

## 高强度间歇训练在心脏康复领域的研究进展

王军力<sup>1</sup> 黄渊旭<sup>2</sup>

(1. 怀化学院智慧健康促进实验室, 湖南 怀化 418000; 2. 怀化市第一人民医院急诊科, 湖南 怀化 418000)

**【摘要】** 中等强度持续训练一直是心脏康复领域采用的运动方式,但越来越多的证据表明,高强度间歇训练似乎比中等强度持续训练在改善心脏病患者的康复效果方面更有效。现综述高强度间歇训练对心脏病患者峰值摄氧量、自主神经系统平衡、运动依从性、健康相关的生活质量的影响以及高强度间歇训练在心脏康复中的安全性,并与中等强度持续训练相比较,展现高强度间歇训练在心脏康复领域的优越性,最后提出了高强度间歇训练的心脏康复方案。

**【关键词】** 高强度间歇训练;中等强度持续训练;心脏康复;心脏病

**【DOI】**10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2020.11.005

## High-intensity Interval Training in Cardiac Rehabilitation

WANG Junli<sup>1</sup>, HUANG Yuanxu<sup>2</sup>

(1. Smart Health Promotion Laboratory, Huaihua University, Huaihua 418000, Hunan, China; 2. Emergency Department, The First People's Hospital of Huaihua, Huaihua 418000, Hunan, China)

**【Abstract】** Moderate-intensity continuous training (MICT) has always been a method of exercise used in the field of cardiac rehabilitation. But there is growing evidence that high-intensity interval training (HIIT) appears to be more effective than MICT in improving recovery in people with heart disease. This paper reviews the effects of HIIT on peak oxygen uptake, balance of autonomic nervous system, exercise adherence and health-related quality of life in patients with heart disease, as well as the safety of HIIT in cardiac rehabilitation. Compared with MICT, it shows the advantages of HIIT in the field of cardiac rehabilitation, and finally puts forward the cardiac rehabilitation program of HIIT.

**【Key words】** High-intensity interval training; Moderate-intensity continuous training; Cardiac rehabilitation; Heart disease

在心脏康复领域,中等强度持续训练(moderate-intensity continuous training, MICT)一直是心脏病患者康复的金标准<sup>[1]</sup>。MICT已成为心脏病患者康复的基石,并已纳入北美及欧洲的心脏病患者心脏康复指南<sup>[2]</sup>。几乎所有心脏康复团队都在心脏康复方案中采用 MICT 作为主要的运动方式。2007 年,美国心脏协会在冠心病(coronary artery disease, CAD)患者康复中首次提到使用高强度间歇训练(high-intensity interval training, HIIT),随后一些欧洲和北美的团队在心脏康复中越来越多地采用 HIIT<sup>[3]</sup>。已有大量证据证实 HIIT 对 CAD 和心力衰竭患者具有良好效应<sup>[4-7]</sup>。HIIT 现已成为心脏康复领域可选择的一种更有效的运动方式,也成为心脏康复领域研究的热点问题。现综述 HIIT 对心脏病患者峰值摄氧量(peak oxygen uptake,  $VO_{2\text{ peak}}$ )、自主神经系统平衡、运动依从性和健康相关的生活质量(health-related quality of life,

HRQoL)的影响以及 HIIT 在心脏康复中的安全性,并与 MICT 相比较,展现 HIIT 在心脏康复领域的优越性,最后提出 HIIT 的心脏康复方案。

### 1 MICT 和 HIIT 的概念

MICT 是指负荷强度较低、持续时间较长和无间断地连续进行练习的训练方法。运动强度为 50% ~ 85% 峰值心率(peak heart rate,  $HR_{\text{peak}}$ ),大部分为 70% ~ 85%  $HR_{\text{peak}}$  或无氧阈水平<sup>[8-9]</sup>。MICT 主要目的是在稳定状态下进行更长的运动时间,增强机体的心肺适能和有氧氧化能力。HIIT 来源于竞技体育训练,是一种让人在短时间内重复进行全力、快速和爆发式锻炼的一种训练方法。运动时目标强度是 85% ~ 95%  $HR_{\text{peak}}$  或 80% ~ 90%  $VO_{2\text{ peak}}$ ,运动强度超过无氧阈水平<sup>[5]</sup>。间歇恢复阶段由短暂的低强度运动(50% ~ 70%  $HR_{\text{peak}}$ )或完全不活动构成。HIIT 的目的是反复刺激生理系统,使氧运输系统和骨骼肌获得更

大的生理学适应<sup>[5]</sup>。

## 2 HIIT 在心脏康复领域的研究现状

### 2.1 HIIT 对心脏病患者 $VO_{2\text{ peak}}$ 的影响

$VO_{2\text{ peak}}$  是反映心肺适能的有效指标之一,一系列随机对照试验发现 HIIT 和 MICT 能明显地改善心脏病患者的  $VO_{2\text{ peak}}$  (见表 1<sup>[10-25]</sup>)。从  $VO_{2\text{ peak}}$  增量百分比看,13 项研究显示 HIIT 对心脏病患者  $VO_{2\text{ peak}}$  的影

响优于 MICT,而有 1 项研究显示 MICT 对  $VO_{2\text{ peak}}$  的影响略优于 HIIT,另外两项研究显示二者对  $VO_{2\text{ peak}}$  的影响相同。绝大部分研究结果表明 HIIT 在改善心脏病患者心肺适能方面比 MICT 更具优势。由于心肺适能能较好地反映心脏病患者的康复预后,因此可认为 HIIT 比 MICT 干预更能改善心脏病患者的预后。

表 1 随机对照试验中 HIIT 和 MICT 对心脏病患者  $VO_{2\text{ peak}}$  的影响

参考文献	样本	HIIT	MICT	持续周期	运动设备	$VO_{2\text{ peak}}$ HIIT(%)	增加% MICT(%)
[10]	CHF( $n=24$ , HIIT=10)	3 d/周,30 s 100% WRp,30 s 休息期	3 d/周,40 min 50% WRp	36 次	功率自行车	7.8	5.8
[11]	CHF(LVEF<40%) ( $n=26$ ,HIIT=12)	5 d/周,12×30 s,50% (4 周) +80% (4 周) 最大功率,1 min 完全恢复期	5 d/周,45 min,VAT 的 HR 水平	8 周	功率自行车 (HIIT) 功率自行车+ 跑台(MICT)	27.1	1.9
[12]	CHF 伴 OMI (LVEF<40%) ( $n=20$ ,HIIT=10)	2~5 d/周,2~4×4 min,75%~80% HRR, 3 min 积极恢复期 45%~50% HRR	2~5 d/周,30~45 min, 45%~60% HRR	12 周	跑台	22	22
[13]	MI 后 CHF ( $n=27$ ,HIIT=9)	3 d/周,4×4 min,90%~95% $HR_{\text{peak}}$ ; 3 min 积极性恢复 50%~70% $HR_{\text{peak}}$	3 d/周,47 min,70%~ 75% $HR_{\text{peak}}$	12 周	跑台	46	14
[14]	CHF ( $n=21$ ,HIIT=11)	3 d/周,30 s 100% WRp,30 s 恢复 时间, 总时间 40 min	3 d/周,50% WRp	36 次	功率自行车	8.5	8.5
[15]	CHF(LVEF<35%) ( $n=20$ ,HIIT=10)	3 d/周,30×1 min,70% $VO_{2\text{ peak}}$ , 1 min 的恢复时间	3 d/周,30 min, 70% $VO_{2\text{ peak}}$	16 周	功率自行车	21	13
[16]	CABG 和 PCI 的 CAD( $n=22$ , HIIT=11)	2 d/周,10×1 min 的 89% PPO, 1 min 恢复期,10% PPO	2 d/周,30~50 min 的 58% PPO	12 周	功率自行车	24	19
[17]	CABG 术后 ( $n=59$ ,HIIT=30)	5 d/周,4×4 min 的 90% $HR_{\text{peak}}$ , 3 min 恢复时间	5 d/周,46 min	4 周	跑台	12.1	8.8
[18]	CHF(LVEF<40%) AYHA II, III ( $n=45$ ,HIIT=15)	3 d/周,5×3 min,80% $VO_{2\text{ peak}}$ , 3 min 恢复期,40% $VO_{2\text{ peak}}$	3 d/周,60 min 60% $VO_{2\text{ peak}}$	12 周	功率自行车	22.5	0.6
[19]	CAD ( $n=17$ ,HIIT=8)	3 d/周 4×4 min 的 80%~ 90% $VO_{2\text{ peak}}$ ,总时间 33 min	3 d/周,41 min 的 50%~ 60% $VO_{2\text{ peak}}$	10 周	跑台	17.9	7.9
[20]	CAD (CABG 术前或 AP) ( $n=14$ ,HIIT=7)	2 d/周,2 min 的 90% $VO_{2R}$ 2 min 休息,总 30 min	2 d/周,30 min 65% $VO_{2R}$	16 周	跑台	31.8	9.5
[21]	心脏支架的 CAD ( $n=36$ ,HIIT=16)	3 d/周,4×4 min 的 85%~95% $HR_{\text{peak}}$ 3 min 积极恢复期,70% $HR_{\text{peak}}$	3 d/周,46 min 的 70% $HR_{\text{peak}}$	12 周	跑台	10.6	6.7
[22]	MI ( $n=89$ ,HIIT=30)	2 d/周,4×4 min 的 85%~95% $HR_{\text{peak}}$ , 3 min 恢复期	2 d/周,60 min 的 58% PPO	12 周	跑台	14.6	7.8
[23]	CAD ( $n=37$ ,HIIT=17)	3 d/周,7×3 min 的 RCP, 7×3 min 恢复期的 VAT,共 42 min	3 d/周 50 min 的 VAT	3 个月	跑台	23.3	24.6

续表

参考文献	样本	HIIT	MICT	持续周期	运动设备	VO <sub>2 peak</sub> HIIT(%)	增加% MICT(%)
[24]	CAD(CABG、MI 或 PCI 术后) (n=28, HIIT=15)	3 d/周, 4×4 min 的 80% ~ 90% HRR	3 d/周, 30 min 的 60% ~ 70% HRR	10 周	跑台	16	8
[25]	CAD (n=173, HIIT=85)	3 d/周, 4 × 4 min 的 90% ~ 95% HR <sub>peak</sub> , 3 min 的积极恢复期	3 d/周, 37 min 的 70% ~ 75% HR <sub>peak</sub>	12 周	功率自行车	22.7	20.3

注: CHF: 充血性心力衰竭; WRP: 峰值运动功率; LVEF: 左室射血分数; OMI: 陈旧性心肌梗死; HRR: 心率储备; MI: 心肌梗死; CABG: 冠状动脉搭桥术; PCI: 经皮冠脉介入术; PPO: 峰值功率输出; VO<sub>2R</sub>: 摄氧量储备; AP: 心绞痛; RCP: 呼吸代偿点; VAT: 通气无氧阈。

## 2.2 HIIT 对心脏病患者自主神经系统平衡的影响

自主神经系统功能紊乱在原发性高血压、心肌梗死(myocardial infarction, MI)和慢性心力衰竭的早期阶段具有重要的病理生理作用,导致冠状动脉收缩,增加心脏耗氧量,并引起致命的心血管事件<sup>[26-30]</sup>。交感神经系统功能亢进是心律失常和猝死的触发因素<sup>[31-32]</sup>。心血管疾病的药理学治疗需降低交感神经系统过度活跃<sup>[33-34]</sup>,并且提高副交感神经系统的活跃度<sup>[35]</sup>。在非药理学技术中,运动训练增强心脏自主神经系统平衡是治疗心血管系统疾病的一种有潜力的治疗方法<sup>[36-37]</sup>。Guiraud 等<sup>[38]</sup>研究了一个优化和安全的 HIIT 方案。18 例慢性心力衰竭患者接受基线评估,随机分为一次性 HIIT 组(100% 峰值功率输出运动 30 s, 30 s 间歇恢复交替进行)和等能量消耗的 MICT 组。与 MICT 组相比,HIIT 干预显著增加副交感神经张力。同时,研究指出仅 HIIT 运动方式对心率变异性及室性期前收缩具有明显的有益影响,意味着运动后交感-迷走神经平衡重构,提示 HIIT 比 MICT 能更有效地实现慢性心力衰竭患者的自主神经再平衡。

## 2.3 HIIT 对心脏病患者运动依从性的影响

运动依从性是改善心脏病患者长期预后的重要因素。运动依从性不佳是心脏康复领域普遍存在的问题<sup>[39-41]</sup>。因此,改善心脏病患者的运动依从性显得尤为重要。有两项研究指出 HIIT 可明显地改善心脏病患者的运动依从性。Aamot 等<sup>[42]</sup>研究发现心脏病患者(包括 69.7% 的 MI 患者、22.4% 冠状动脉搭桥术患者和 7.9% 急性冠脉综合征患者)进行 12 周的 HIIT 后(每周 2 次),在 1 年随访期间自我报告具有很好的运动依从性,大多数参与者(>90%)达到建议的每日 30 min 中等强度体育锻炼水平。Moholdt 等<sup>[22]</sup>在 MI 患者中研究了 HIIT 和 MICT 对运动依从性影响的差异性,结果发现与基于医院环境进行的 MICT 相比,HIIT 康复停止后 30 个月内自我报告的体力活动水平更高,提示 HIIT 较 MICT 更有效地改善了 MI 患者的

运动依从性。

## 2.4 HIIT 对心脏病患者 HRQoL 的影响

改善心脏病患者的 HRQoL 是心脏康复的目的之一。当前已有 HIIT 对心脏病患者 HRQoL 影响的相关研究。Chrysohoou 等<sup>[43]</sup>研究发现,12 周的 HIIT 导致慢性心力衰竭患者 HRQoL 明显改善。Jaureguizar 等<sup>[44]</sup>在 CAD 患者的研究中发现 HIIT 和 MICT 均能明显改善 HRQoL,且 HIIT 改善程度更明显。Nytrøen 等<sup>[45]</sup>和 Christensen 等<sup>[46]</sup>对心脏移植受者研究发现 HIIT 能明显改善 HRQoL,且改善程度明显优于 MICT。但也有不同的研究结果,Dall 等<sup>[47]</sup>发现尽管 HIIT 和 MICT 两种干预方式都能明显增加心脏移植受者 HRQoL,但两种干预方式改善程度无明显不同。最近, Nytrøen 等<sup>[48]</sup>对挪威的纳维亚地区新接受心脏移植的受者(术后 7 ~ 12 周)进行研究,发现 HIIT 和 MICT 对 HRQoL 的改善也无明显不同。今后需进一步在心脏病患者中研究 HIIT 和 MICT 对 HRQoL 的改善作用及二者之间的差异性。

## 2.5 HIIT 在心脏康复中的安全性

心脏病患者进行激烈的运动存在潜在的风险,特别是在缺乏训练有素的医务人员的监督下风险将进一步增加。来自康复实践的调查数据显示,传统的 MICT 在心脏康复中是安全的。例如,一项来自法国的观察研究对 65 所心脏康复中心的 25 420 例患者(包括 34.3% 冠状动脉搭桥术患者、18.4% 瓣膜手术患者、21.6% 经皮冠脉介入术患者及 13.2% 其他冠状动脉疾病和 12.5% 非冠状动脉疾病患者)进行调查,每 49 565 个训练小时发生一次心血管事件<sup>[49]</sup>。另一项针对来自日本的 136 家医院报道的手术恢复期的心脏病患者执行心脏康复方案的观察研究发现,每 383 096 个训练小时发生 12 次不良心血管事件和 1 次威胁生命的心血管事件<sup>[50]</sup>。

Rognmo 等<sup>[51]</sup>对 4 846 例心脏病患者(包括 7% MI 患者、40% 血管成形术患者、35% 冠状动脉手术患者、

11% 瓣膜手术患者和 7% 心力衰竭患者) 进行 MICT 和 HIIT 不良心血管事件的比较显示, MICT 每 129 456 个训练小时发生 1 次不良心血管事件, HIIT 每 23 182 个训练小时发生 1 次不良心血管事件, 其中 MICT 只有 1 次致命性心搏骤停, HIIT 具有 2 次非致命性心搏骤停。他们得出结论, 在心脏康复中 HIIT 和 MICT 发生心血管事件的风险都较低。Hannan 等<sup>[52]</sup> 对 CAD 患者的所有心血管不良事件进行回顾分析。他们的分析包含了 17 项研究(共 953 例患者), 其中 465 例患者进行 HIIT, 488 例患者进行 MICT。研究显示 HIIT 和 MICT 都未造成患者死亡或发生重大心血管事件。但与 HIIT 干预相比, MICT 干预总的心血管不良事件更多(HIIT 发生 9 起, MICT 发生 14 起), 结论认为在心脏康复方案中, HIIT 似乎与 MICT 同样安全。

鉴于在心脏康复中 HIIT 和 MICT 导致不良心血管事件发生率都很低, 尚不能科学严谨地评价两种训练方式给心血管事件带来的风险高低, 未来需进一步加强关于 HIIT 的安全性研究。

### 3 HIIT 在心脏康复中的适宜人群

鉴于当前 HIIT 在心脏康复领域的基础和实践研究结论, 美国心脏协会推荐的需接受心脏康复的适宜人群, 包括冠状动脉搭桥术患者、经皮冠脉介入术治疗后的血管重建术患者、稳定型心绞痛患者、心脏瓣膜修复患者和稳定性心力衰竭患者, 在心脏康复方案中均可采用 HIIT。

运动实践中发生急性心血管事件的风险与很多因素有关, 包括心血管疾病病理特征(患病类型和严重程度)、疾病相关症状的稳定性、患者年龄、是否存在多种并发症、基线健康水平和运动史等<sup>[53]</sup>。因此, 心脏康复实践中 HIIT 可能更适合于心脏病理特征不复杂、症状较稳定和基线健康水平较高的年轻患者。例如, HIIT 主要应用于 NYHA I ~ III 级心力衰竭患者, 尚未应用于 NYHA IV 级心力衰竭患者, 且在该群体中无证据表明其安全性, 因此, HIIT 不能推荐给这一类心力衰竭患者。另外, 心脏移植受者也是 HIIT 的适宜人群。Hermann 等<sup>[54]</sup> 和 Nytrøen 等<sup>[45]</sup> 较早进行心脏移植受者中进行 HIIT 康复研究, 研究结果支持 HIIT 对于年龄 > 18 岁、症状稳定和术后 1 年以上的心脏移植受者是一种非常安全有效的康复运动方式。Nytrøen 等<sup>[48]</sup> 最新研究结果表明, HIIT 对于心脏移植新受者(术后 7 ~ 16 周)同样安全有效。

### 4 HIIT 的心脏康复方案

先前研究表明心脏病患者进行运动康复能带来一定的安全风险。为降低 HIIT 给患者带来的心血管风险, 建议在开始运动前对心脏功能和缺血程度进行谨

慎评估。此外还建议进行心肺运动试验, 以评估 HIIT 前患者对运动的确切耐受性以及确定  $HR_{peak}$  和/或  $VO_{2 peak}$ 。

#### 4.1 HIIT 模式

科学研究和康复实践中最常见的 HIIT 模式为 4×4 min 模式, 该模式由 4 次 4 min 高强度运动, 3 次 3 min 间歇恢复阶段构成(见图 1<sup>[55]</sup>)。其他 HIIT 模式中高强度运动时间范围为 30 s ~ 4 min, 间歇恢复阶段时间范围为 30 s ~ 3 min。通常高强度运动时间越长, 间歇恢复阶段时间越长。实践中根据需要可灵活选择 HIIT 模式(表 1 显示了部分 HIIT 模式)。

	Interval		Interval		Interval		Interval	
Warm up		Active pause		Active pause		Active pause		Cool down
60%-70% of peak effort	85%-95%	60%-70%	85%-95%	60%-70%	85%-95%	60%-70%	85%-95%	60%-70%
Borg 16-18	Borg 11-13	Borg 16-18	Borg 11-13	Borg 16-18	Borg 11-13	Borg 16-18	Borg 11-13	Borg 16-18
10 min	4 min	3 min	4 min	3 min	4 min	3 min	4 min	

注: Warm up: 代表准备活动期; Interval: 代表高强度运动期; Active pause: 代表积极性间歇恢复期; Cool down: 代表整理活动期; Peak effort: 代表峰值运动强度; Borg: 即 Borg 量表值(量表值分级范围为 6 ~ 20, 代表主观用力程度), 量表值越大, 主观用力程度越大, 运动强度越大, Borg 值 11 ~ 13 介于主观感觉轻松到有点费力, Borg 值 16 ~ 18 代表主观感觉很费力。

图 1 4×4 min HIIT 模式

#### 4.2 HIIT 运动强度

%  $HR_{peak}$  和 %  $VO_{2 peak}$  是常用的表示 HIIT 运动强度的指标。HIIT 目标强度为 85% ~ 95%  $HR_{peak}$  或 80% ~ 90%  $VO_{2 peak}$ 。间歇恢复阶段由短暂的低强度运动(50% ~ 70%  $HR_{peak}$ )或完全不活动构成。准备活动和整理活动的强度一般为 50% ~ 70%  $HR_{peak}$ 。

#### 4.3 HIIT 持续时间

康复实践中一次 HIIT 持续总时间范围为 35 ~ 60 min。其中包括 10 min 的准备活动和 5 min 的整理活动。例如一次 4×4 min 模式的 HIIT, 高强度运动时间为 16 min, 间歇恢复阶段时间为 9 min。加上准备活动和整理活动时间, 总时间约为 40 min。实践中可从低剂量的运动方案(如 4×1 min 或 2×2 min)开始, 经过一段时间适应后逐渐增加运动剂量(如进行完整的 4×4 min)。

#### 4.4 HIIT 运动频率及康复周期

HIIT 运动频率可从每周 1 次开始, 逐渐增加至每周 3 ~ 5 次。少于 4 周的康复周期可能太短, 各种生理学和心理因素难以获得适应性改变, 因此 HIIT 的康复周期应保证在 4 周以上。实践中 HIIT 康复周期一

般维持在 8~12 周。

上述 HIIT 康复方案适宜于所有可以参加 HIIT 的心脏康复人群。心脏康复实践中,应根据患者的年龄、疾病特征、严重程度及自身体质水平等情况安排合理化的 HIIT 康复方案,同时注意康复期间的医务监督。

## 5 总结

综上所述,心脏病患者康复实践中,与 MICT 相比,HIIT 在改善  $VO_{2\text{ peak}}$ 、自主神经系统平衡和运动依从性等方面都表现出更大的效益。尽管不是所有研究都显示 HIIT 对 HRQoL 的改善优于 MICT,但尚无研究发现 HIIT 对 HRQoL 的改善不及 MICT。同时,HIIT 也未表现出心血管事件风险明显增加。因此,建议 HIIT 应系统地整合到心脏病患者,特别是症状稳定的较年轻患者的心脏康复方案中。今后需进一步加强关于 HIIT 的长期安全性和有效性的研究,提供更加可靠的理论基础和实践依据。

## 参考文献

- [1] Hambrecht R, Niebauer J, Fiehn E, et al. Physical training in patients with stable chronic heart failure: effects on cardiorespiratory fitness and ultrastructural abnormalities of leg muscles[J]. *J Am Coll Cardiol*, 1995, 25(6): 1239-1249.
- [2] Mezzani A, Hamm LF, Jones AM, et al. Aerobic exercise intensity assessment and prescription in cardiac rehabilitation: a joint position statement of the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation, the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation and the Canadian Association of Cardiac Rehabilitation[J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2013, 20(3): 442-467.
- [3] Balady GJ, Williams MA, Ades PA, et al. Core components of cardiac rehabilitation/secondary prevention programs: 2007 update: a scientific statement from the American Heart Association Exercise, Cardiac Rehabilitation, and Prevention Committee, the Council on Clinical Cardiology; the Councils on Cardiovascular Nursing, Epidemiology and Prevention, and Nutrition, Physical Activity, and Metabolism; and the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation[J]. *Circulation*, 2007, 115(20): 2675-2682.
- [4] JCS Joint Working Group. Guidelines for rehabilitation in patients with cardiovascular disease[J]. *Circ J*, 2014, 78(8): 2022-2093.
- [5] Laursen PB, Jenkins DG. The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes[J]. *Sports Med*, 2002, 32(1): 53-73.
- [6] 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.
- [7] Elliott AD, Rajopadhyaya K, Bentley DJ, et al. Interval training versus continuous exercise in patients with coronary artery disease: a meta-analysis[J]. *Heart Lung Circ*, 2014, 24(2): 149-157.
- [8] Piepoli MF, Corra U, Adamopoulos S, et al. Secondary prevention in the clinical management of patients with cardiovascular diseases. Core components, standards and outcome measures for referral and delivery: a policy statement from the cardiac rehabilitation section of the European Association for Cardiovascular Prevention & Rehabilitation. Endorsed by the committee for practice guidelines of the European Society of Cardiology[J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2012, 21(6): 664-681.
- [9] Schuler G, Adams V, Goto Y. Role of exercise in the prevention of cardiovascular disease: results, mechanisms, and new perspectives[J]. *Eur Heart J*, 2013, 34(24): 1790-1799.
- [10] Dimopoulos S, Anastasiou-Nana M, Sakellariou D, et al. Effects of exercise rehabilitation program on heart rate recovery in patients with chronic heart failure[J]. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*, 2006, 13(1): 67-73.
- [11] Freyssin C, Verkindt C, Prieur F, et al. Cardiac rehabilitation in chronic heart failure: effect of an 8-week, high-intensity interval training versus continuous training[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2012, 93(8): 1359-1364.
- [12] Iellamo F, Manzi V, Caminiti G, et al. Matched dose interval and continuous exercise training induce similar cardiorespiratory and metabolic adaptations in patients with heart failure[J]. *Int J Cardiol*, 2013, 167(6): 2561-2565.
- [13] Wisløff U, Støylen 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.
- [14] Roditis P, Dimopoulos S, Sakellariou D, et al. The effects of exercise training on the kinetics of oxygen uptake in patients with chronic heart failure[J]. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*, 2007, 14(2): 304-311.
- [15] Smart NA, Steele M. A comparison of 16 weeks of continuous vs intermittent exercise training in chronic heart failure patients[J]. *Congest Heart Fail*, 2012, 18(4): 205-211.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Fu TC, Wang CH, Lin PS, et al. Aerobic interval training improves oxygen uptake efficiency by enhancing cerebral and muscular hemodynamics in patients with heart failure[J]. *Int J Cardiol*, 2013, 167(1): 41-50.
- [19] Rognmo Ø, 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.
- [20] 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.
- [21] Madssen E, Moholdt T, Videm V, et al. Coronary atheroma regression and plaque characteristics assessed by grayscale and radiofrequency intravascular ultrasound after aerobic exercise[J]. *Am J Cardiol*, 2014, 114(10): 1504-1511.
- [22] 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.
- [23] Rocco EA, Prado DM, Silva AG, et al. Effect of continuous and interval exercise training on the PETCO<sub>2</sub> response during a graded exercise test in patients with coronary artery disease[J]. *Clinics (Sao Paulo)*, 2012, 67(6): 623-628.
- [24] Tjønnå AE, Lee SJ, Rognmo Ø, et al. Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic syndrome: a pilot study[J]. *Circulation*, 2008, 118(4): 346-354.
- [25] Conraads VM, Pattyn N, de Maeyer C, et al. Aerobic interval training and continuous training equally improve aerobic exercise capacity in patients with coronary artery disease: the SAINTEXCAD study[J]. *Int J Cardiol*, 2015, 179: 203-210.
- [26] Esler M, Lambert E, Schlaich M. Point: chronic activation of the sympathetic nervous system is the dominant contributor to systemic hypertension[J]. *J Appl Physiol*, 2016, 109(6): 1996-1998.
- [27] Hogarth AJ, Mackintosh AF, Mary DA. The sympathetic drive after acute

- myocardial infarction in hypertensive patients [J]. *Am J Hypertens*, 2006, 19 (10):1070-1076.
- [28] Schwartz PJ, de Ferrari GM. Sympathetic-parasympathetic interaction in health and disease; abnormalities and relevance in heart failure [J]. *Heart Fail Rev*, 2011, 16(2):101-107.
- [29] Kadoya M, Koyama H, Kurajoh M, et al. Sleep, cardiac autonomic function, and carotid atherosclerosis in patients with cardiovascular risks; HSCAA study [J]. *Atherosclerosis*, 2015, 238(2):409-414.
- [30] Malpas SC. Sympathetic nervous system overactivity and its role in the development of cardiovascular disease [J]. *Physiol Rev*, 2010, 90(2):513-557.
- [31] Vaseghi M, Shivkumar K. The role of the autonomic nervous system in sudden cardiac death [J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2008, 50(6):404-419.
- [32] Wu L, Jiang Z, Li C, et al. Prediction of heart rate variability on cardiac sudden death in heart failure patients; a systematic review [J]. *Int J Cardiol*, 2014, 174 (3):857-860.
- [33] Liggett SB, Cresci S, Kelly RJ, et al. A GRK5 polymorphism that inhibits beta-adrenergic receptor signaling is protective in heart failure [J]. *Nat Med*, 2008, 14 (5):510-517.
- [34] Triposkiadis F, Parissis JT, Starling RC, et al. Current drugs and medical treatment algorithms in the management of acute decompensated heart failure [J]. *Expert Opin Invest Drugs*, 2009, 18(6):695-707.
- [35] He X, Zhao M, Bi X, et al. Novel strategies and underlying protective mechanisms of modulation of vagal activity in cardiovascular diseases [J]. *Br J Pharmacol*, 2015, 172(23):5489-5500.
- [36] Joyner MJ, Green DJ. Exercise protects the cardiovascular system; effects beyond traditional risk factors [J]. *J Physiol*, 2009, 587(23):5551-5558.
- [37] Routledge FS, Campbell TS, McFetridge-Durdle JA, et al. Improvements in heart rate variability with exercise therapy [J]. *Can J Cardiol*, 2010, 26(6):303-312.
- [38] Guiraud T, Labrunee M, Gaucher-Cazalis K, et al. High-intensity interval exercise improves vagal tone and decreases arrhythmias in chronic heart failure [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2013, 45(10):1861-1867.
- [39] Dolansky MA, Stepanczuk B, Charvat JM, et al. Women's and men's exercise adherence after a cardiac event [J]. *Res Gerontol Nurs*, 2010, 3(1):30-38.
- [40] Moore SM, Charvat JM, Gordon NH, et al. Effects of a CHANGE intervention to increase exercise maintenance following cardiac events [J]. *Ann Behav Med*, 2006, 31(1):53-62.
- [41] Leon AS, Franklin BA, Costa F, et al. Cardiac rehabilitation and secondary prevention of coronary heart disease; an American Heart Association scientific statement from the Council on Clinical Cardiology (Subcommittee on Exercise, Cardiac Rehabilitation, and Prevention) and the Council on Nutrition, Physical Activity, and Metabolism (Subcommittee on Physical Activity), in collaboration with the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation [J]. *Circulation*, 2005, 111(3):369-376.
- [42] Aamot IL, Karlsen T, Dalen H, et al. Long-term exercise adherence after high-intensity interval training in cardiac rehabilitation; a randomized study [J]. *Physiother Res Int*, 2016, 21(1):54-64.
- [43] Chrysoshoou C, Tsitsinakis G, Vogiatzis I, et al. High intensity, interval exercise improves quality of life of patients with chronic heart failure; a randomized controlled trial [J]. *QJM*, 2014, 107(1):25-32.
- [44] Jaureguizar KV, Vicente-Campos D, Bautista LR, et al. Effect of high-intensity interval versus continuous exercise training on functional capacity and quality of life in patients with coronary artery disease; A RANDOMIZED CLINICAL TRIAL [J]. *J Cardiopulm Rehabil Prev*, 2016, 36(2):96-105.
- [45] Nytrøen K, Rustad LA, Aukrust P, et al. High-intensity interval training improves peak oxygen uptake and muscular exercise capacity in heart transplant recipients [J]. *Am J Transplant*, 2012, 12(11):3134-3142.
- [46] Christensen SB, Dall CH, Prescott E, et al. A high-intensity exercise program improves exercise capacity, self-perceived health, anxiety and depression in heart transplant recipients; a randomized, controlled trial [J]. *J Heart Lung Transplant*, 2012, 31(1):106-107.
- [47] Dall CH, Gustafsson F, Christensen SB, et al. Effect of moderate-versus high-intensity exercise on vascular function, biomarkers and quality of life in heart transplant recipients; a randomized, crossover trial [J]. *J Heart Lung Transplant*, 2015, 34(8):1033-1041.
- [48] Nytrøen K, Rolid K, Kristian A, et al. Effect of high-intensity interval training in de novo heart transplant recipients in Scandinavia [J]. *Circulation*, 2019, 139 (19):2198-2211.
- [49] Pavy B, Iliou M, Meurin P, et al. Safety of exercise training for cardiac patients: results of the French registry of complications during cardiac rehabilitation [J]. *Arch Intern Med*, 2006, 166(21):2329-2334.
- [50] Saito M, Ueshima K, Saito M, et al. Safety of exercise based cardiac rehabilitation and exercise testing for cardiac patients in Japan; a nationwide survey [J]. *Circ J*, 2014, 78(7):1646-1653.
- [51] Rognum O, Moholdt T, Bakken H, et al. Cardiovascular risk of high-versus moderate-intensity aerobic exercise in coronary heart disease patients [J]. *Circulation*, 2012, 126(12):1436-1440.
- [52] Hannan AL, Hing W, Simas V, et al. High-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training within cardiac rehabilitation; a systematic review and meta-analysis [J]. *Open Access J Sports Med*, 2018, 9:1-17.
- [53] Thompson PD, Franklin BA, Balady GJ, et al. Exercise and acute cardiovascular events; placing the risks into perspective; a scientific statement from the American Heart Association Council on Nutrition, Physical Activity, and Metabolism and the Council on Clinical Cardiology [J]. *Circulation*, 2007, 115 (17):2358-2368.
- [54] 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.
- [55] Yardley M, Gullestad L, Nytrøen K. Importance of physical capacity and the effects of exercise in heart transplant recipients [J]. *World J Transplant*, 2018, 8 (1):1-12.

收稿日期:2020-06-15