

· 综述 ·

高强度间歇训练在心脏康复中的应用进展

李广鹤 蒋金法 车琳

高强度间歇训练(high-intensity interval training, HIIT)是指进行多次短时间高强度运动训练,每两次高强度训练之间穿插较低强度的运动训练或完全无负荷运动^[1]。健康人群甚至心脏病患者进行 HIIT 训练均无明显不良反应^[2],已成为近年来流行运动方式之一^[3]。本文就心血管病患者实施 HIIT 的疗效、潜在获益机制及在心脏病患者中的治疗可行性作一简要综述,以初步探讨 HIIT 在心脏康复中的应用进展。

HIIT 的处方原则

HIIT 间歇期的运动强度称之为恢复强度,共有两种类型,分为主动恢复和被动恢复。主动恢复时训练强度为低强度,但不是 0 负荷,被动恢复即间歇期运动负荷为 0;高强度训练和间歇期训练时间组合能形成不同的间歇训练方案,从而对参与者产生不同生理反应^[4]。Saltin 等^[5]为描述 HIIT 方案定义了以下参数,之后所有涉及 HIIT 的研究在文献中均沿用 Saltin 制订的参数描述方案,其主要参数包括:(1)比率(ratio),即运动阶段持续时间与恢复阶段持续时间的比值,如方案 A 运动阶段持续时间和恢复阶段持续时间各为 15 s,其 ratio 为 1:1;方案 B 分别为 1 min(60 s)和 30 s,则 ratio 为 2:1。(2)平均强度(mean intensity),即运动强度与恢复强度的均值,平均强度 = $100\% \times (\text{运动强度} \times \text{运动阶段持续时间} + \text{恢复强度} \times \text{恢复阶段持续时间}) / (\text{运动阶段持续时间} + \text{恢复阶段持续时间})$ 。如方案 A:运动强度为 120% 峰值强度,恢复强度采用的是被动恢复(即为 0 负荷),结合其运动阶段和恢复阶段持续时间均为 15 s,故其平均强度为 $(120\% \times 15 + 0 \times 15) / (15 + 15) = 60\%$;方案 B:运动强度为 100% 峰值强度,恢复强度采用的是主动恢复(如 50% 峰值强度),运动阶段和恢复阶段持续时间分别为 60 s 和 30 s,故其平均强度为 $(100\% \times 60 + 50\% \times 30) / (60 + 30) = 83\%$ 。(3)振幅(amplitude),即运动强度与恢复强度之差除以平均强度,以百分率表示;振幅 = $100\% \times (\text{运动强度} - \text{恢复强度}) / \text{平均强度}$,故方案 A 的振幅是 $100\% \times (120\% - 0) / 60\% = 200\%$;方案 B 的振幅 = $100\% \times (100\% - 50\%) / 83\% = 60\%$ 。

HIIT 对心血管病患者的长期影响

一、HIIT 对心血管病的一级预防效应

Matinhomae 等^[6]通过观察 12 周 HIIT 训练对超重男性对象血浆内脂素浓度及胰岛素抵抗的影响,发现同时给予 HIIT 训

练及饮食控制的患者其总脂肪量、腹部脂肪量、血浆胰岛素浓度、血浆内脂素及胰岛素抵抗程度均较单纯饮食控制组患者显著下降。

Rognmo 等^[7]和 Wisloff 等^[8]均证实 16 周 HIIT 训练(比率为 4:3,平均强度为 72%,振幅为 42%)较中等强度连续运动能更显著降低心脏代谢风险,如 HIIT 组心血管代谢危险因素数量为 5.9~4.0,较中等强度连续运动组心血管代谢危险因素数量(5.7~5.0)显著减少,降低了代谢综合征发病率,对改善血管内皮功能及葡萄糖代谢也具有显著疗效。Stensvold 等^[9]发现力量训练(strength training, ST)与 HIIT 联用较单独 HIIT 训练能进一步减小代谢综合征患者腰围,并认为与患者血管内皮功能改善相关;HIIT 组和 ST + HIIT 组峰值氧摄入量(peak volume of oxygen uptake per minute, VO_{2peak})分别增加了 11% 和 10%;但 2 组患者体重、空腹血糖或高密度脂蛋白胆固醇水平无显著改善,可能与训练时间相对较短有关。而持续 9 个月的 HIIT 训练可产生持久减肥效果,对身体成分(尤其是内脏脂肪含量)具有积极影响^[10],减小了发生心血管疾病的风险。Drigny 等^[11]对 65 例代谢综合征患者进行了超过 9 个月的 HIIT 训练,发现 HIIT 组患者心脏代谢风险显著减小,同时观察到 HIIT 组患者 QT 离散度(QT dispersion, QTd)与中等强度连续运动组相似,且长时间 HIIT 训练似乎并不会增加发生室性心律失常的风险。

总之,以上多项研究均证实 HIIT 训练能显著减少心脏代谢危险因素发生,提高心血管疾病一级预防疗效。

二、HIIT 对冠心病患者长期预后的影响

目前有大量文献报道,HIIT 训练能显著提高冠状动脉搭桥术后、稳定性冠心病、急性心肌梗死患者 VO_{2peak} ,延长其运动时间。Meyer 等^[12]将冠状动脉搭桥术后患者分为 HIIT 组和中等强度连续运动组,HIIT 组训练方案为 20 瓦持续 1 min 的恢复训练和 121 瓦持续 1 min 的高强度训练,共训练 20 min,而中等强度连续运动组则进行 83 瓦踏车运动,持续 20 min。经 3.5 周训练后发现 HIIT 组总能量消耗偏低,其峰值功率改善较显著,如 HIIT 组和中等强度连续运动组峰值功率分别增加 0.63 瓦/千克和 0.26 瓦/千克(组间差异具有统计学意义, $P < 0.05$),而静息心率分别下降 9 bpm 和 4 bpm(组间差异具有统计学意义, $P < 0.05$);当 2 组患者训练后再进行相同强度 75 瓦连续运动时,发现 HIIT 组与中等强度运动组心率分别下降 12 bpm 和 2 bpm,提示在同等运动强度下以 HIIT 组运动心率降低幅度更为显著。上述结果表明,HIIT 训练并没有过多增加患者心功能负担,并且还能显著改善患者体力。Moholdt 等^[13]比较 HIIT 训练(比率为 4:3,平均强度为 72%,振幅为 42%)和中等强度连续运动对冠状动脉搭桥术后患者功能恢复的影响,通过 6 个月家庭随访发现上述 2 种运动方案在短期内对 2 组患者 VO_{2peak} 的影响作用类似,如治疗后 HIIT 组 VO_{2peak} 增加了 12.2%,中等强度连续运动组增加了 8.8%,但在长期疗效维持及改善方面以 HIIT 组更显著。

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2015.011.024

基金项目:国家自然科学基金资助项目(81472158),上海市自然科学基金资助项目(14ZR1437900)

作者单位:200065 上海,上海市同济医院、同济大学附属同济医院心内科

通信作者:车琳,Email:linchering@163.com

相关研究报道,HIIT 训练能显著改善稳定性冠心病患者有氧运动耐力。Rognmo 等^[7]将 21 例稳定型冠心病患者分为 2 组,其训练方案分别为每周 3 次 50%~60% VO_2peak 强度的连续运动或等热量 HIIT 训练(比率为 4:3,平均强度为 72%,振幅为 42%),经 10 周训练后发现 2 组患者 VO_2peak 均显著增加,其中 HIIT 组增加了 17.9%,中等强度连续运动组增加了 7.9%,与入选时差异均具有统计学意义($P < 0.05$),并且以 HIIT 组 VO_2peak 的改善幅度较显著;该研究同时指出,每次 HIIT 训练结束后患者 VO_2peak 约增加 0.6%,而每次中等强度连续运动结束后患者 VO_2peak 则增加 0.3%。Warburton 等^[14]将 14 例稳定型冠心病患者随机分为 HIIT 组(比率为 1:1,平均强度为 65%,振幅为 77%)和中等强度连续运动组,经 16 周训练后发现 2 组患者 VO_2peak 改善程度类似,但治疗后 HIIT 组患者运动到力竭时间增加了 5 倍,而中等强度连续运动组则增加了 2.5 倍,提示 HIIT 训练能更安全地改善患者耐受性。

Moholdt 等^[15]对心肌梗死后患者分别给予 HIIT 训练和中等强度连续运动训练,发现上述 2 种训练均能改善患者血管内皮功能,提高血清脂联素水平,改善生活质量,降低血清铁蛋白水平及静息心率;并且 HIIT 组经训练后其高密度脂蛋白胆固醇水平明显升高, VO_2peak 则增加更显著($P < 0.05$),经 30 个月家庭训练后以 HIIT 组 VO_2peak 的持续改善效果较显著($P < 0.05$)^[16]。

HIIT 训练可显著降低冠状动脉支架植入后支架再狭窄发生风险。Munk 等^[17]比较了 HIIT 训练与常规护理对冠状动脉支架植入后支架内再狭窄的影响,经 6 个月治疗后,发现 HIIT 组管腔直径晚期丢失中位数为 0.10 mm,对照组为 0.39 mm,组间差异具有统计学意义($P < 0.05$),上述效应与植入支架类型(包括裸支架或药物支架等)无关;同时该研究还发现 HIIT 训练能显著改善患者 VO_2peak ,可能与改善机体内皮功能及抑制炎症反应有关。

三、HIIT 对心力衰竭患者长期预后的影响

心脏康复近年来已纳入到心力衰竭患者治疗指南中,而心力衰竭患者能否广泛选择 HIIT 训练仍存有疑问,目前有多个小样本研究已证实 HIIT 治疗心力衰竭患者的安全性及有效性。

Meyer 等^[18]早在 1996 年曾对 18 例心衰患者进行 3 周 HIIT 训练,包括有氧功率自行车(50%最大强度运动 30 s 和 15 瓦主动恢复训练 60 s,共持续 15 min,每周训练 5 次)、跑步机(平均速度为 3.84 km/h 运动 60 s,间歇期以 1.44 km/h 主动恢复 60 s,共持续训练 10 min,每周训练 3 次)训练。入选患者经上述方案训练后其 VO_2peak 增加了 24%,并伴有通气阈显著改善。Willenheimer 等^[19]对 49 例轻中度缺血性心力衰竭患者给予 16 周 HIIT 训练,也发现 HIIT 训练过程安全可靠(未发生心功能恶化等不良事件),同时伴有 VO_2peak 及生活质量改善。

另外有研究报道,重症心力衰竭患者呼吸肌力量非常薄弱,持续 4 周高强度吸气肌训练能显著改善重症心力衰竭患者吸气肌肌力,较对照组改善 57.2%^[20]。Wisloff 等^[8]在一项随机试验中比较了 HIIT 训练(比率为 4:3,平均强度为 72%,振幅为 42%)与中等强度连续运动对心衰患者(平均收缩期射血分数为 29%)心血管功能及预后的影响,其中 HIIT 方案运动强度是 90%~95%最大心率持续运动 4 min,间隔 50%~70%最大心率持续 3 min 的主动恢复,重复训练 4 次;连续训练的运动强度是

70%~75%最大心率;经 12 周干预后发现 HIIT 组 VO_2peak (HIIT 组和中等强度连续运动组分别增加了 46% 和 14%)和心脏重构情况(仅 HIIT 组出现舒张末期容积和收缩末期容积减少)显著改善,同时 HIIT 组射血分数增加 35%。B 型钠尿肽前体 [pro-brain(B-type) natriuretic peptide, pro-BNP] 下降 40%,内皮功能及线粒体功能(股外侧肌活检)明显改善。

Hermann 等^[21]观察心脏移植患者经 8 周 HIIT 干预后,发现 HIIT 组 VO_2peak 较对照组增加 18.4%,由肱动脉血流介导的血管舒张功能增加显著;另外 HIIT 组治疗后收缩压显著下降[由 (142 ± 4.2) mmHg 降至 (127 ± 3.4) mmHg],而对照组治疗后收缩压无明显变化。Nytrøen 等^[22]观察不同方式运动训练对 43 例心脏移植患者的影响,发现 HIIT 组(运动强度是 90%~95%最大心率持续 4 min,间隔 50%~70%最大心率持续 3 min 的主动恢复,重复训练 4 次)和中等强度连续运动组(训练强度为 70%~75%最大心率) VO_2peak 显著改善(HIIT 组和中等强度连续运动组 VO_2peak 分别增加了 46% 和 14%),同时伴有生活质量明显提高,另外该研究还发现 HIIT 组患者其心脏移植 1 年后血管病变进展显著减缓^[23],证实了间歇训练对心衰患者的有效性。

HIIT 治疗心血管病患者的潜在机制

一、HIIT 对心血管病患者内皮功能的影响

目前有研究报道 HIIT 训练可改善心血管病患者血管内皮功能,Guiraud 等^[24]针对冠心病患者采用与中等强度连续运动消耗热量相等的优化 HIIT 训练方案,并检测与内皮细胞功能障碍、细胞凋亡和/或损伤有关的内皮微粒(endothelial microparticles, EMP)水平,发现每一次运动结束后 20 min、24 h 和 72 h 时 EMP 均未升高,表明高强度有氧运动短期重复训练不会引起血管剪切应力增加,不足以破坏内皮细胞结构。

心力衰竭患者血管内皮功能改善可能与一氧化氮(nitric oxide, NO)增加有关,Deljanin 等^[25]观察 HIIT 训练和中等强度连续运动对左心功能不全患者(射血分数 $< 40\%$) NO 产生的影响,经 3 周训练后,发现 2 组患者 NO 和体能均显著增加,并且 HIIT 组 NO 增加幅度明显大于中等强度连续运动组。

二、HIIT 抑制心血管病患者炎症反应

HIIT 训练能显著降低冠状动脉支架植入后支架再狭窄的发生率^[17]。HIIT 训练通过促进 NO 合成,增加冠状动脉内皮细胞 NO 水平,改善内皮依赖性血管舒张功能;而 NO 局部释放能抑制新生内膜增生^[26],显著下调白细胞介素-6 和 C-反应蛋白水平,减弱炎症反应程度,从而抑制支架内再狭窄^[26-27]。Nytrøen 等^[22-23]研究发现 HIIT 训练能延缓心脏移植患者 1 年后动脉硬化进展,并发现患者白细胞介素 8 水平显著降低,推测其抑制心脏移植患者动脉硬化进展与抗炎作用有关。

三、HIIT 对心功能的影响

HIIT 训练能改善左室舒张功能,并且对左室收缩功能无不利影响。Amundsen 等^[28]观察 HIIT 训练对冠心病患者左室舒张功能的影响,发现 HIIT(比率为 4:3,平均强度为 72%,振幅为 42%)训练组 VO_2peak 较治疗前增加了 17%,左室充盈速度增加明显,提高了心输出量,表明 HIIT 训练可改善左室舒张功能。Tomczak 等^[29]使用心脏 MRI 观察 HIIT 训练对非缺血性心肌病心力衰竭患者双心室功能的短期影响,发现经 HIIT 训练后患者

左室收缩末期容积立即减少 6% ($P < 0.05$), 射血分数增加 2.4% ($P < 0.05$), HIIT 训练结束 30 min 时伴有左室后负荷下降, 并保留左室舒张功能。

四、HIIT 对心律失常的影响

Labrunee 等^[30]通过观察 12 例心力衰竭患者 24 h 动态心电图监测数据, 发现 HIIT 训练不会增加心律失常发生率, 该研究结果还显示, HIIT 组 24 h 室性早搏数量、室性早搏连发数量及非持续性室速均显著优于中等强度运动组和不运动对照组 (均 $P < 0.05$), 这些变化均表明 HIIT 组心律失常减少及交感平衡功能改善, 尤其与运动后最初 3 h 副交感神经被显著激活密切相关。Munk 等^[31]发现 HIIT 训练能显著改善经皮冠状动脉介入术后患者心肌自主神经调控功能, 其心率变异性改善与 $VO_2\text{peak}$ 升高密切相关。

HIIT 在心脏康复中的可行性

一、HIIT 的安全性

大量研究均未观察到 HIIT 训练能引起患者显著血流动力学异常、心肌缺血或心律失常发生, 并且发现患者遵照 HIIT 方案^[32-33]在严格限制时间内运动直至出现缺血和心绞痛的急性心肺反应有类似于缺血预适应作用, 如第二次负荷试验时其心电图局部缺血表现较第一次显著改善, 未造成心肌损伤。HIIT 训练与中等强度运动一样, 均不会增加心力衰竭患者恶性心律失常发生。另外那些运动能力较低的心衰患者, 在进行 HIIT 训练时均未观察到心律失常和心肌损伤标志物 (如肌钙蛋白 T)、脑尿钠肽 (brain natriuretic peptide, BNP) 或超敏 C-反应蛋白水平升高^[34]。

二、HIIT 形式的多样性

HIIT 的处方相当复杂, 因为其运动/恢复间隔组合可以有多种可能性。Nilsson 等^[35]制订了有氧舞蹈与音乐康复模式即挪威乌利兰模式 (the Norwegian Ullevaal model), 该康复模式训练总时间为 50 min, 运动阶段包括热身活动、运动训练、柔韧性训练和整理活动, 运动训练包括 3 个高强度 (相当于 Borg 量表 15~18 的强度) 训练与 2 个中等强度 (相当于 Borg 量表 11~13 的强度) 训练交替进行, 每种强度训练持续 5~10 min。4 个月后发现高强度间歇训练组在运动能力和生活质量方面显著改善, 并且明显优于非运动训练组; 随访 12 个月时发现该训练效果具有持续性, 且高强度间歇训练组疗效仍显著优于非运动训练组, 表明挪威乌利兰模式训练效果显著。

三、HIIT 能显著改善患者运动依从性

Terada 等^[36]针对 2 型糖尿病患者进行 HIIT 训练, 发现患者治疗依从性高达 97.2%, 治疗后 HIIT 组患者平均通气量 [$(49.8 \pm 8.2) \text{ L/min}$]、平均 VO_2 [$(1604 \pm 468) \text{ ml/min}$] 均显著低于中等强度运动组水平 [分别为 $(58.9 \pm 14.2) \text{ L/min}$ 和 $(1773 \pm 589) \text{ ml/min}$], 组间差异均具有统计学意义 ($P < 0.05$)。中等强度运动组患者由于疲劳和呼吸困难而难以长期坚持训练, 而 HIIT 方案的节奏变化让患者可能将它当作一个游戏, 有助于患者忘记劳累, 从而提高患者运动依从性^[37], 这可能与被动恢复阶段允许肌肉更好地再利用氧、促使磷酸肌酸恢复有关。Yoshida 和 Dupont 等^[38-39]通过 MRI 观察发现, 磷酸肌酸在高强度运动期间被快速消耗, 但被动恢复时患者磷酸肌酸补给较主动恢复时更快; 另外间歇期机体氧合血红蛋白下降缓慢, 被动恢

复阶段磷酸肌酸合成速度也更迅速。

结 语

综上所述, 目前有大量研究表明, 采用个体化优化方案 HIIT 训练治疗心血管病患者具有显著疗效, 且患者治疗依从性较好; 目前关于 HIIT 训练的研究仍偏少, 需开展大规模临床研究加以判断和验证, 便于 HIIT 作为一种更好的训练方式在心脏康复领域大力应用、推广。

参 考 文 献

- [1] Currie KD, Dubberley JB, McKelvie RS, et al. Low-volume, high-intensity interval training in patients with CAD[J]. Med Sci Sports Exerc, 2013, 45(8):1436-1442.
- [2] Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, et al. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease[J]. J Physiol, 2012, 590(5):1077-1084.
- [3] Thompson WR. Now trending: worldwide survey of fitness trends for 2014[J]. ACSM'S Health Fit J, 2013, 17(6):1-11.
- [4] Wallner D, Simi H, Tschakert G, et al. Acute physiological response to aerobic short-interval training in trained runners[J]. Int J Sports Physiol Perform, 2014, 9(4):661-666.
- [5] Saltin B, Essen B, Pedersen P. Intermittent exercise: its physiology and some practical applications. In: Joekle E, Anand R, Stoboy H, editors. Advances in exercise physiology: medicine sport series [J]. Basel: Karger Publishers, 1976, 9(1):23-51.
- [6] Matinhomae H, Banaei J, Azarbayjani MA, et al. Effects of 12-week high-intensity interval training on plasma visfatin concentration and insulin resistance in overweight men[J]. J Exerc Sci Fit, 2014, 12(1):20-25.
- [7] Rognmo O, Hetland E, Helgerud J, et al. High intensity aerobic interval exercise is superior to moderate intensity exercise for increasing aerobic capacity in patients with coronary artery disease[J]. Eur J Cardiovasc Prev Rehabil, 2004, 11(3):216-222.
- [8] Wisloff U, Stoylen A, Loennechen JP, et al. Superior cardiovascular effect of aerobic interval training versus moderate continuous training in heart failure patients: a randomized study[J]. Circulation, 2007, 115(24):3086-3094.
- [9] Stensvold D, Tjonna AE, Skaug EA, et al. Strength training versus aerobic interval training to modify risk factors of metabolic syndrome[J]. J Appl Physiol, 2010, 108(4):804-810.
- [10] Gremaux V, Drigny J, Nigam A, et al. Long-term lifestyle intervention with optimized high intensity interval training improves body composition, cardiometabolic risk and exercise parameters in patients with abdominal obesity[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2012, 91(11):941-950.
- [11] Drigny J, Guiraud T, Gremaux V, et al. Long-term high intensity interval training improves QT dispersion parameters in metabolic syndrome patients[J]. Eur Heart J, 2011, 32(S1):715.
- [12] Meyer K, Lehmann M, Sunder G, et al. Interval versus continuous exercise training after coronary bypass surgery: a comparison of training-induced acute reactions with respect to the effectiveness of the exercise methods[J]. Clin Cardiol, 1990, 13(12):851-861.
- [13] Moholdt TT, Amundsen BH, Rustad LA, et al. Aerobic interval training versus continuous moderate exercise after coronary artery bypass surgery: a randomized study of cardiovascular effects and quality of life[J].

- Am Heart J, 2009, 158 (6): 1031-1037.
- [14] Warburton DE, McKenzie DC, Haykowsky MJ, et al. Effectiveness of high-intensity interval training for the rehabilitation of patients with coronary artery disease[J]. Am J Cardiol, 2005, 95 (9): 1080-1084.
- [15] Moholdt T, Aamot IL, Granoien I, et al. Aerobic interval training increases peak oxygen uptake more than usual care exercise training in myocardial infarction patients: a randomised, controlled study[J]. Clin Rehabil, 2012, 26 (1): 33-44.
- [16] Moholdt T, Aamot IL, Granoien I, et al. Long-term follow-up after cardiac rehabilitation: a randomized study of usual care exercise training versus aerobic interval training after myocardial infarction[J]. Int J Cardiol, 2011, 152 (3): 388-390.
- [17] Munk PS, Staal EM, Butt N, et al. High-intensity interval training may reduce in-stent restenosis following percutaneous coronary intervention with stent implantation: a randomized controlled trial evaluating the relationship to endothelial function and inflammation[J]. Am Heart J, 2009, 158 (5): 734-741.
- [18] Meyer K, Schwaibold M, Westbrook S, et al. Effects of short-term exercise training and activity restriction on functional capacity in patients with severe chronic congestive heart failure[J]. Am J Cardiol, 1996, 78 (9): 1017-1022.
- [19] Willenheimer R, Erhardt L, Cline C, et al. Exercise training in heart failure improves quality of life and exercise capacity[J]. Eur Heart J, 1998, 19 (5): 774-781.
- [20] Marco E, Ramirez-Sarmiento AL, Coloma A, et al. High-intensity vs sham inspiratory muscle training in patients with chronic heart failure: a prospective randomized trial[J]. Eur J Heart Fail, 2013, 15 (8): 892-901.
- [21] Hermann TS, Dall CH, Christensen SB, et al. Effect of high intensity exercise on peak oxygen uptake and endothelial function in long-term heart transplant recipients[J]. Am J Transplant, 2011, 11 (3): 536-541.
- [22] Nytrøen K, Rustad LA, Erikstad I, et al. Effect of high-intensity interval training on progression of cardiac allograft vasculopathy[J]. J Heart Lung Transplant, 2013, 32 (11): 1073-1080.
- [23] Lavie CJ, Arena R, Earnest C. High-intensity interval training in patients with cardiovascular diseases and heart transplantation[J]. J Heart Lung Transplant, 2013, 32 (11): 1056-1058.
- [24] Guiraud T, Gayda M, Juneau M, et al. A single bout of high-intensity interval exercise does not increase endothelial or platelet microparticles in stable, physically fit men with coronary heart disease[J]. Can J Cardiol, 2013, 29 (10): 1285-1291.
- [25] Deljanin IM, Ilic S, Lazarevic G, et al. Impact of interval versus steady state exercise on nitric oxide production in patients with left ventricular dysfunction[J]. Acta Cardiol, 2009, 64 (2): 219-224.
- [26] Lipke EA, West JL. Localized delivery of nitric oxide from hydrogels inhibits neointima formation in a rat carotid balloon injury model[J]. Acta Biomater, 2005, 1 (6): 597-606.
- [27] Munk PS, Breland UM, Aukrust P, et al. High intensity interval training reduces systemic inflammation in post-PCI patients[J]. Eur J Cardiovasc Prev Rehabil, 2011, 18 (6): 850-857.
- [28] Amundsen BH, Rognmo O, Hatlen-Rebhan G, et al. High intensity aerobic exercise improves diastolic function in coronary artery disease[J]. Scand Cardiovasc J, 2008, 42 (2): 110-117.
- [29] Tomczak CR, Thompson RB, Paterson I, et al. Effect of acute high-intensity interval exercise on postexercise biventricular function in mild heart failure[J]. J Appl Physiol, 2011, 110 (2): 398-406.
- [30] Labrunee M, Guiraud T, Gaucher-Cazalis K, et al. Improvement of ventricular arrhythmias and heart rate variability after a single session of intermittent exercise in chronic heart failure patients[J]. Eur J Cardiovasc Prev Rehabil, 2011, 18 (S1): 122.
- [31] Munk PS, Butt N, Larsen AI. High-intensity interval exercise training improves heart rate variability in patients following percutaneous coronary intervention for angina pectoris[J]. Int J Cardiol, 2010, 145 (2): 312-314.
- [32] Meyer P, Guiraud T, Gayda M, et al. High-intensity aerobic interval training in a patient with stable angina pectoris[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2009, 89 (1): 83-86.
- [33] Lu X, Wu T, Huang P, et al. Effect and mechanism of intermittent myocardial ischemia induced by exercise on coronary collateral formation[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2008, 87 (10): 803-814.
- [34] Meyer P, Normandin E, Gayda M, et al. High intensity interval exercise in chronic heart failure: protocol optimization[J]. J Card Fail, 2012, 18 (2): 126-133.
- [35] Nilsson BB, Hellesnes B, Westheim A, et al. Group-based aerobic interval training in patients with chronic heart failure: Norwegian Ullevaal Model[J]. Phys Ther, 2008, 88 (4): 523-535.
- [36] Terada T, Friesen A, Chahal BS, et al. Feasibility and preliminary efficacy of high intensity interval training in type 2 diabetes[J]. Diabetes Res Clin Pract, 2013, 99 (2): 120-129.
- [37] Bartlett JD, Close GL, MacLaren DP, et al. High-intensity interval running is perceived to be more enjoyable than moderate-intensity continuous exercise: implications for exercise adherence[J]. J Sports Sci, 2011, 29 (6): 547-553.
- [38] Yoshida T, Watari H, Tagawa K. Effects of active and passive recoveries on splitting of the inorganic phosphate peak determined by ³¹P-nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. NMR Biomed, 1996, 9 (1): 13-19.
- [39] Dupont G, Moalla W, Guinhouya C, et al. Passive versus active recovery during high-intensity intermittent exercises[J]. Med Sci Sports Exerc, 2004, 36 (2): 302-308.

(修回日期: 2015-07-13)

(本文编辑: 易 浩)