

·基础研究·

不同运动方式对自发性高血压大鼠骨骼肌纤维类型与代谢的影响*

白春宏¹ 秦永生² 薄海² 王大宁² 彭朋^{2,3}

摘要

目的:探讨不同运动方式对自发性高血压大鼠(spontaneously hypertensive rats, SHR)骨骼肌纤维类型及代谢的影响,为高血压患者最佳运动处方制定提供科学依据和有效方法。

方法:30只3月龄雄性SHR随机分为安静组(SHR sedentary, SHR-S)、中等强度持续有氧运动组(SHR moderate continuous aerobic training, SHR-MCAT)和高强度间歇运动组(SHR high-intensity interval training, SHR-HIIT),同时以10只雄性Wistar-Kyoto大鼠作为正常血压对照组(WKY)。WKY和SHR-S组安静饲养,SHR-MCT、SHR-HIT组分别进行8周持续和间歇跑台运动。实验后利用递增负荷跑台实验测定力竭时间(exhaust time, ET),分离胫骨前肌(快肌, II型肌纤维为主)和比目鱼肌(慢肌, I型肌纤维为主),利用比色法测定柠檬酸合酶(citrate synthase, CS)(有氧代谢标志物)和乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)(无氧代谢标志物)活性,ATP酶染色法鉴定肌纤维类型(I、II)以及细胞横断面积(cross-sectional area, CSA)。

结果:a)与SHR-S组比较,SHR-HIIT组和SHR-MCAT组ET增加($P<0.05$);b)SHR-MCAT组比目鱼肌以及SHR-HIIT组比目鱼肌和胫骨前肌I型肌纤维比例增加($P<0.05$)、II型肌纤维比例减少($P<0.05$)、CSA升高($P<0.05$);c)SHR-MCAT组比目鱼肌CS活性升高($P<0.05$)。d)SHR-HIIT比目鱼肌和胫骨前肌CS、LDH活性均升高($P<0.05$)。与MCAT组比较,SHR-HIIT组ET、比目鱼肌和胫骨前肌CSA、CS和LDH活性均升高($P<0.05$)。

结论:不同运动方式均能够促进SHR骨骼肌肥大、诱导肌纤维向抗疲劳亚型转换,进而改善肌肉代谢和运动能力,以高强度间歇运动效果为佳。

关键词 运动方式;自发性高血压大鼠;骨骼肌;纤维类型;代谢

中图分类号:R544.1, R493 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2020)-03-0294-06

Effects of different training modes on skeletal muscle fiber type and metabolism in spontaneously hypertensive rats/BAI Chunhong, QIN Yongsheng, BO Hai, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 35(3): 294—300

Abstract

Objective: To investigate effects of different training modes on skeletal muscle fiber type and metabolism in spontaneously hypertensive rats (SHR), hoping to provide evidence and method of optimal exercise prescription for hypertensive patients.

Method: Thirty male SHR at 3 months of age were randomly divided into sedentary (SHR-S), moderate continuous aerobic training (SHR-MCAT) and high intensity interval training (SHR-HIIT) groups. Ten male Wistar-Kyoto rats were used as normotensive control group (WKY). Animals of SHR-S and WKY groups housed sedentarily while those of SHR-MCAT and SHR-HIIT groups conducted 8-week continuous or interval treadmill training respectively. 48h after training, exhaust time (ET) was detected by graded treadmill exercise test; anterior tibial muscle (fast muscle, mainly consist of type II muscle fibre) and soleus muscle (slow muscle, mainly

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2020.03.008

*基金项目:天津市自然科学基金项目(17JCYBJC274002)

1 武警后勤学院附属医院脊柱一科,天津市,300162; 2 武警后勤学院; 3 通讯作者

第一作者简介:白春宏,男,博士,副主任医师; 收稿日期:2018-07-27

consist of type I muscle fibre) were segregated, citrate synthase (CS) (marker of aerobic metabolism) and lactate dehydrogenase (LDH) (marker of anaerobic metabolism) activity were measured by colorimetry, muscle fiber types (I and II) and cross-sectional area (CSA) were determined by ATPase staining.

Result: Compared with WKY group, ET of SHR-S group decreased sharply, it raised in SHR-MCAT group ($P < 0.05$) and raised again in WKY group ($P < 0.05$). Compared with SHR-S group, the proportion of type I fiber increased ($P < 0.05$) and type II decreased ($P < 0.05$) in soleus of SHR-MCAT group ($P < 0.05$) and they changes most in soleus and tibialis anterior of SHR-HIIT group. At the same time, the CSA of soleus and tibialis anterior both increased gradually from SHR-S group to SHR-MCAT group and then to be normalized in SHR-HIIT group. The activities of CS and LDH decreased in SHR-S group. MCAT increased the CS activity of soleus ($P < 0.05$) and HIIT increased the CS and LDH activities of both soleus and tibialis anterior to normal.

Conclusion: MCAT can promote the muscle area of the spontaneously hypertensive rats, remodel the muscle types from type II to type I, and increased the activities of CS and LDH in both type of muscles. The benefit of HIIT is even more.

Author's address Affiliated Hospital of Logistics University of Chinese People's Armed Police Forces, Tianjin, 300162

Key word exercise modes; spontaneously hypertensive rats; skeletal muscle; fiber type; metabolism

高血压患者除心脏病变外,同时存在骨骼肌异常,包括肌肉萎缩、毛细血管数量以及线粒体含量减少,Ⅰ型纤维(慢肌)向Ⅱ型纤维(快肌)转换,有氧代谢能力降低,患者易发生疲劳、呼吸困难以及运动耐力下降^[1]。针对高血压患者的主要临床手段是药物治疗,然而降压药仅对心血管系统起作用,对骨骼肌并无良性效应。改善骨骼肌结构与代谢是改善高血压患者临床症状、提高生活质量的有效治疗策略。Meta分析表明^[2],运动特别是中等强度持续有氧运动(moderate continuous aerobic training, MCAT)是高血压患者非药物治疗的重要手段,能够有效降低安静血压水平、抑制心脏重塑并改善心功能,对骨骼肌的良性作用包括促进线粒体生物合成、增加毛细血管密度、延缓肌萎缩、上调Ⅰ型肌纤维比例,进而提升有氧代谢能力。近年来大众健身领域兴起一种新颖的运动方式——高强度间歇训练(high-intensity interval training, HIIT),诸多研究证实^[3],HIIT对于健康人以及慢性病患者的健康促进作用与传统MCAT方式相当,而所需运动时间较短,使参训者更易接受和坚持,其安全性亦得到广泛证实。一项关于不同运动方式对高血压患者作用效果的meta分析显示^[4],HIIT在改善心血管功能、胰岛素敏感性以及交感神经活性等方面均优于MCAT。但针对高血压患者的最佳运动处方尚未确定。动物实验显示^[5-6],长时间剧烈运动或力竭运动可加重心脏负

担,诱导心律失常。因此推测,病理状态下运动时应存在“强度阈”,超过该阈值易造成病理性适应。然而,Chicco等^[7]针对高血压大鼠的研究发现,运动强度过低不足以诱导线粒体生物合成。因此,深入研究不同运动方式对高血压的疗效对于制定最佳运动康复方案具有重要意义。本研究以自发性高血压大鼠(spontaneously hypertensive rats, SHR)为受试对象,其目的在于观察HIIT和MCAT对骨骼肌纤维类型及代谢的影响,为高血压患者最佳运动处方制定提供科学依据和有效方法。

1 材料与方法

1.1 实验动物与分组

30只3月龄SPF级SHR养于标准动物实验室,温度24—26℃,湿度60%—70%,12h/12h昼夜交替光照,每笼5只,自由进食水。将大鼠随机分为安静组(SHR sedentary, SHR-S)、中等强度持续有氧运动组(SHR moderate continuous aerobic training, SHR-MCAT)和高强度间歇运动组(SHR high-intensity interval training, SHR-HIIT),同时以10只雄性Wistar-Kyoto大鼠作为正常血压对照组(WKY)。

1.2 运动方案

所有动物适应环境1周后进行5d适应性运动,方法为:跑速10—15m/min,时间30min/d。随后参照甄洁等^[8]建立的方法,即利用递增负荷跑台运动

实验测定大鼠运动能力,方案为:起始负荷为5m/min,随后每2min跑速增加1.5m/min,直至力竭(力竭标准:大鼠拒绝继续运动,在毛刷及电刺激下仍停留在跑台后部1/3处)。记录最高跑台跑速(maximal treadmill velocity, TVmax)和力竭时间(exhaust time, ET)。

参照Borges等^[9]、朱荣等^[10]建立的方法和Hoydal等^[11]建立的大鼠跑速与摄氧量回归方程以及预实验制定SHR-HIIT和SHR-MCAT组跑台运动方案。SHR-HIIT组:以80%TVmax强度进行跑台运动4min后以40%TVmax继续运动4min,之后依次交替重复7次;SHR-MCAT组:以60%TVmax强度持续运动56min。两组运动频率均为5天/周,共8周。末次训练后48h所有大鼠再次测定运动能力。

1.3 动脉血压和心脏超声测定

分别于训练前以及末次训练后72h,采用无创血压测试仪(BP-300,中国)测量尾动脉收缩压(systolic blood pressure, SBP)。随后麻醉动物,利用超声心动仪(Vevo 770,加拿大)检测心脏结构与功能,参数包括:心率(heart rate, HR)、左室舒张末期直径(left ventricular end-diastolic diameter, LVEDD)、左室壁厚厚度(left ventricular wall thickness, LVWT)和左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)。

1.4 动物取材

心脏超声测定后称量大鼠体重(body weight, BW),迅速取出心脏并称重(heart weight, HW),计算HW与BW比值,即心脏质量指数(heart weight index, HWI)。分离比目鱼肌(慢肌, I型肌纤维为主)和胫骨前肌(快肌, II型肌纤维为主),将组织分为两部分,一部分进行组织病理学观察,另一部分进行蛋白表达或活性测定。

1.5 肌纤维类型测定

利用ATP酶染色法测定骨骼肌纤维类型。将骨骼肌标本置于4%福尔马林中固定8h,常规石蜡包埋、切片(5μm)。将组织切片进行碱预孵(pH=10.6)1—2h后用显微镜拍照,图像分析软件(Image Pro Plus 6.0)测定肌纤维类型(I型、II型)以及细胞横断面积(cross-sectional area, CSA)。

1.6 酶活性测定

取200μg骨骼肌匀浆后离心取上清,考马斯亮

蓝法测定总蛋白含量。使用武汉博士德生物工程有限公司提供的检测试剂盒以比色法测定骨骼肌柠檬酸合酶(citrate synthase, CS)和乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)活性,单位:U/mg pro。

1.7 统计学分析

所有数据用“均数±标准差”表示,采用SPSS 20.0对数据进行统计学处理。四组间比较采用单因素方差分析,若 $F<0.05$,则采用Bonferroni法进行多重比较。显著性差异定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 实验期间动物一般情况以及最终样本量

实验期间各组大鼠未出现体毛凌乱、无光泽、掉毛、精神倦怠以及大便性状改变等运动相关不良症状及过度疲劳状态。SHR-HIIT和SHR-MCAT组大鼠在训练过程中分别有1只和2只拒跑,统计数据时予以剔除,因此最终样本量 $n=37$,其中WKY组($n=10$),SHR-S组($n=10$),SHR-MCAT组($n=8$),SHR-HIIT($n=9$)。

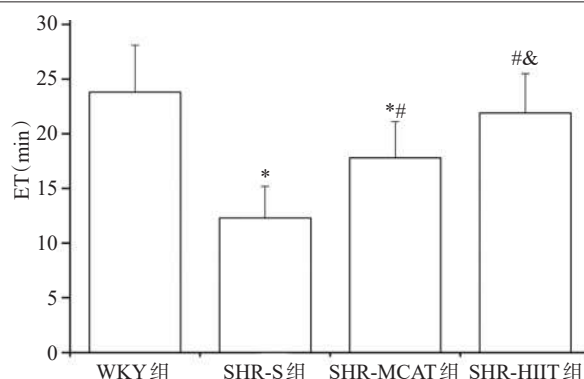
2.2 运动能力

单因素方差分析显示,各组运动能力总体比较差异有显著性意义($F=17.884, P<0.001$)。多重比较显示,与WKY组比较,SHR-S组ET减少($P<0.05$);与SHR-S组比较,SHR-HIIT组和SHR-MCAT组ET增加($P<0.05$);SHR-HIIT组ET高于SHR-MCAT组($P<0.05$)。见图1。

2.3 体重、心脏指数、血压以及心脏结构与功能

单因素方差分析显示,各组除HR($F=0.168, P=$

图1 各组大鼠递增负荷运动实验时的力竭时间(ET)



注: *与WKY组比较 $P<0.05$; #与SHR-S组比较 $P<0.05$; &与SHR-MCAT组比较 $P<0.05$

0.917)外其他各参数总体比较差异均具有显著性意义(BW: $F=4.034$, $P=0.015$; HW: $F=3.245$, $P=0.034$; HWI: $F=5.316$, $P=0.004$; SBP: $F=37.310$, $P<0.001$; LVEDD: $F=4.316$, $P=0.011$; LVWT: $F=6.193$, $P=0.002$; LVEF: $F=6.345$, $P=0.002$;)。多重比较显示,与WKY组比较,SHR-S组HW、HWI、SBP和LVWT增加($P<0.05$),LVEDD和LVEF下降($P<0.05$);与SHR-S组比较,SHR-MCAT和SHR-HIIT组BW和SBP减少($P<0.05$),LVEDD和LVEF升高($P<0.05$)。见表1。

表1 体重、心脏指数、血压以及心脏结构与功能 ($\bar{x}\pm s$)

项目	WKY组 (n=10)	SHR-S组 (n=10)	SHR-MCAT组 (n=8)	SHR-HIIT组 (n=9)
BW(g)	355±32	345±35	315±28 ^{①②}	311±36 ^{①②}
HW(g)	1.15±0.25	1.41±0.27 ^①	1.46±0.29 ^①	1.47±0.25 ^①
HWI(mg/g)	3.23±0.64	4.19±1.15 ^①	4.68±1.02 ^①	4.80±0.91 ^①
SBP(mmHg)	118±11	181±15 ^①	143±13 ^{①②}	149±12 ^{①②}
HR(bpm)	376±39	388±47	384±43	379±50
LVEDD(mm)	7.46±0.66	6.13±0.80 ^①	7.01±0.75 ^②	7.13±1.15 ^②
LVWT(mm)	1.60±0.15	1.97±0.20 ^①	2.01±0.33 ^①	2.07±0.36 ^①
LVEF(%)	76.4±7.2	62.0±6.8 ^①	70.4±8.2 ^②	71.4±7.7 ^②

注:① $P<0.05$,与WKY组比较;② $P<0.05$,与SHR-S组比较

2.4 骨骼肌纤维类型及CSA

ATP酶染色显示,骨骼肌I型肌纤维呈深蓝色,II型肌纤维为浅蓝色,见图2—3。肌纤维分布与比例见图4。单因素方差分析显示,比目鱼肌($F=19.946$, $P<0.001$)和胫骨前肌($F=5.212$, $P=0.005$)肌纤维分布总体比较差异有显著性意义。多重比较显示,与WKY组比较,SHR-S组比目鱼肌I型肌纤维比例减少($P<0.05$),II型肌纤维比例增加($P<0.05$),胫骨前肌肌纤维分布无显著性变化($P>0.05$);与SHR-S组比较,SHR-MCAT组比目鱼肌以及SHR-HIIT组比目鱼肌和胫骨前肌I型肌纤维比例增加($P<0.05$),II型肌纤维比例减少($P<0.05$)。

骨骼肌CSA的变化见图4所示。单因素方差分析显示,比目鱼肌($F=17.829$, $P<0.001$)和胫骨前肌($F=7.115$, $P=0.001$)肌纤维分布总体比较差异有显

著性意义。多重比较显示,与WKY组比较,SHR-S组比目鱼肌和胫骨前肌CSA下降($P<0.05$);与SHR-S组比较,SHR-MCAT组比目鱼肌以及SHR-HIIT组比目鱼肌和胫骨前肌CSA升高($P<0.05$);SHR-HIIT组比目鱼肌和胫骨前肌CSA高于SHR-MCAT组($P<0.05$)。

2.5 比目鱼肌和胫骨前肌CS、LDH活性

单因素方差分析显示,比目鱼肌(CS活性: $F=8.635$, $P<0.001$; LDH活性: $F=11.413$, $P<0.001$)和胫骨前肌(CS活性: $F=13.904$, $P<0.001$; LDH活性: $F=3.947$, $P=0.016$)CS、LDH活性总体比较差异均具有显著性意义。多重比较显示,与WKY组比较,SHR-S组比目鱼肌和胫骨前肌CS、LDH活性均显著性降低($P<0.05$);与SHR-S组比较,SHR-MCAT组比目鱼肌CS活性升高($P<0.05$),SHR-HIIT比目鱼肌和胫骨前肌CS、LDH活性均升高($P<0.05$);SHR-HIIT比目鱼肌和胫骨前肌CS、LDH活性均高于SHR-MCAT组($P<0.05$)。见图6。

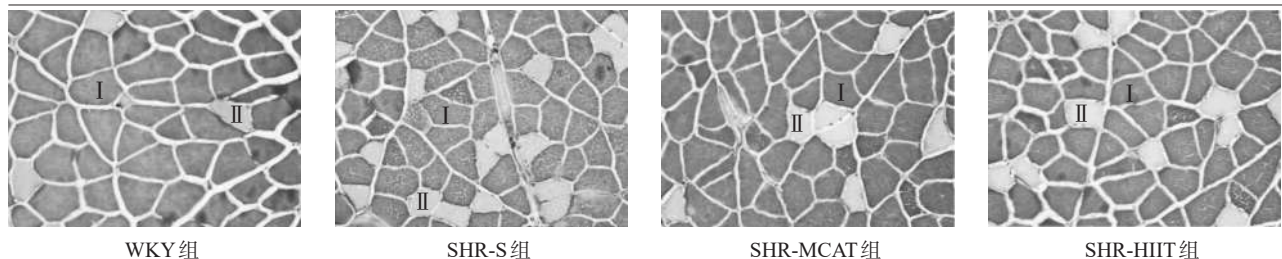
3 讨论

本研究的主要发现是,SHR骨骼肌出现肌萎缩,比目鱼肌(慢肌)纤维类型转变(I型较少、II型增多),CS和LDH活性下降,运动能力降低;8周运动后,SHR-MCAT组比目鱼肌CSA升高,I型肌纤维比例增加、II型肌纤维比例减少,CS活性升高,SHR-HIIT组比目鱼肌和胫骨前肌CSA升高,I型肌纤维比例增加、II型肌纤维比例减少,CS、LDH活性均升高。上述结果提示,HIIT和MCAT均能够促进SHR骨骼肌肥大、诱导肌纤维向抗疲劳亚型转换,进而改善肌肉代谢和运动能力,以HIIT效果为佳。

高血压常伴随心脏肥大^[12],在本研究中,SHR组HW、HWI和LVWT增加,LVEDD降低,即表现为向心性肥厚,最终导致心功能下调(LVEF下降),运动

图2 比目鱼肌肌纤维ATP酶染色

(×40)



WKY组

SHR-S组

SHR-MCAT组

SHR-HIIT组

图3 胫骨前肌肌纤维ATP酶染色

(×40)

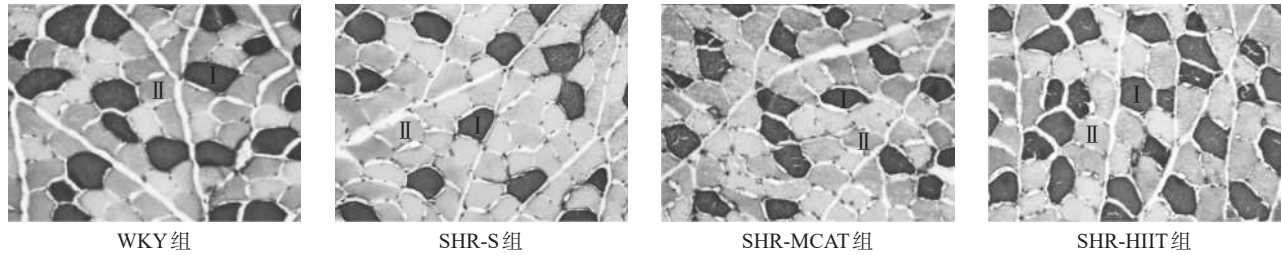
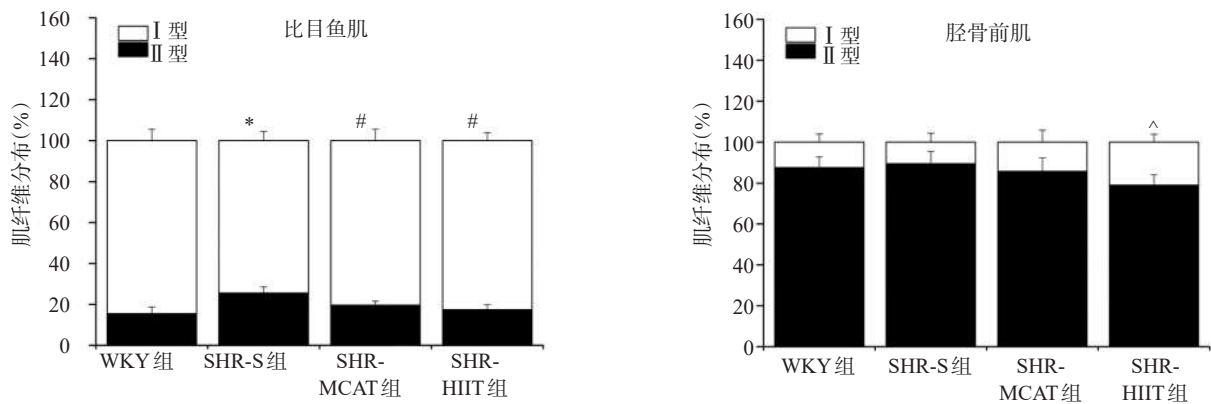
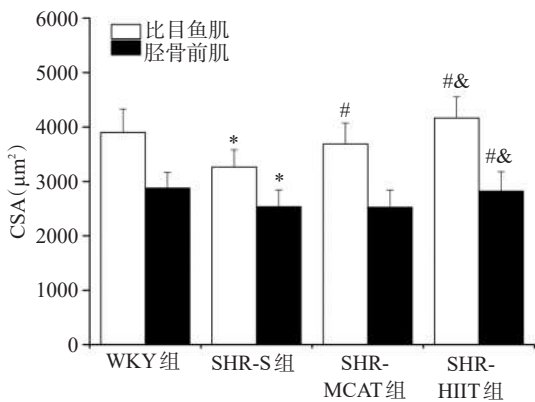


图4 比目鱼肌和胫骨前肌肌纤维分布



注: *与WKY组比较 $P<0.05$; #与SHR-S组比较 $P<0.05$; ^ $P<0.05$ 与其他三组比较

图5 比目鱼肌和胫骨前肌细胞横断面积



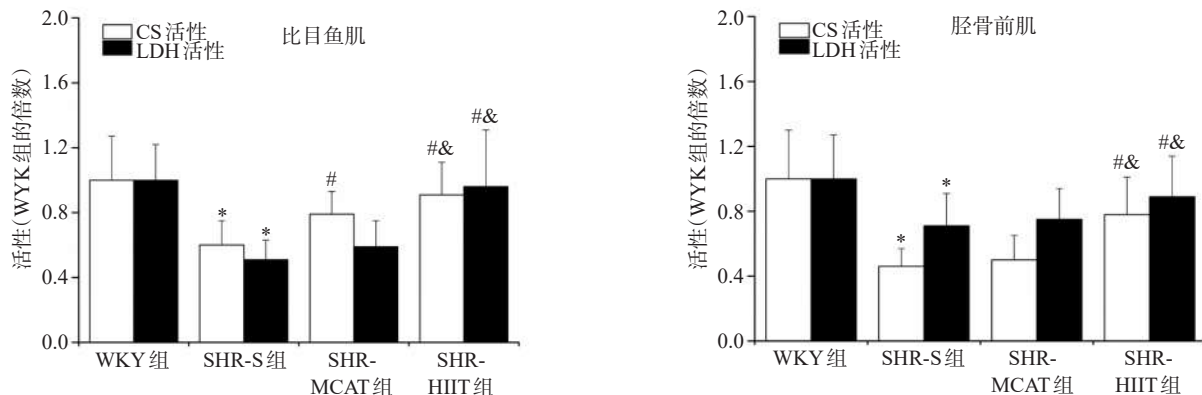
注: *与WKY组比较 $P<0.05$; #与SHR-S组比较 $P<0.05$; &与SHR-MCAT组比较 $P<0.05$

耐力降低(ET下降)。8周运动干预后,与SHR-S组比较,SHR-MCAT和SHR-HIIT组心脏肥厚程度(HW、HWI和LVWT)并无改变,且缩窄的左心室发生扩张(LVEDD增加),提示心脏发生离心性肥厚,其机制与运动时心脏前负荷增加有关^[13],由于心功能增强(LVEF增加),故属于生理性肥大。因此不同运动方式均能够促使SHR心肌由病理性肥大向

生理性肥大转变。

高血压除心脏结构与功能受损外,骨骼肌自身的改变也是还是高血压时运动不耐受的重要原因^[1]。在本研究,与WKY组比较,SHR-S组比目鱼肌和胫骨前肌CSA分别下降16.3%和12.0%,提示快肌和慢肌均发生肌萎缩。在各种原因造成的心力衰竭动物模型中^[14-16],骨骼肌CSA平均下降9.7—16.5%,与本研究一致。骨骼肌萎缩与泛素-蛋白酶体系统(ubiquitin proteasome system, UPS)过度激活并诱导蛋白分解有关^[17]。8周运动后,SHR-MCAT组比目鱼肌以及SHR-HIIT组比目鱼肌和胫骨前肌CSA升高,说明MCAT仅诱导慢肌纤维肥大,而HIIT同时诱导快和慢肌肥大。这是由于肌纤维募集反应与运动强度呈正比,强度较低时仅动员慢肌,随运动强度增加快肌纤维逐渐被募集^[18]。有研究发现^[19],运动抑制心衰时骨骼肌炎症反应和氧化应激,进而下调UPS中的关键蛋白如肌肉环指蛋白1(muscle ring finger 1, MuRF1)、肌肉萎缩盒F蛋白(muscle atrophy F-box, MAFbx),继之抑制肌肉蛋白降解。另一方面,运动还能够促进线粒体生

图6 比目鱼肌、胫骨前肌柠檬酸合酶和乳酸脱氢酶的活性



注: *与WKY组比较 $P < 0.05$; #与SHR-S组比较 $P < 0.05$; &与SHR-MCAT组比较 $P < 0.05$

活合成以及提高肌糖原含量、抑制葡萄糖分解^[10],最终提高肌肉质量。本研究中,SHR-HIIT组比目鱼肌CSA高于SHR-MCAT组。多项研究均显示^[3,20],HIIT对骨骼肌UPS、线粒体合成以及代谢底物的作用均优于MCAT组,这在一定程度上解释了HIIT对骨骼肌的促肥大作用优于MCAT。

骨骼肌肌纤维一般分为I型和II型,I型为慢肌,主要参与有氧代谢,优秀耐力运动员拥有丰富的I型肌纤维;II型为快肌,主要参与短时间无氧代谢,从事力量和爆发项目的运动员II型肌纤维含量较高^[21]。多种心血管疾病均可造成骨骼肌纤维分布改变^[22],在本研究中,SHR-S组比目鱼肌I型肌纤维比例减少,II型肌纤维比例增加,提示高血压主要影响慢肌纤维比例并促使肌纤维向快缩、易疲劳亚型转换,这是高血压患者疲劳和运动耐力下降的主要原因。然而Tam等^[22]的研究则发现,SHR比目鱼肌I型肌纤维增加,可能与造模时间有关(Tam等^[22]为18月龄,本研究仅为5月龄)。本研究胫骨前肌肌纤维比例虽然无显著性变化,但CSA下降,推测快肌中I、II型肌纤维绝对数量可能均显著性减少。运动对肌纤维类型的影响尚无定论。研究显示,MCAT和HIIT均可提高I型肌纤维比例^[23-25],但也有结果显示,HIIT后II型肌纤维增加,I型减少^[26],可能与动物模型、肌肉类型以及运动方案不同有关。本研究利用ATP酶染色法发现,SHR-MCAT组比目鱼肌以及SHR-HIIT组比目鱼肌和胫骨前肌I型肌纤维比例增加、II型肌纤维比例减少,提示不同运动方式均能够诱导肌纤维向抗疲劳亚型转换,其

中MCAT仅作用于慢肌而HIIT则对快慢肌均有影响,这一现象同样可用上述提及的“肌纤维募集反应与运动强度成正比”原理来解释。动物实验显示^[27], γ 过氧化物酶体增殖物活化受体辅活化蛋白1(peroxisome proliferator-activated receptor gamma co-activator 1 α , PGC-1 α)是肌纤维转换的关键信号分子,PGC-1 α 过表达时I型肌纤维比例升高,同时线粒体生物合成增加,而敲除PGC-1 α 后I型肌纤维比例下降、II型纤维增加。

SHR肌萎缩以及纤维类型转变最终导致骨骼肌代谢能力下降。CS是骨骼肌参与有氧代谢的关键酶,其表达量与有氧代谢能力以及线粒体含量正相关。LDH是糖无氧酵解的关键酶,其活性反映骨骼肌无氧代谢能力。在本研究中,SHR-S组比目鱼肌和胫骨前肌CS、LDH活性均较WKY组显著性降低,说明快、慢肌有氧、无氧能力均受到抑制。8周运动后,与SHR-S组比较,SHR-MCAT组比目鱼肌CS活性升高,SHR-HIIT比目鱼肌和胫骨前肌CS、LDH活性均升高,提示MCAT仅提高慢肌有氧代谢能力,而HIIT则改善快肌和慢肌的有氧、无氧代谢水平,这与孙一等^[25]针对健康SD大鼠的研究结果一致。研究显示^[3],HIIT可同时改善机体的有氧和无氧运动能力,而MCAT仅提高有氧能力。HIIT时运动强度较高,从供能角度上属于混氧代谢,运动中的能量主要来源于血红蛋白(hemoglobin, Hb)结合氧的利用、磷酸肌酸(phosphocreatine, PCr)分解以及无氧酵解,恢复期能量底物部分再填充(Hb重新氧合以及PCr再合成),其中PCr再合成依赖于可利用

的氧量^[28]。因此HIIT可同时激活有氧和无氧供能系统,加之慢肌和快肌同步募集,因此HIIT时不同类型骨骼肌有氧无氧代谢能力均得到改善。

值得注意的是,不同运动方式均改善SHR运动能力(ET增加),但HIIT的效果更佳。心脏与骨骼肌分别是决定运动能力的中枢机制和外周机制。在本研究中,不同运动方式对心功能的作用并无显著性差异,然而HIIT对SHR肌萎缩、肌纤维分布及代谢的影响均优于MCAT,因此HIIT改善运动能力较MCAT更具优势主要与外周(骨骼肌)适应机制有关。

4 结论

SHR骨骼肌出现肌萎缩,慢肌纤维向快缩、易疲劳亚型转换,有氧无氧代谢能力下降,运动能力降低;不同运动方式均能够促进SHR骨骼肌肥大、诱导肌纤维向抗疲劳亚型转换,进而改善肌肉代谢,以HIIT效果为佳。

参考文献

- [1] Batt J, Ahmed SS, Correa J, et al. Skeletal muscle dysfunction in idiopathic pulmonary arterial hypertension[J]. *Am J Respir Cell Mol Biol*, 2014, 50(1):74—86.
- [2] Cornelissen VA, Smart NA. Exercise training for blood pressure: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Am Heart Assoc*, 2013, 2(1): e004473.
- [3] 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, 51(8):59—75.
- [4] Ciolac EG. High-intensity interval training and hypertension: maximizing the benefits of exercise?[J]. *Am J Cardiovasc Dis*, 2012, 2(2):102—110.
- [5] Benito B, Gay-Jordi G, Serrano-Mollar A, et al. Cardiac arrhythmogenic remodeling in a rat model of long-term intensive exercise training[J]. *Circulation*, 2011, 123(1):13—22.
- [6] da CRRM, Schreckenber R, Schlüter KD. Adverse cardiac remodelling in spontaneously hypertensive rats: acceleration by high aerobic exercise intensity[J]. *J Physiol*, 2012, 590(21):5389—5400.
- [7] Chicco AJ, McCune SA, Emter CA, et al. Low-intensity exercise training delays heart failure and improves survival in female hypertensive heart failure rats[J]. *Hypertension*, 2008, 51(4):1096—1102.
- [8] 甄洁, 朱荣. 有氧运动对慢性心力衰竭大鼠骨骼肌糖原和运动耐力的影响[J]. *中国康复理论与实践*, 2015, 21(4):426—431.
- [9] Borges JP, Masson GS, Tibirica E, et al. Aerobic interval exercise training induces greater reduction in cardiac workload in the recovery period in rats[J]. *Arq Bras Cardiol*, 2014, 102(1):47—53.
- [10] 朱荣, 马建设. 间歇与持续有氧运动改善慢性心力衰竭大鼠骨骼肌糖原代谢研究[J]. *中国体育科技*, 2017, 53(1): 63—72.
- [11] Hoydal MA, Wisloff U, Kemi OJ, et al. Running speed and maximal oxygen uptake in rats and mice: practical implications for exercise training[J]. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*, 2007, 14(6):753—760.
- [12] de Simone G, Mancusi C, Esposito R, et al. Echocardiography in arterial hypertension[J]. *High Blood Press Cardiovasc Prev*, 2018, 25(2):159—166.
- [13] Weiner RB, Baggish AL. Exercise-induced cardiac remodeling[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2012, 54(5):380—386.
- [14] Lima AR, Martinez PF, Okoshi K, et al. Myostatin and follistatin expression in skeletal muscles of rats with chronic heart failure[J]. *Int J Exp Pathol*, 2010, 91(1):54—62.
- [15] Carvalho RF, Cicogna AC, Campos GE, et al. Myosin heavy chain expression and atrophy in rat skeletal muscle during transition from cardiac hypertrophy to heart failure [J]. *Int J Exp Pathol*, 2003, 84(4): 201—206.
- [16] Santos DP, Okoshi K, Moreira VO, et al. Growth hormone attenuates skeletal muscle changes in experimental chronic heart failure[J]. *Growth Horm IGF Res*, 2010, 20(2):149—155.
- [17] Houston FE, Hain BA, Dodd SL. Inhibition of the proteasome partially attenuates atrophy in botulinum neurotoxin treated skeletal muscle[J]. *Toxicon*, 2018, 144:48—54.
- [18] Wyckelsma VL, Levinger I, McKenna MJ, et al. Preservation of skeletal muscle mitochondrial content in older adults: relationship between mitochondria, fibre type and high-intensity exercise training[J]. *J Physiol*, 2017, 595(11):3345—3359.
- [19] Cunha TF, Bacurau AV, Moreira JB, et al. Exercise training prevents oxidative stress and ubiquitin-proteasome system overactivity and reverse skeletal muscle atrophy in heart failure[J]. *PLoS One*. 2012, 7(8):e41701.
- [20] Gibala MJ, Jones AM. Physiological and performance adaptations to high-intensity interval training[J]. *Nestle Nutr Inst Workshop Ser*, 2013, 76:51—60.
- [21] Tam BT, Pei XM, Yu AP, et al. Autophagic adaptation is associated with exercise-induced fibre-type shifting in skeletal muscle[J]. *Acta Physiol (Oxf)*, 2015, 214(2):221—236.
- [22] Damatto RL, Martinez PF, Lima AR, et al. Heart failure-induced skeletal myopathy in spontaneously hypertensive rats [J]. *Int J Cardiol*, 2013, 167(3):698—703.
- [23] Scribbans TD, Edgett BA, Vorobej K, et al. Fibre-specific responses to endurance and low volume high intensity interval training: striking similarities in acute and chronic adaptation[J]. *PLoS One*, 2014, 9(6):e98119.
- [24] Kazior Z, Willis SJ, Moberg M, et al. Endurance exercise enhances the effect of strength training on muscle fiber size and protein expression of Akt and mTOR[J]. *PLoS One*, 2016, 11(2):e0149082.
- [25] 孙一, 朱荣, 梁永桥, 等. 高强度间歇训练对不同类型肌纤维代谢与分布的调节[J]. *广州体育学院学报*, 2018, 38(1):82—89.
- [26] Dawson B, Fitzsimons M, Green S, et al. Changes in performance, muscle metabolites, enzymes and fibre types after short sprint training[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1998, 78(2):163—169.
- [27] 于亮, 张鹏, 王瑞元, 等. PGC-1 α 对骨骼肌肌纤维类型及运动能力的调控作用[J]. *生理科学进展*, 2013, 44 (1):59—62.
- [28] 孙一, 裴晶晶, 李丹, 等. 积极性和消极性恢复对青年男子田径运动员不同间歇时间高强度间歇训练效果的影响[J]. *中国体育科技*, 2018, 54(2):81—87.