



大强度间歇训练与中等强度持续训练对耗氧量动力学特征影响的比较研究

The Comparative Study of High-Intensity Interval Training and Moderate-intensity Continuous Training on the Oxygen Uptake Kinetics

胡国鹏^{1,2}, 郑阳³, 孟妍⁴, 冯刚⁴, 冯魏^{1,2}

HU Guo-peng^{1,2}, ZHENG Yang³, MENG Yan⁴, FENG Gang⁴, FENG Wei^{1,2}

摘要:目的:比较大强度间歇训练(High-intensity Interval Training, HIT)和中等强度持续训练(Moderate-intensity Continuous Training, MCT)对斜坡测试(Ramp)、中等强度及高强度持续运动中耗氧量动力学(OUK, Oxygen Uptake Kinetics)等参数的影响。方法:36名青年男性受试者分为高强度间歇训练组(HIT)、中等强度持续训练组(MCT)和对照组(NOT), MCT和HIT两干预组分别进行6周、每周3次强度不同而训练量相同的运动干预;各组干预前(Pre)、中(Mid)、后(Post)分别进行Ramp力竭测试及中、高强度持续运动的OUK测试。结果:6周干预后, HIT与MCT两干预组 $\dot{V}O_{2max}/kg$ (最大耗氧量)、 $\dot{V}O_{2-VAT}$ (通气无氧阈耗氧量)、 $\dot{V}O_{2}/kg-VAT$ (通气无氧阈耗氧量相对值)、 $W_{aer-VAT}$ (通气无氧阈功率)均表现为干预后值高于干预前($P<0.05$)、干预中值($P<0.01$); 3组受试者之间上述参数组间差异显著($P<0.05$), 但仅表现HIT、MCT组与NOT组之间差异显著, HIT与MCT两组之间差异不显著($P>0.05$); A_{stop} (Delta效率)、 A_{OUES} (耗氧效率坡度)组间效应不显著($P>0.05$)。中等强度下OUK各参数仅有 τ (Tau, OUK时间常数)值组间效应显著($F=3.652, P=0.04<0.05$), HIT与MCT两干预组分别与NOT之间组间效应显著(HIT vs NOT, $P=0.027<0.05$; MCT vs NOT, $P=0.027<0.05$), 但HIT、MCT两干预组Mid、Post阶段, 组间差异不显著($P>0.05$), 各组各时间点TD值、A值组间差异不显著($P>0.05$)。大强度运动时 A_1 (A_1 耗氧幅度)值组间效应显著($F=4.439, P=0.011<0.05$), 除了MCT及HIT分别与NOT组组间差异显著外, HIT与MCT之间差异显著($P<0.05$), 6周后HIT组 A_1 值显著高于同阶段MCT组(1893.9 ± 132.1 vs $1632.3\pm340.0, P<0.05$); 而对于观测值 τ_1 , 3组受试者之间组间效应显著($F=9.083, P<0.01$), HIT及HIT组和NOT组相比, τ_1 显著降低, 并且HIT和NOT组间差异显著($P<0.05$); 3周后HIT组 τ_1 值已经显著高于NOT组(Mid: 42.5 ± 3.8 vs $53.7\pm4.3, P<0.01$), 而MCT在6周后出现(Post: 43.1 ± 4.6 vs $53.4\pm6.0, P<0.01$)。3周后HIT组 A_2 值比NOT组显著减低($P<0.05$), 6周后Post值显著低于MCT组及NOT组同阶段值($P<0.01$), 而MCT组在各阶段与NOT组之间差异不显著($P>0.05$)。 τ_2 虽有所升高, 但并无显著意义($P>0.05$)。结论:大强度间歇训练和中等强度持续训练均可提高 $\dot{V}O_{2max}$ 、VAT等心肺耐力评定参数, 但两种训练模式对上述参数改善并无显著区别; 两训练模式对中等强度下耗氧动力学参数影响无显著区别, 但大强度间歇训练在提高大强度运动过程中氧耗应答速率及减少耗氧量慢成分方面有着更明显的优势。

关键词: 间歇训练; 持续训练; 耗氧动力学; 最大耗氧量; 无氧阈

Abstract: Objective: The purpose of this study was to compare the effect on oxygen uptake kinetics between high-intensity interval training and moderate-intensity continuous training. Methods: 36 subjects were divided into high intensity interval training group (HIT group), moderate-intensity continuous training (MCT group,) and the control group (NOT). The subjects of MCT and HIT were trained respectively for 6 weeks, the four tests were performed before the intervention in the middle of it and after it, including the ramp incremental load exhaustive test (ramp), and oxygen uptake kinetics of moderate intensity and high intensity continuous cycling. Results: After 6-week, the intervention showed higher post value than the mid and the pre of $\dot{V}O_{2max}/kg$, $\dot{V}O_{2-VAT}$, $\dot{V}O_{2}/kg-VAT$ ($P<0.05, P<0.01$), $W_{aer-VAT}$ in HIT and MCT; There were significant differ-

ence between the above parameters between three groups ($P < 0.05$), but only between the HIT, MCT group with NOT group, no significant difference between HIT and MCT. There was no significant differences in A slop and AOUES between three groups ($P > 0.05$). Only τ (Tau, OUE Time Constant,) value showed significant difference between group effects ($F=3.652$ $P=0.04 < 0.05$), in moderate-intensity OUK parameters, which was the two intervention groups of MCT and HIT with and control group respectively, but not in pre and med between HIT ($P > 0.05$); TD and A value, in each group at different stage between groups, had no significant difference ($P > 0.05$). There was significant effect between groups on A_1 (A, oxygen consumption amplitude) value in high intensity exercise ($F=4.439$, $P=0.011 < 0.05$), not only between MCT and HIT with NOT groups, but also between HIT and MCT ($P=0.011 > 0.05$), A_1 of HIT group was significantly higher than the same period in MCT group (1893.9+132.1 vs 1632.3 + 340, $P < 0.05$); and for the τ_1 , after 6-week intervention, there were significant group effect ($F=9.083$, $P < 0.01$) in three groups, τ_1 value was decreased significantly in MIT and HIT group ($P < 0.05$); τ_1 value of HIT group was significantly higher than that of NOT group (Mid: 42.5+3.8 vs. 53.7+4.3, $P < 0.01$) after 3 weeks, but after 6 weeks in MCT group (post: 43.1+4.6 vs. 53.4+6). A_2 value of HIT group has significantly reduced ($P < 0.05$) after 3 weeks (mid), and the post value was significantly lower than the MCT group and the NOT group after 6 weeks ($P < 0.01$), while there was no significantly difference ($P > 0.05$) between the MCT group and the NOT group in different stage. τ_2 value was increased with no significant difference ($P > 0.05$). Conclusions: High-intensity interval training and moderate-intensity continuous training can improve cardiopulmonary endurance evaluation parameters of the $\dot{V}O_{2max}$, VAT, but the improvement showed no significant difference between two training modes; No significant effect was found on oxygen uptake kinetics in moderate-intensity continuous cycling, but more advantages were showed in increasing response rate of oxygen consumption and reducing the slow component of oxygen uptake kinetics in high intensity interval training.

Key words: interval training; continuous training; oxygen uptake kinetics; $\dot{V}O_{2max}$; anaerobic threshold

中图分类号:G804.2 文献标识码:A

1 前言

在以提高有氧耐力为目标的训练中,长时间中等强度持续训练(Moderate-intensity continuous training, MCT)是常用的经典训练方法,但近年大强度间歇训练(High-intensity interval training, HIT)在健身及运动康复中,尤其在以提高耐力水平的专业训练中被广泛采用。从提高运动能力的适应机制来看,保证ATP的快速转换生成是维持机体运动能力的关键,因此,3种典型的ATP生成模式效率的差异,决定着工作肌工作时间的长短。现已有文献研究认为,大强度间歇训练和持续训练对机体生理生化适应机制可能不相同,不同方式的高强度间歇训练可以更有效刺激运动中有氧氧化的生理适应过程^[12, 28, 32, 34],较短时间内提高机体氧化酶活性等^[16, 24];也有研究甚至认为,高强度间歇训练可以提高运动中愉快的自我感知度(ratings of perceived enjoyment),增加锻炼坚持性(exercise adherence)^[10]。虽然,HIT对运动能力、氧化酶等方面影响有了研究,但对不同人群、不同方式的大强度间歇训练所引起的训练效果还存在争议^[6, 8],两种训练模式对机体的适应过程目前还并不清楚。另外,从Mata分析来看,大强度间歇性康复训练对心脏病患者心血管功能的影响比传统持续训练有着较为明显的优势^[39],但是否适应于健康人群及

竞技体育也还存在争议,正如国内相关专家担忧,过度强调提高强度或者不适宜的无氧训练介入可能会影响耐力训练的效果^[1, 2]。

不同训练模式都离不开氧气摄取、转运及利用,因此,

收稿日期:2016-03-23; 修订日期:2017-02-27

基金项目:华侨大学中央高校基本科研业务费资助项目(13SKGC-QT14),国家体育总局重点研究领域攻关课题(2012B067)。

作者简介:胡国鹏,男,河南南阳人,副教授,博士,主要研究方向为运动医学、运动与健康促进, Tel: (0595)22693519, E-mail: hugp@hqu.edu.cn; 郑阳,女,上海人,副教授,主要研究方向为体育教学与训练, E-mail: 1303116669@163.com; 孟妍,女,辽宁沈阳人,助理研究员,硕士,主要研究方向为运动医学、运动损伤与康复, Tel: (0335) 8580901, E-mail: 85624973@qq.com。

作者单位: 1. 华侨大学 体育学院,福建,泉州,362021; 2. 华侨大学 体育与健康科学研究中心,福建,泉州,362021; 3. 北京第二外国语学院 体育部,北京,100024; 4. 国家体育总局 秦皇岛训练基地,河北,秦皇岛,066004。

1. Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 2. Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 3. Beijing International Studies University, Beijing 100024, China; 4. General Administration of Sport of China, Qinhuangdao 066004, China.

是否通过机体耗氧量的动态变化来分析机体在不同训练模型中的生理适应过程?这可能会为我们提供一些新的思路。任何强度的运动中,单一的供能方式是不存在的,尤其在运动开始阶段,当机体从静止状态突然增加到某一固定运动强度,伴随着ATP的快速转化,机体耗氧量($\dot{V}O_2$, Oxygen Uptake)增长以特定时间常数(Time constant)为特征的指数函数增加至稳态(Steady State),这种耗氧量的动态转换称之为耗氧量动力学(Oxygen Uptake Kinetics, OUK)^[30, 38],是研究运动开始或者恢复期耗氧量动态变化特征的科学,和传统的最大耗氧量($\dot{V}O_{2max}$, Maximal oxygen uptake)、无氧阈(AT, Anaerobic threshold)等构成耗氧动力学系统,不同强度运动中,OUK呈现不同的参数特征^[3]。已经有研究表明,长期的耐力训练可以明显改变耗氧动力学参数,即使 $\dot{V}O_{2max}$ 、AT相同,使不同项目的长跑运动员耗氧动力学参数特征出现差异^[31]。OUK中的常量参数即时间常数(τ , Time constant)在该领域研究中有着重要意义,短的 τ 值意味着快的耗氧动力学, $\dot{V}O_2$ 更快达到稳态,长的 τ 值则意味着慢的耗氧动力学,需要更长的时间达到稳态,所累积的氧债(Oxygen deficit)越多^[5, 27, 30],而大强度持续运动中出现的耗氧慢成分(Slow Component)与肌肉收缩特性^[23]、疲劳^[20]、氧债^[41]等有较为密切的关系。因此,耗氧动力学对运动能力具有决定性作用^[29]。已经有研究表明,6周的持续性有氧训练可以减低耗氧慢成分^[22],但对中等强度持续运动中时间常数 τ 的影响,目前似乎并没有一致的结论^[30],而冲刺性间歇训练可以改变耗氧动力学参数,提高有氧耐力水平,但与持续训练相比,对耐力评价系统的影响过程并不清楚。因此,

是否可以借助耗氧动力参数来探讨HIT和MCT训练对机体机能变化的影响?基于上述分析,本研究基于两种假设:其一,持续训练和间歇训练对耗氧动力学系统有不同的影响,这些影响引起的训练效果有差异;其二,高强度间歇训练通过增加耗氧动力学速度、减少耗氧慢成分进而提高有氧耐力水平。

2 研究对象与方法

2.1 研究对象

36名体力活动良好的体育教育专业男性大学生受试者被招募(身高176.0±4.9 cm;年龄21.4±1.7岁;体重66.5±7.4 kg)。受试者随机分成3组:高强度间歇训练组(HIT, High-interval Interval Training)、中等强度持续训练组(MCT, Moderate Continuous Training Group)及对照组(NOT, NO Training),实验前受试者充分了解试验的风险与义务,并签订知情同意书。

2.2 研究设计

HIT及MCT两干预组分别进行6周自行车训练干预,强度分别为90% $\dot{V}O_{2max}$ 、60% $\dot{V}O_{2max}$, NOT组干预期间不改变生活方式,只进行常规的体力活动,3组受试者试验安排及训练情况如表1。训练过程中,用SUUNTO心率训练包监控训练强度。受试者靶心率计算通过Ramp测试中耗氧量和心率的线性关系,推算出相应受试者不同强度的靶心率,并把±5次作为靶心率区间,两干预组各阶段训练量相同(训练强度×训练持续时间)。受试者来自同一专业,保证教学训练量及内容相同,同时严格监控受试者的课外活动情况,控制其它干扰因素的影响。

表1 各组训练计划安排一览表

Table 1 Training Schedule of Experimental group and Control Group

分组		-1~0周	1~2周	3周	4周	5周	6~7周	8~9周
HIT	强度(% $\dot{V}O_{2max}$):		90	90		90	90	
	时长(s):		60	60		60	60	
	组数:		20	30		30	40	
	间隔(s):	实验室测试	60	60	实验室测试	60	60	实验室测试
MCT	强度(% $\dot{V}O_{2max}$):		60	60		60	60	
	时长(min):		30	45		45	60	
	组数:		1	1		1	1	
NOT			无训练,保持正常体力活动					

3组受试者在干预前(Pre)、中(Mid)、后(Post)进行实验室测试,每次测试包括4个测试项目,第1个测试项目为斜坡式递增负荷力竭测试(Ramp),确定 $\dot{V}O_{2max}$ 、通气无氧阈(VAT, Ventilatory Anaerobic Threshold)、80%VAT强度

及推算干预组不同% $\dot{V}O_{2max}$ 强度所对应的靶心率区间;第2个项目为两次中等强度持续运动重复测试+单次高负荷持续运动测试(M₂H₁T);第3个项目为单次中等强度持续运动测试+单次高负荷持续运动测试(M₁H₁T);第4个项目

目为单次高负荷持续运动测试(H₁T),其中第2~4个测试项目,其目标是分别建立中等强度和大强度耗氧动力学方程,其中第1个力竭测试和第2个测试之间间隔48 h以上,其余测试项目间隔24 h以上,干预期间,受试者不得进行额外的大强度训练和比赛。本实验设计基于Burnley^[17, 19]等的研究结论,并参考Berger^[12]、McKay^[35]等方案设计。

2.3 实验室测试方案

2.3.1 斜坡式递增负荷方案(Ramp)

测试前受试者在H/p/cosmos跑台上以6~8 km/h的速度热身5 min,之后进行常规拉伸。准备活动结束后,受试者佩戴好Cosmed K4B₂系统设备上功率自行车进行正式测试。初始功率为40w,运动2 min后功率每3 s增加1 w(20 w/min),受试者运动至力竭。测试过程中,监测 $\dot{V}O_2$ 、RER(呼吸交换率)、HR等信息,若发现HR及受试者表现异常时立即终止测试。运动结束后1 min内采集无名指指尖血测试血乳酸值。测试中为受试者提供自我疲劳感量表(RPE),记录受试者各个时间段的RPE值(7~20)作为判断是否达到 $\dot{V}O_{2max}$ 的一个参考值。受试者运动到力竭并经鼓励不能继续运动时及时停止功率自行车、K4B₂主机及PC端,并保存实验数据。去除测试者佩戴的仪器后,在运动结束1 min内用H/p/cosmos血乳酸测试仪进行血乳酸测试,测试时用干净棉签拭去第1滴血后再次采样测定。测试前对H/p/cosmos血乳酸测试仪试剂条进行标样测试。血乳酸试剂条按照要求温度保存,使用前30 min将其取出置于常温环境中。

VAT判断采用V-slop方法^[14],力竭判断标准及最大耗氧量判断标准参照胡国鹏^[3]等研究进行。

2.3.2 两次中等强度持续运动重复测试+单次高负荷持续运动测试方案(M₂H₁T)

以20 w负荷蹬车3 min后功率增加到个体80%VAT,连续蹬6 min,重复2次80%VAT运动,中间休息6 min(20w),最后1次休息后,进行1次6 min 90% $\dot{V}O_{2max}$ 强度持续运动。用K4b2监测耗氧量,3次6 min运动测试的开始及结束在主机上做Marks标记。

2.3.3 单次中等强度持续运动测试+单次高负荷持续运动测试方案(M₁H₁T)

以20 w负荷蹬车3 min后功率增加到个体80%AT(无氧阈),蹬车6 min后休息6 min,之后进行一次90% $\dot{V}O_{2max}$ 强度持续运动,每次6 min运动前后在主机上Marks做标示。

2.3.4 单次高负荷持续运动测试方案(H₁T)

以20 w负荷蹬车3 min后功率增加到个体90% $\dot{V}O_{2max}$ 强度,蹬车6 min后速度逐渐减低到20 w。

4次实验室测试均用心肺代谢测试分析系统监测呼吸代谢气体变化。每位受试者实验过程中采用功率车高度等参数设置保持一致;除Ramp测试外,其余功率车测试踏

频均控制在60±5 rpm。

2.4 耗氧量动力学的拟合及数理统计

2.4.1 Ramp测试中 Δ 效率及OUES拟合

Ramp测试中,对数据进行极值处理后进行5点移动均数平滑,然后采用每15 s时间间隔平均法进行处理,弃去前2 min数据后(之后开始递增负荷)建立功率和耗氧量的序列值,按照下述公式1进行拟合:

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}O_2(b) + A_{slop} \times (W) \quad (1)$$

这里 $\dot{V}O_2$ 表示功率开始增加前的基础值, A_{slop} 表示 Δ 效率(Delta Efficiency)即 $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta W$ 的线性拟合值,W表示功率^[3, 15]。

耗氧效率坡度(OUES, Oxygen Uptake Efficiency Slope)采用下列公式2拟合:

$$\dot{V}O_2 = A_{OUES} \log_{10} \times VE + b_{OUES} \quad (2)$$

这里 A_{OUES} 代表OUES值,即 $VE / \dot{V}O_2$,VE为每分通气量, b_{OUES} 为截距^[9, 37]。

2.4.2 中等强度持续运动动力学参数拟合

提取M₂H₁T和M₁H₁T测试中每位受试者3个6 min 80%VAT强度运动的耗氧量数据(M₂+M₁),先以s为间隔进行线性内插值处理,得到每个时间段间隔1 s的时间-耗氧量序列值,然后将同一时间点的 $\dot{V}O_2$ 值进行平均,得到单列t- $\dot{V}O_2$ 序列变化值,之后每3 s进行平均,按照下述指数函数3进行非线性拟合,得到 τ 、TD和A3个常量。

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_2(b) + A(1 - e^{-(t-TD)/\tau}) \quad (3)$$

t表示时间, $\dot{V}O_2(b)$ 表示运动前或安静状态下的基础值(baseline),A表示高于基础值的幅度即稳态耗氧量与基础值之差,TD表示延迟时间(Time Delay),表示延迟进入指数函数模式递增的时间,时间常数 τ (Tau, Time constant)代表函数中氧气递增速度问题,被认为反映机体机能的重要参数之一^[5, 30]。

2.4.3 大强度持续运动动力学参数拟合

提取M₂H₁T、M₁H₁T和H₁T 3个测试中的3个6 min 90% $\dot{V}O_{2max}$ 大强度耗氧量数据,以s为间隔进行内插值处理,同一时间点平均后再每3 s进行平均,获取一列时间序列数据进行指数函数拟合,此列数据采取分段函数拟合,前3 min为一段,后4~6 min为一段。拟合公式如下:

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_2(b) + A_1(1 - e^{-(t-TD_1)/\tau_1}) \quad (\text{第一段 } 0 \sim 3 \text{ min}) \\ + A_2(1 - e^{-(t-TD_2)/\tau_2}) \quad (\text{第二段 } 4 \sim 6 \text{ min})$$

大强度运动中的第1段函数表示运动后的主应答函数,各参数意义同中等强度耗氧动力学参数,第2段描述的是耗氧量慢成分($\dot{V}O_2$ Slow Component), A_2 表示慢成分形成的幅度,TD₂表示慢成分出现前的延迟时间, τ_2 表示慢成分形成的时间常数^[3, 30]。

2.5 主要仪器及设备

气体代谢测试分析系统(Cosmed k4B₂, Italy),训练用动感单车(Swordsman, CM-280, 中国),团队训练心率监控

仪 (SUUNTO t6d, Finland)、功率车 (Monark 894E, Sweden), 运动跑台 (h/p/cosmos, German), 乳酸测试仪 (h/p/cosmos, German) 等。

2.6 主要测试观察指标及缩写

耗氧量 ($\dot{V}O_2$), $\dot{V}O_{2max}$, VE (通气量)、HR、RER、 Δ 效率 (A_{slope} , Delta Efficiency), VAT (通气无氧阈), $\dot{V}O_{2-VAT}$ (通气无氧阈耗氧量)、Waat-VAT (通气无氧阈功率), 氧效率坡度 (OUES, oxygen uptake efficiency slope), 耗氧动力学 (OUK, Oxygen uptake kinetics), τ (耗氧动力学时间常数, Time constant) 等。

2.7 统计方法

耗氧动力学线性拟合在 MATLAB 7.0 进行, 其它统计分析采用 SPSS 20.0 统计软件对实验前 (Pre)、中 (Mid)、后 (Post) 数据进行重复测试的方差分析, 组间因素为训练分组, 分析中如球形检验不通过, 采用 Greenhouse - Geisser 进行校正, 并对同一组不同时间点参数进行两两比较, 当校正系数 Epsilon < 0.7 时, 选择 Bonferroni 法, $P < 0.05$ 为显著水平, 事后分组多重比较 (Post Hoc Tests) 采用 Tukey HSD 法; 3 组间同一时间点参数比较, 采用多元方法方差

分析, 并采用 LSD 法进行事后两两比较, $P < 0.05$ 为显著水平; 数据表达为平均值 \pm 标准差, 数据根据需要, 小数点后保留 0~3 位。

3 研究结果

3.1 斜坡测试中动力学变化特征分析

重复测试方差分析表明, 6 周训练后, $\dot{V}O_{2max}$ 、 $\dot{V}O_{2max}/kg$ 、 $\dot{V}O_{2-VAT}$ 、 $\dot{V}O_{2}/kg-VAT$ 、Waat-VAT 组间效应显著 ($P < 0.05$)。各组运动前 (Pre)、中 (Mid)、后 (Post) 各指标比较如表 2 所示, 其中, 对于 HIT、MCT 组来讲, 上述指标均表现为干预后 Post 值显著高于同组干预前 (Pre)、干预中 (Mid) 值 ($P < 0.05$); 组间分析表明, 对于 $\dot{V}O_{2max}$ 、VAT 相关指标, 虽然 MCT、HIT 两组干预后 Post 值明显比 NOT 组高 ($P < 0.05$), 但 MCT、HIT 组之间无显著差异 ($P > 0.05$); 另外, 上述指标 Mid 值与 Pre 值相比, 除了 Waat-VAT 的 Mid 值显著高于 Pre 值外 ($P < 0.05$), 其它指标虽然有明显变化, 但无统计学意义。而对于 A_{slope} 、 A_{OUES} , 组间效应不显著 ($P > 0.05$), 各组运动前、中、后虽然有减少, 但变化不具统计学意义 ($P > 0.05$)。

表 2 各组干预前中后各观察指标间的比较

Table 2 Comparison of OUK parameters before and after Intervention

	HIT		
	Pre	Mid	Post
$\dot{V}O_{2max}$	3 269 \pm 528	3 202 \pm 522	3 492 \pm 328 ^{##} ♀
$\dot{V}O_{2max}/kg$	47.6 \pm 4.5	49.2 \pm 4.5	55.0 \pm 4.4 ^{###} ♀
$\dot{V}O_{2-VT}$	2 092 \pm 428	2 218 \pm 412	2 682 \pm 352 ^{###} ♀♀
$\dot{V}O_{2}/kg-LT$	33.6 \pm 7.9	34.5 \pm 8.1	40.2 \pm 5.5 ^{##} ♀
Waat-VAT	105.0 \pm 35.4	126.9 \pm 30.0 [♀]	143.1 \pm 30.5 ^{##} ♀♀
A_{slope}	12.1 \pm 1.2	11.4 \pm 1.1	11.6 \pm 0.76
A_{OUES}	1 515.7 \pm 329.4	1 586.6 \pm 275.5	1 690.6 \pm 200.3 [*]
MCT			
$\dot{V}O_{2max}$	3 151 \pm 607	3 219 \pm 566	3 444 \pm 344
$\dot{V}O_{2max}/kg$	50.2 \pm 5.4	51.3 \pm 4.3	54.8 \pm 4.5 ^{###} ♀
$\dot{V}O_{2-VT}$	2 152 \pm 381	2 208 \pm 309	2 595 \pm 352 ^{##} ♀
$\dot{V}O_{2}/kg-LT$	33.1 \pm 6.3	34.9 \pm 6.1	42.8 \pm 2.7 ^{###} ♀
Waat-VAT	108.1 \pm 26.6	119.4 \pm 22.2 [♀]	143.1 \pm 22.5 ^{###} ♀♀
A_{slope}	11.8 \pm 1.3	11.5 \pm 0.9	11.5 \pm 1.0
A_{OUES}	1 529.7 \pm 378.0	1 620.3 \pm 316.5	1 636.6 \pm 243.3
NOT			
$\dot{V}O_{2max}$	3 260 \pm 682	3 246 \pm 521	3 290 \pm 579
$\dot{V}O_{2max}/kg$	47.8 \pm 3.9	47.8 \pm 4.7	48.2 \pm 2.9
$\dot{V}O_{2-VT}$	1 996 \pm 295	2 194 \pm 354	2 110 \pm 319
$\dot{V}O_{2}/kg-LT$	32.8 \pm 5.1	35.8 \pm 5.0	33.6 \pm 5.2
W-VAT	111.7 \pm 28.4	108.3 \pm 30.1	115.6 \pm 25.4
A_{slope}	11.9 \pm 0.5	11.8 \pm 0.8	12.0 \pm 0.6
A_{OUES}	1 575.0 \pm 286.8	1 584.2 \pm 244.4	1 580.4 \pm 280.1

注: *表示和 NOT 组同阶段值相比, 差异显著 ($P < 0.05$); **表示与同阶段 NOT 组相比, 差异非常显著 ($P < 0.01$); #表示与同组实验中 (Mid) 值比较差异显著 ($P < 0.05$), ##表示比较差异非常显著 ($P < 0.01$); ♀表示同组与实验前值 (Pre) 比较差异显著 ($P < 0.05$), ♀♀表示差异非常显著 ($P < 0.01$)。

3.2 中等强度运动中耗氧动力学变化

干预过程中,中等强度 OUK 各参数变化如表 3 所示,其中仅有 τ 值组间效应显著 ($F=3.652, P=0.04 < 0.05$), Post Hoc Tests 分析表明, HIT 与 MCT 两干预组分别与 NOT 组之间组间效应显著 (HIT vs NOT, $P=0.027 < 0.5$; MCT vs NOT, $P=0.027 < 0.5$), 各干预组实验中 (Mid)、实验后 (Post) 值与对照组 NOT 同期 τ 值相比, 差异显著 ($P < 0.05$) (图 1), 而各干预组的 Mid、Post 阶段, 虽然比 Pre 阶段显著减少, 但 HIT 和 MCT 之间并无显著差异 ($P > 0.05$); 各参数变化过程分析表明, 3 周后, HIT 及 MCT 组 τ 值均比干预前 Pre 明显缩短 ($P < 0.01$, 表 3, 图 2), 两训练模式均可使 τ 值缩短, 耗氧量动力学曲线上升速度增加, 出现耗氧曲线右侧漂移 (图 3); 而后 3 周训练, 虽然运动量增加, 但并没有使 τ 值进一步减少 (Mid 与 Post 之间差异不显著, $P > 0.05$); 另外, 各组各时间点 TD 值、A 值组间差异不显著 ($P > 0.05$)。

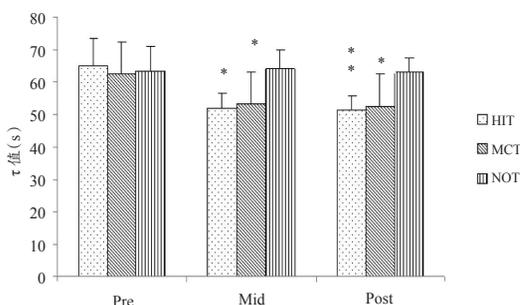


图 1 不同组间 τ 值比较

Figure 1. Comparison of τ Value between groups

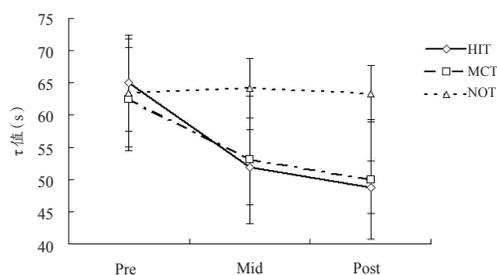


图 2 τ 值干预过程中的变化

Figure 2. Changes of τ Value in the Experiment

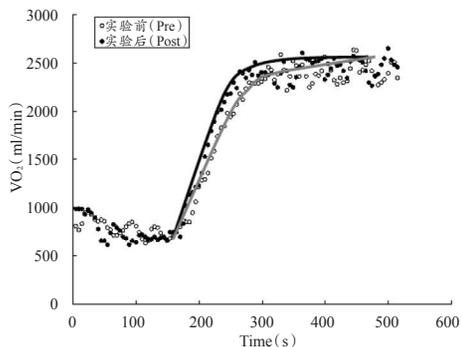


图 3 某一 HIT 组受试者实验前后中等强度耗氧动力学曲线变化

Figure 3. Change Curve of Moderate-Intensity Oxygen Uptake Kinetics in One Subject before and after the Intervention

表 3 各组中等强度耗氧动力学参数变化

Table 3 Changes of Oxygen Uptake kinetics Parameters of Moderate Intensity in Three Groups

	pre			mid			post		
	HIT								
A(ml/min)	915.6±266.4	846.3±186.9	852.3±224.8						
TD(s)	8.4±2.8	8.1±2.3	8.0±1.6						
τ (s)	65.0±8.4	51.9±4.6* [♀]	48.8±5.8** ^{♀♀}						
MCT									
A(ml/min)	898.7±287.0	939.9±263.9	938.5±257.2						
TD(s)	7.5±1.8	7.7±1.7	7.7±1.8						
τ (s)	62.5±8.0	53.1±9.9 [♀]	50.0±8.0 [♀]						
NOT									
A(ml/min)	992.8±254.8	973.5±160.3	914.7±153.4						
TD(s)	7.8±2.3	7.1±2.3	6.6±2.9						
τ (s)	63.5±7.5	64.2±5.8	63.3±4.1						

注: *表示与 NOT 组同阶段值比较差异显著 ($P < 0.05$), **表示与同阶段 NOT 组比较差异非常显著 ($P < 0.01$); [♀]表示与同组实验前 (Pre) 比较差异显著 ($P < 0.05$), ^{♀♀}表示差异非常显著 ($P < 0.01$)。

3.3 大强度运动中耗氧动力学变化

大强度运动时 OUK 双指数函数各观察指标变化情况如表 4 所示。6 周训练, 训练模式引起的 A_1 值显著增加, 组间效应显著 ($F=4.439, P=0.011 < 0.05$), Post Hoc Tests 分析表明, 除了 MCT 及 HIT 分别与 NOT 组间差异显著外, HIT 与 MCT 之间差异显著 ($P=0.011 < 0.05$)。 A_1 值干预过程中持续增加, 6 周后 HIT 组显著高于同阶段 MCT 组 (2396 ± 134 vs $1890 \pm 189.0, P < 0.05$, 图 4 左); 而对于观测值 τ_1 , 6 周训练使该值持续降低 ($P < 0.05$, 图 5 左), 组间效应显著 ($F=9.083, P < 0.01$), Post Hoc Tests 分析表明, MIT 及 HIT 组和 NOT 组相比, τ_1 显著降低 ($P < 0.05$), 且 MIT 和 HIT 组间差异显著 ($P < 0.05$); 对于两干预组 Mid 阶段, HIT 组与 MCT 之间差异显著 (42.5 ± 3.8 vs $49.4 \pm 4.9, P < 0.05$), 后 3 周虽然 τ_1 有继续下降趋势, 但 HIT 组与 MCT 之间差异不显著 (Post: 37.5 ± 6.5 vs $43.1 \pm 4.6, P > 0.05$)。 τ_1 改变因训练模式区别而出现变化趋势的不同, HIT 训练使 τ_1 在 3 周后即显著高于 NOT 组 (Mid: 42.5 ± 3.8 vs $53.7 \pm 4.3, P < 0.01$), 而 MCT 在 6 周后出现 (Post: 43.1 ± 4.6 vs 53.4 ± 6.0)。对于第 2 段慢成分参数, 仅见 A_2 值组间差异显著 ($F=3.792, P < 0.05$), 具体表现为 HIT 组 3 周后 Mid 值已经显著减低 ($P < 0.05$), 6 周后 Post 值显著低于 MCT 组及 NOT 组 ($P < 0.01$) (图 4 右), 而 MCT 组在各阶段与 NOT 组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。 τ_2 虽有所升高, 但是并无显著意义 ($P > 0.05$) (图 5 右)。从图 6 可见, HIT 训练使受试者耗氧动力学曲线向右偏移幅度明显比 MCT 训练要大, 慢成分减少。

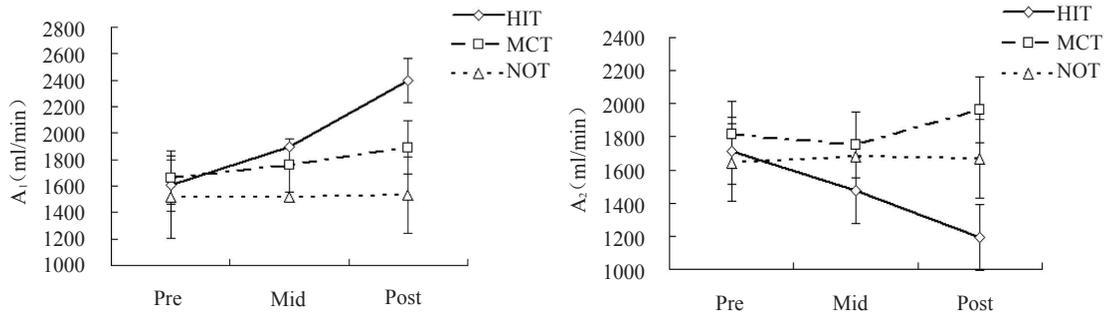


图 4 大强度持续运动中耗氧动力学参数 A 值变化

Figure 4. Change of "A" Value in the High-Intensity Oxygen Uptake kinetics

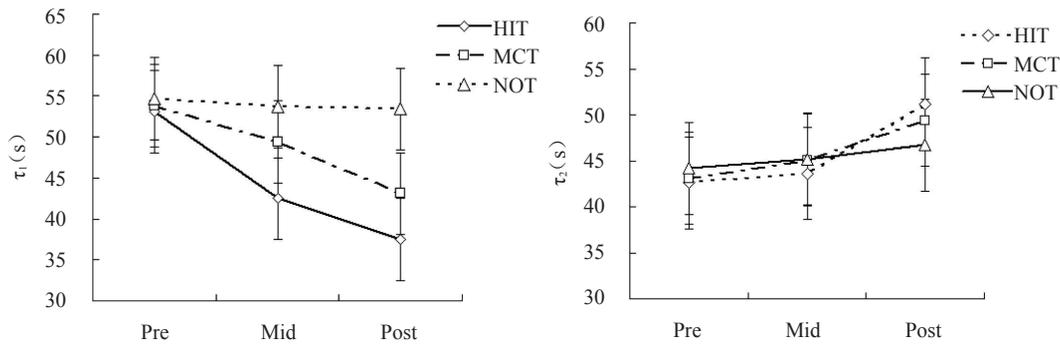


图 5 大强度持续运动中耗氧动力学参数 τ 值变化

Figure 5. Change of " τ " Value in the High-Intensity Oxygen Uptake kinetics

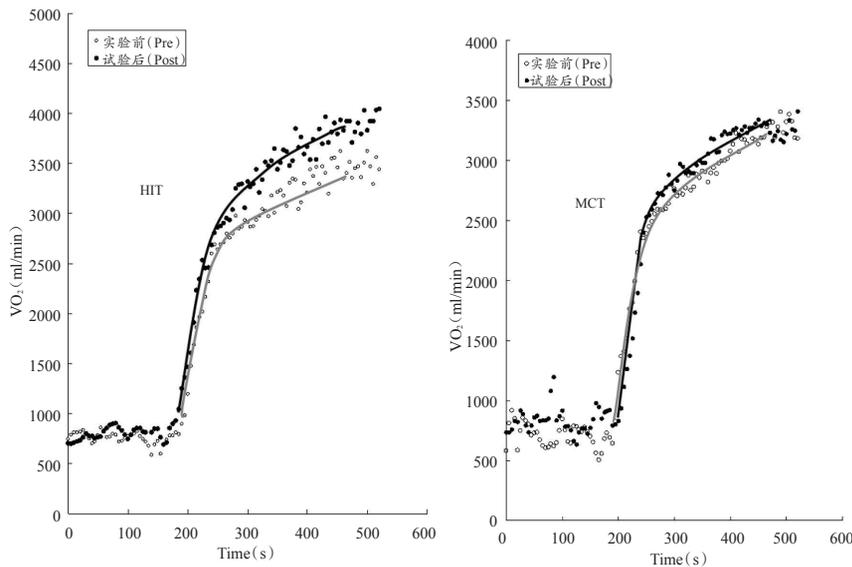


图 6 两位不同组受试者干预前后大强度耗氧动力学曲线变化

Figure 6. Change Curve of High-Intensity Oxygen Uptake Kinetics in Two Subjects before and after the Intervention

表 4 各组大强度持续运动时耗氧动力学参数变化

Table 4. Changes of High-Intensity Oxygen Uptake kinetics Parameters in Three Groups

	HIT			MCT			NOT		
	pre	mid	post	pre	mid	post	pre	mid	post
A_1 (ml/min)	1 606±107	1 894±132	2 396±134 ^{###}	1 664± 275.0	1 757±272	1 890±189	1 514.7±310.5	1 514.4±288.1	1 534.6±282.3
TD_1 (s)	6.5±2.9	7.1±2.5	6.2±1.7	7.0±1.4	6.8±1.8	5.7±2.7	7.5±1.2	6.4±3.4	6.0±3.0
τ_1 (s)	53.1±5.9	42.5±3.8 ^{###}	37.5±6.5 ^{**}	53.8±6.9	49.4±4.9	43.1±4.6 ^{**}	54.7±5.6	53.7±4.3	53.4±6.0

续表4

	HIT			MCT			NOT		
	pre	mid	post	pre	mid	post	pre	mid	post
A ₂ (ml/min)	1 716±192	1 474±145*	1 191±105**	1 817±231	1 780±209	1 750±243**	1 646±237	1 682±236	1 667±188
TD ₂ (s)	96.1±15.9	92.8±18.5	92.8±28.5	97.5±18.6	88.8±14.9	88.9±11.6	87.3±11.7	94.1±9.8	92.6±10.3
τ ₂ (s)	42.6±7.0	43.6±7.0	51.2±10.9	43.1±12.2	45.1±12.2	49.4±6.2	44.2±3.8	45.2±8.3	46.7±5.2

注: #表示 HIT 和 MCT 组同阶段测试值比较, 差异显著 ($P < 0.05$), ##表示 HIT 和 MCT 组同阶段测试值比较, 差异非常显著 ($P < 0.01$); *表示和 NOT 组同阶段测试值比较差异显著 ($P < 0.05$), **表示与 NOT 组同阶段测试值比较差异非常显著 ($P < 0.01$)。

4 分析与讨论

4.1 不同训练模式对斜坡测试中耗氧动力学参数变化特征的影响

$\dot{V}O_{2max}$ 、AT 是评价心肺机能的重要生理指标, 同时也是决定耐力水平的主要生理参数之一。虽然对于高水平运动员 $\dot{V}O_{2max}$ 的可塑性一直存在争议, 但对于非优秀运动员或者是一般健康人群, 耐力训练可以有效提高 $\dot{V}O_{2max}$ 或者 AT。有关耐力训练对 $\dot{V}O_{2max}$ 的影响研究已经进行了很多, 不同训练水平、不同训练模式对最大耗氧量的影响不同, 同样, 作为间歇训练的效果, 对不同人群的效果并不一样^[6]。越来越多的研究认为, 大强度训练是刺激机体有氧耐力的重要手段, 尤其是接近 $\dot{V}O_{2max}$ 强度运动。也有研究认为, 大强度间歇训练可以提高优秀长跑运动员的 $\dot{V}O_{2max}$ ^[36], 并且对优秀长跑运动员 $\dot{V}O_{2max}$ 的提升作用已经得到多项研究的证明^[13, 33, 40], 而对非优秀运动员, HIT 训练效果并不一致, 具体的生理机制并不是很清楚。

在本研究中, 干预组的各阶段运动量相当(运动强度×运动时间), 因考虑到受试者的适应情况, 各阶段运动量逐渐增加, 但两组每次总训练量相等。从两训练模式的效果来看, 6 周的训练对机体 $\dot{V}O_{2max}$ 、VAT 有着积极的影响, 均可使上述相关参数比对照组增加, 但两训练模式最终引起的变化并无明显区别, 从当前的研究来看, 或者仅从 $\dot{V}O_{2max}$ 及 VAT 的改善来看, 似乎还看不出两种训练模式的差别, 这和 Beauchamp^[11]、Berger^[12] 等的研究结论相似。从相关参数的变化过程来看, 3 周训练后, 除了无氧阈功率 HIT 组明显比训练前增加外, 相关参数均有改善, 但组间及组内差异并不显著, 随着训练量的增加, 6 周后均比训练前显著增加, 并且这种效果在后 3 周的增加更为明显。所以, 随着第 2 阶段总运动量的增加(强度不变, 运动时间增长), 对上述有氧耐力评价参数的影响也变大。在以提高 $\dot{V}O_{2max}$ 水平的训练中, 尽可能达到 $\dot{V}O_{2max}$ 水平是训练的目的, 而 HIT 训练的核心就是不断刺激机体达到高水平的耗氧量值, 以 $\dot{V}O_{2max}$ 的速度进行大强度训练, 平均 120 s 左右, 75% 的受试者耗氧量达到或者超过最大值^[4]。但从本研究来看, HIT 训练中强度是重要因素外, 总的刺激时

间也会影响训练效果。研究表明, 高强度间歇训练, 可以促使肌肉氧化酶活性的提高, 如柠檬酸合成酶及丙酮酸脱氢酶活性的提高, 这些代谢酶的提高一般伴随着运动能力的提高, 从而提高 $\dot{V}O_{2max}$ 及 VAT, 使有氧代谢能力提高, 延缓无氧代谢比例的递增。但 MCT 训练的适应机制也是改善代谢酶活性, 增加线粒体体积及数量, 增加毛细血管密度等, 二者在训练适应的生理机制方面既有相同点又有不同。分析推测认为, HIT 训练中, 所刺激的无氧和有氧系统同时动员, 同时, 快肌纤维参与比例较高, 对于快肌纤维氧化能力有着良好的影响; 而中等强度训练, 所引起的变化主要集中在慢肌纤维氧化能力的提高。另外, HIT 训练中对心血管功能影响较 MCT 要显著, 随着运动加强越接近最大耗氧量强度, 心肌的收缩力及每搏输出量会随运动强度增加而增加, 并比持续训练对心血管功能具有更加显著的影响^[39]。因此, 有研究认为, 对改善心肌衰竭病人的血液动力学、抗炎症、抗氧化方面, 有氧间歇训练比持续训练要好^[8]。

Δ 效率(Delta Efficiency)也叫耗氧量-功率坡度和耗氧效率坡度(oxygen uptake efficiency slope, OUES)是 Ramp 测试中两个重要的衍生参数。Δ 效率即 $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta W$ 的线性回归值, 是在 Ramp 递增负荷测试中每单位瓦特所需的能量消耗, 代表肌肉做功的能效水平, 被认为是反映所激活肌肉机械效率的参数, 可以提供激活肌纤维有效利用情况^[15]。而 OUES 代表运动中在既定的通气量下 $\dot{V}O_2$ 的增加率, 反映氧气有效被汲取并在体内利用情况, 即 $\dot{V}O_2 = A_{OUES} \log_{10} \times VE + B$ ^[26]。OUES 提供 $\dot{V}O_2$ 相对于 VE 的通气效率估计值, 即 VE 每增加 10 倍 $\dot{V}O_2$ 的绝对增加率, 斜率越大, 表示更大的通气效率^[9]。从本研究来看, 两种不同的训练模式并未引起两参数的显著变化。MCT 训练中, 慢肌纤维参与的比例比 HIT 训练中的要高, 反之, HIT 训练中, 快肌纤维参与比例要比 MCT 训练中的高。我们推想, 耗氧量的增加可能是因为骨骼肌机械效率的增加, 即 Δ 效率(Delta Efficiency)增加及通气效率 OUES 的改善, 但本实验结果并不支持这种假设。分析认为, Δ 效率(Delta Efficiency)和 OUES 的生理机制可能涉及到长期耐力训练中

的外周机制,本研究的受试对象身体特点及训练时间是否可能影响对该参数的观察,还需要进一步研究。

4.2 不同训练模式对不同强度持续运动中耗氧动力参数特征的影响

高水平的 $\dot{V}O_{2max}$ 并不意味着卓越的运动能力。在运动中,能量代谢并不是以恒定速度进行,而是不断的动态波动中,作为耗氧动力学研究的经典模型,就是在中等强度和高强度持续运动中,氧气从运动开始到达到平衡的转化率的评估,其代表参数为 τ 值,反映的是机体动态调整耗氧量能力的问题。在 VAT 以下强度运动时,耗氧量从开始递增到稳定的单指数函数中, τ 值代表耗氧量的增加速度,快的增加速度(短的 τ 值)预示着氧亏的减少,进而预示着节省了无氧工作能力^[29]。低于 AT 以下的持续运动中,大约在 2~3min 增加到稳态,而久坐、或者有心脑血管疾病的受试者,则需要更长的时间^[30]。有研究表明,高强度间歇训练和低强度持续训练对机体氧化能力及肺耗氧动力学的影响相似^[12, 35]。从本研究中的中等强度氧动力学特征来看,两种训练模式所引起的动力学速度变化并无明显区别,但从实验可以观察到,3 周后, HIT 组 τ 值下降程度已经比 MCT 组要大,然而,虽然 3 周训练量显著增加,但是并未引起两干预组 τ 值的进一步变化,这可能提示,中等强度耗氧动力学较快的适应过程。研究表明,高强度间歇训练可以提高机体的血红蛋白含量和白细胞数量,提高乳酸清除率,800 m 成绩提高^[7],而血红蛋白的改变直接影响到机体的载氧能力,但两训练模式对中等强度动力学适应性的调节还难以从本实验中区分,因此,从本研究来看, HIT 训练可以较快提高机体氧气调节的能力,而这种能力从长期训练效果来看,在中等强度下两训练模式对氧气调节能力并无明显区别。

从本研究大强度持续运动中耗氧动力学参数来看, MCT 及 HIT 训练均可使主成份的 A_1 值增加,耗氧量速度增加(τ 值减少),并且从 τ 值来看,6 周训练使 HIT 组主成分函数 τ_1 值明显比 MCT 组要低,并且这种差异在 3 周训练后即出现,说明这种适应性反应 HIT 训练组出现的更快,可以推测, HIT 训练在高强度运动能量调节方面具有较好的刺激效果,可以减少高强度运动时运动初始阶段因氧供不足造成的氧亏。而对于大强度运动的第 2 段慢成分函数来看,仅见 A_2 值的差异。 A_2 值代表无氧代谢的程度, A_2 值的减少意味着无氧代谢比例的减少,在大强度运动中,在可承受的运动时间段内,耗氧量慢成分是耗氧动力学中一种典型的现象,特指在大于无氧阈强度持续运动时,耗氧量快速增加(第一段函数)后引起耗氧量的缓慢增加(第 2 段函数),代表一种额外的氧耗。在运动中,慢成分引起更高的热积累率,如果环境条件不能降低热储备,就会导致过早的高热或者脱水。在大强度运动中,耗氧量慢成分持续提高直到达到 $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}O_{2max}$ 的到来也标志着运

动的终止。Garland 等通过对比爆发类项目运动员及耐力性运动员慢成分特点认为,这种慢成分幅度差异与肌纤维募集方式的差异有关^[23],从代谢机制来讲,慢成分的产生与大强度下工作效能差的肌纤维募集有关^[20, 21]。在大强度运动中,这种动力学决定了无氧能力(Anaerobic Capacity, AC)利用率和相关的代谢物累积率。所以,在大强度和极大强度运动的疲劳过程中,耗氧量慢成分可能位于两者疲劳过程的中心^[18]。II 型肌纤维参与比例的变化是慢成分变化的原因,所以结合本研究结果,推测认为, HIT 训练可以使运动中 II 型肌纤维募集减少,进而减少代谢废物在体内的堆积,延迟疲劳发生。

结合上述分析,研究认为,两种训练模式在较低代谢率下并无显著区别,但是随着运动强度增加, HIT 训练可以快速启动能量代谢系统,减少机体能量代谢惰性,减少无氧代谢供能的比例,因此,引起的耐力水平提高以增加有氧代谢比例、加快代谢废物清除为主(τ_2 值无显著变化,而 A_2 值减少),使耗氧曲线向左上漂移。已经有研究指出,足球运动员赛前进行高强度间歇训练,可以有效提高运动员的冲刺能力,减少运动中乳酸的堆积,运动训练可以引起适应性改变,这种改变可以减少骨骼肌代谢过程的惰性及加快氧气运输^[30],短时间高强度训练可以较快提高机体的代谢适应能力,提高骨骼肌的氧化代谢能力及有氧代谢为主的调控能力^[25],这些也证实了本研究的推测。另外, HIT 训练组这种适应性变化似乎比 MCT 训练调控出现的更早,3 周以后已经存在显著区别。这提示,在 HIT 间歇训练中,机体代谢波动的强烈刺激可以在较短时间内提高机体的调控能力,这可能包括体内激素水平的快速激活等,但这种调整会随着训练时间的增加而逐渐降低。

5 结论

1. HIT 和 MCT 训练均可提高 $\dot{V}O_{2max}$ 、VAT 等心肺耐力评定参数,但两种训练模式对上述指标改善并无显著区别。

2. 两训练模式对中等强度下耗氧动力参数影响无显著区别,但高强度间歇训练可以提高大强度运动过程中的耗氧应答速率,使慢成分明显减少,其影响过程存在更为显著的优势。

参考文献:

- [1] 陈小平. 我国耐力训练存在的主要问题——对训练强度失衡的反思[J]. 武汉体育学院学报, 2008, 42(4): 9-15.
- [2] 陈小平. 有氧与无氧耐力的动态关系及其对当前我国耐力训练的启示[J]. 体育科学, 2010, 30(4): 63-68.
- [3] 胡国鹏, 冯魏, 冯刚, 等. 不同运动模式下耗氧量动力特征参数关系研究[J]. 体育科学, 2015, 35(11): 45-51.
- [4] 胡国鹏, 刘无逸, 向剑锋. 最大耗氧量速度运动时的生理负荷分析及意义[J]. 体育科学, 2005, 25(8): 59-61.

- [5] 胡国鹏,王人卫.运动中摄氧量动力学的多相理论与生理机理[J].首都体育学院学报,2009,21(06):724-728.
- [6] 黎涌明.高强度间歇训练对不同训练人群的应用效果[J].体育科学,2015,35(8):59-75.
- [7] 秦剑杰.高强度间歇训练对有氧耐力影响的实验研究[D].石家庄:河北师范大学,2007.
- [8] 王京京,张海峰.高强度间歇训练运动处方健身效果研究进展[J].中国运动医学杂志,2013,32(3):246-254.
- [9] AKKERMAN M, VAN BRUSSEL M, HULZEBOS E, *et al.* The oxygen uptake efficiency slope: what do we know? [J]. *J Cardiopulm Rehabil Prev*, 2010, 30(6): 357-373.
- [10] BARTLETT J D, CLOSE G L, MACLAREN D P, *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.
- [11] BEAUCHAMP M K, NONOYAMA M, GOLDSTEIN R S, *et al.* Interval versus continuous training in individuals with chronic obstructive pulmonary disease--a systematic review [J]. *Thorax*, 2010, 65(2): 157-164.
- [12] BERGER N J, TOLFREY K, WILLIAMS A G, *et al.* Influence of continuous and interval training on oxygen uptake on-kinetics [J]. *Med Sci Sports Exe*, 2006, 38(3): 504-512.
- [13] BILLAT L V. Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part II: anaerobic interval training [J]. *Sports Med*, 2001, 31(2): 75-90.
- [14] BISI M C, STAGNI R, GNUDI G. Automatic detection of maximal oxygen uptake and ventilatory threshold [J]. *Comput Biol Med*, 2011, 41(1): 18-23.
- [15] BOONE J, BOURGOIS J. The oxygen uptake response to incremental ramp exercise: methodological and physiological issues [J]. *Sports Med*, 2012, 42(6): 511-526.
- [16] BURGOMASTER K A, HUGHES S C, HEIGENHAUSER G J, *et al.* Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans [J]. *J Appl Physiol*, 2005, 98(6): 1985-1990.
- [17] BURNLEY M, DOUST J H, JONES A M. Effects of prior heavy exercise, prior sprint exercise and passive warming on oxygen uptake kinetics during heavy exercise in humans. [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2002, 87(4-5): 424-432.
- [18] BURNLEY M, JONES A M. Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance [J]. *Eur J Sport Sci*, 2007, 7(2): 63-79.
- [19] BURNLEY M, JONES A M, CARTER H, *et al.* Effects of prior heavy exercise on phase II pulmonary oxygen uptake kinetics during heavy exercise. [J]. *J Appl Physiol*, 2000, 89(4): 1387-1396.
- [20] CANNON D T, WHITE A C, ANDRIANO M F, *et al.* Skeletal muscle fatigue precedes the slow component of oxygen uptake kinetics during exercise in humans [J]. *J Physiol*, 2011, 589(3): 727-739.
- [21] CARITA R A C, PESSOA FILHO D M, BARBOSA L F, *et al.* Slow component of $\dot{V}O_2$ kinetics: physiological determinants and implications for performance in aerobic exercises [J]. *Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum*, 2014, 16(2): 1802-1810
- [22] CARTER H, JONES A M, BARSTOW T J, *et al.* Effect of endurance training on oxygen uptake kinetics during treadmill running [J]. *J Appl Physiol*, 2000, 89(5): 1744-1752.
- [23] GARLAND S W, NEWHAM D J, TURNER D L. The amplitude of the slow component of oxygen uptake is related to muscle contractile properties [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2004, 91(2-3): 192-198.
- [24] GIBALA M J, LITTLE J P, VAN ESSEN M, *et al.* Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. [J]. *J Physiol*, 2006, 575(3): 901-911.
- [25] GIBALA M J, MCGEE S L. Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? [J]. *Exe Sport Sci Rev*, 2008, 36(2): 58-63.
- [26] HOLLENBERG M, TAGER I B. Oxygen uptake efficiency slope: an index of exercise performance and cardiopulmonary reserve requiring only submaximal exercise [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2000, 36(1): 194-201.
- [27] HUGHSON R L. Oxygen uptake kinetics: historical perspective and future directions [J]. *Appl Physiol Nut Metabol*, 2009, 34(5): 840-850.
- [28] JAN H, KJETILL H Y, EIVIND W, *et al.* Aerobic high-intensity intervals improve $\dot{V}O_{2max}$ more than moderate training. [J]. *Med Sci Sports Exe*, 2007, 39(4): 665-671.
- [29] JONES A M, BURNLEY M. Oxygen uptake kinetics: an underappreciated determinant of exercise performance [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2009, 4(4): 524-532.
- [30] JONES A M, POOL D C. *Oxygen Uptake Kinetics in Sports, Exercise and Medicine* [M]. Abingdon: Routledge, 2005: 1-3.
- [31] KILDING A E, WINTER E M, FYSH M. A comparison of pulmonary oxygen uptake kinetics in middle- and long-distance runners. [J]. *Int J Sports Med*, 2006, 27(5): 419-426.
- [32] KRUISTRUP P, HELLSTEN Y, BANGSBO J. Intense interval training enhances human skeletal muscle oxygen uptake in the initial phase of exercise at high but not at low intensities [J]. *J Physiol*, 2004, 559(1): 335-345.
- [33] LAURSEN P B, JENKINS D G. 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.
- [34] MARLES A, LEGRAND R, BLONDEL N, *et al.* Effect of high-intensity interval training and detraining on extra $\dot{V}O_2$ and

(下转封三)

197.

- [20] MICHIE J, OUGHTON C. Competitive balance in football: trends and effects [R]. Football Governance Research Centre Research Paper No. 2, Birkbeck University, 2004.
- [21] PIELOU E C. Shannon's formula as a measure of specific diversity: Its use and misuse [J]. *Am Natur*, 1966, 100(914):463-465.
- [22] ROTTENBERG S. The baseball player's labor market [J]. *J Politi Econ*, 1956, 64(3): 242-258.
- [23] SHANNON C E, WEAVER W. The Mathematical Theory of

Communication [M]. Univ Illinois Press, Urbana, 1963.

- [24] SPELLERBERG I F, FEDOR P J. A tribute to Claude Shannon (1916-2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon-Wiener' Index [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2003, 12(3):177-179.
- [25] UTT J, FORT R. Pitfalls to measuring competitive balance with Gini coefficients [J]. *J Sports Econ*, 2002, 3(4): 367-373.
- [26] WHITTAKER R H. Evolution and measurement of species diversity [J]. *Taxon*, 1972, 21(2/3): 213-251.

(上接第34页)

tries [J]. *J Phys Act Heal*, 2014, 11(Sup 1): 113-125.

- [86] WACHIRA L M, MUTHURI S K, TREMBLAY M S, *et al.* Results from Kenya's 2014 report card on physical activity for children and youth. [J]. *J Phys Act Heal*, 2014, 11(Sup 1): S69-S73.
- [87] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Adelaide Recommendations on Healthy Public Policy [EB/OL]. www.who.int/healthpromotion/conferences/previous/adelaide/en/index.html, 1988-04-

05.

- [88] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Sundsvall Statement on Supportive Environments for Health [EB/OL]. www.who.int/healthpromotion/conferences/previous/adelaide/en/index.html, 1991-06-09.
- [89] WORLD HEALTH ORGANIZATION. The Ottawa Charter for health promotion, Copenhagen [R]. Ottawa: WHO Regional Office for Europe, 1986.

(上接第67页)

on the $\dot{V}O_2$ slow component. [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 99(6): 633-640.

- [35] MCKAY B R, PATERSON D H, KOWALCHUK J M. Effect of short-term high-intensity interval training vs. continuous training on O_2 uptake kinetics, muscle deoxygenation, and exercise performance [J]. *J Appl Physiol*, 2009, 107(1): 128-138.
- [36] MIDGLEY A W, MCNAUGHTON L R, WILKINSON M. Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners? empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations [J]. *Sports Med*, 2006, 36(2): 117-132.
- [37] PEREZ G E N, ALBAN G E N, MONCAYO P M. Oxygen uptake efficiency slope (OUES), during training and competition at altitude moderate. [J]. *Med Sci Sports Exe*, 2011, 43(5): 286-287.

- [38] POOLE D C, BARSTOW T J, MCDONOUGH P, *et al.* Control of oxygen uptake during exercise [J]. *Med Sci Sports Exe*, 2008, 40(3): 462-474.
- [39] RAMOS J S, DALLECK L C, TJONNA A E, *et al.* The impact of high-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training on vascular function: a systematic review and meta-analysis [J]. *Sports Med*, 2015, 45(5): 679-692.
- [40] RONNESTAD B R, HANSEN J. Optimizing interval training at power output associated with peak oxygen uptake in well-trained cyclists [J]. *J Strength Cond Res*, 2013, 30(4): 999-1006.
- [41] SCOTT C B. Oxygen deficit and slow oxygen component relationships between intermittent and continuous exercise [J]. *J Sports Sci*, 1999, 17(12): 951-956.