.
- [45] GREEN R H, Brightling C E, Woltmann G, et al. Analysis of induced sputum in adults with asthma: identification of subgroup with isolated sputum neutrophilia and poor response to inhaled corticosteroids[J]. *Thorax*, 2002, 57(10): 875-879.

