

12周FATmax强度运动对肥胖大学生外周动脉硬化的影响及机制研究

杨梅^{1,2} 朱欢^{1,2*} 彭永^{1,2} 肖哲^{1,2} 刘晓丽^{1,2} 万利^{1,2}

(¹湖北民族大学体育学院, 恩施, 445000; ²湖北民族大学体育学院运动科学研究中心, 恩施 445000)

摘要 该文旨在探讨FATmax(最大脂肪氧化强度)运动对肥胖大学生外周动脉硬化的影响及生物学机制。选取30名肥胖大学生为运动组, 另选取30名肥胖大学生为对照组, 运动组进行12周FATmax强度运动干预, 对照组不进行任何系统性的体育活动。两组受试者分别在试验前、试验后进行体成分、同步四肢血压、臂踝脉搏速度测量及NO、NOS、ET-1检测。试验后, 体质量($P=0.022$, $ES=0.701$)、体脂率($P=0.032$, $ES=0.672$)、BMI($P=0.038$, $ES=0.662$)具有组别和时间交互作用, 其中运动组显著低于对照组($P<0.05$); 左侧BAI($P=0.030$, $ES=1.207$)、右侧BAI($P=0.010$, $ES=1.000$)、左侧baPWV($P=0.037$, $ES=0.760$)、右侧baPWV($P=0.024$, $ES=0.841$)具有组别和时间交互作用, 其中运动组左侧BAI、右侧BAI显著高于对照组($P<0.05$), 左侧baPWV、右侧baPWV显著低于对照组($P<0.05$); NO($P=0.032$, $ES=0.503$)、TNOS($P=0.043$, $ES=0.470$)具有组别和时间交互作用, 其中运动组显著高于对照组($P<0.05$)。该研究结果表明, 12周的FATmax强度运动能显著降低肥胖大学生体质量和体脂率, 改善动脉血管硬化指数, 其中NO增加可能是重要的生物学机制之一, 但NO的路径需进一步研究明确。

关键词 最大脂肪氧化强度运动; 肥胖大学生; 血管硬化; 一氧化氮; 内皮素-1

Study on the Effect and Mechanism of 12-Week FATmax Intensity Exercise on Peripheral Arteriosclerosis in Obese College Students

YANG Mei^{1,2}, ZHU Huan^{1,2*}, PENG Yong^{1,2}, XIAO Zhe^{1,2}, LIU Xiaoli^{1,2}, WAN Li^{1,2}

(¹Physical Education College of Institution of Sports of Hubei Nationalities University, EnShi 445000, China; ²Sports Science Research Center in Physical Education College of Institution of Sports of Hubei Nationalities University, Enshi 445000, China)

Abstract The aim of this study was to investigate the effect and biological mechanism of FATmax intensity exercise on peripheral arteriosclerosis in obese college students. 30 obese college students were selected as the exercise group and 30 obese college students as the control group. The exercise group received 12-week FATmax intensity exercise, while the control group did not engage in any systematic physical activity. Before and after the test, the two groups of subjects were tested for body composition, synchronized limb blood pressure, brachial-ankle pulse velocity measurement, and NO, NOS, ET-1. The results showed that after the test, body weight ($P=0.022$, $ES=0.701$), body fat percentage ($P=0.032$, $ES=0.672$), BMI ($P=0.038$, $ES=0.662$) showed an interaction between

收稿日期: 2021-1-29 接受日期: 2021-03-01

湖北省教育厅省级教改项目(批准号: 2018383)和湖北省教育厅科学研究计划重点项目(批准号: Q20191901)资助的课题

*通讯作者。Tel: 0718-8435333, E-mail: 1207105091@qq.com

Received: January 29, 2021

Accepted: March 1, 2021

This work was supported by Provincial Teaching and Research Project of Education Department of Hubei Province (Grant No.2018383) and the Key Project of Scientific Research Program of Education Department of Hubei Province (Grant No.Q20191901)

*Corresponding author. Tel: +86-718-8435333, E-mail: 1207105091@qq.com

URL: <http://www.cjcb.org/arts.asp?id=5508>

group and time. The exercise group was significantly lower than that in the control group ($P<0.05$). Left BAI ($P=0.030$, $ES=1.207$), left BAI ($P=0.010$, $ES=1.000$), left baPWV ($P=0.037$, $ES=0.760$), right baPWV ($P=0.024$, $ES=0.841$) showed an interaction between group and time. After the experiment, the left BAI and right BAI of the exercise group were significantly higher than those in the control group ($P<0.05$), and the left baPWV and right baPWV were significantly lower than those in the control group ($P<0.05$); NO ($P=0.032$, $ES=0.503$), TNOS ($P=0.043$, $ES=0.470$) showed an interaction between group and time. Among them, NO and TNOS in the exercise group after the test were significantly higher than those in the control group ($P<0.05$). The result of research shows that 12-week FATmax intensity exercise can significantly reduce the body weight and body fat rate of obese college students, and improve the arteriosclerosis index. The increase of NO may be one of the important biological mechanisms, but the path of NO needs further research.

Keywords FATmax intensity exercise; obese college students; vascular sclerosis; nitric oxide; endothelin-1

近年来, 由于不健康饮食和体力活动不足, 导致肥胖问题日益严重, 肥胖成为全球性的公共卫生问题。肥胖是诱导血管硬化及血管阻塞等心脑血管疾病发生的独立危险因素, 且随着肥胖程度的加剧, 血管的硬化指数不断增大, 导致严重心脑血管疾病的发生。研究表明, 有氧运动能提高肥胖人群血管舒张功能, 改善血管硬化, 但相关研究多以中老年肥胖人群及动物模型为研究对象, 对青年肥胖人群的干预研究较少^[1-2]。虽然相比于中老年肥胖人群, 青年肥胖人群外周血管硬化和堵塞程度较轻, 可能尚未引起血管器质性病变, 但如果不及时进行控制和干预, 随着肥胖程度的加剧以及年龄的增长, 血管硬化指数将不断升高, 将会诱导严重的心脑血管疾病的发生。同步四肢血压和臂踝脉搏速度测量是基于血流动力学的病理生理学测量, 能够反映上游血管是否存在动脉狭窄和血管硬化以及预测心脑血管疾病的发生风险和死亡率, 该方法的优点在于避免单侧肢体血压测量所造成的误诊和漏诊^[3-4]。目前, 同步四肢血压已成为动脉狭窄性疾病的临床筛查和诊断工具, 但在运动医学领域应用该方法评价肥胖人群血管硬化以及运动干预效果的研究较少。

此外, 虽然运动干预能提高血管舒张反应能力, 减轻动脉硬化的发生, 但其中的生物学机制仍未完全明确。一氧化氮(nitric oxide, NO)和内皮素-1(endothelin, ET-1)分别是机体强效的血管舒张和收缩因子, 在维持血管舒张功能中起到了重要作用。研究表明, 有氧运动能通过促进内源性NO的分泌, 减少ET-1的生成, 提高高血压、2型糖尿病等慢性病患者血管舒张功能, 降低血管硬化指数, 但NO和ET-1在改善青年肥胖人群血管舒张功能和硬

化的作用尚不明确^[5]。最大脂肪氧化强度(FATmax intensity exercise)是在单位时间内脂肪代谢率峰值所对应的运动强度。在该强度下进行运动, 可最大化地分解脂肪, 达到减脂的效果。相比于运动干预的过程中使用同种运动强度进行干预, FATmax强度提高了运动干预的针对性和科学性, 应用推广价值更高。基于此, 本研究以肥胖大学生为研究对象, 通过对肥胖学生进行12周的FATmax强度运动干预, 探讨FATmax强度运动对青年肥胖人群外周动脉硬化的影响, 并从NO、ET-1角度探讨有氧运动改善动脉血管硬化的生物学机制。

1 材料和方法

1.1 材料

以湖北民族大学在校学生为受试者招募对象, 受试者符合以下标准: (1) 男性体脂率介于20%~30%、女性体脂率介于30%~40%或者BMI介于24~30; (2) 除每天必要的体力活动外, 半年内未进行任何系统性的体育锻炼; (3) 无冠心病、高血压、心梗、心力衰竭、慢性肝炎等慢性疾病; (4) 心理健康, 无抑郁、自闭等心理疾病; (5) 明白本研究的目的和研究方法后自愿加入, 并提供书面的知情同意书。经过招募和筛选, 共纳入60名肥胖大学生作为试验研究对象。在保证性别比例一致的情况下, 将受试者随机分成运动组和对照组, 每组30人(男性14, 女性16)。该研究获得湖北民族大学生物医学伦理委员会的审批(审批号: 2020037)。两组受试者基本情况见表1。

1.2 方法

1.2.1 运动处方的设计 运动强度: FATmax强度测试由PFT Ergo运动心肺功能仪(意大利)及配套的

功率自行车完成。具体测试流程为: 2 min无负荷的热身预热→男性每分钟增加15 W, 女性每分钟增加10 W, 自行车转速均为55~65 r/min→运动到力竭→无负荷恢复运动3 min。达到运动力竭的标准为: (1) 心率达到最大心率的90%以上; (2) 摄氧量出现平台期, 并开始下降; (3) 自行车转速低于55 r/min; (4) 面部表情痛苦, 并主观诉求停止测试。达到以上要求中的任意3条, 即判断为力竭。根据AchtenJ提出的FATmax判定标准: 将每级负荷最后15 s的 $\dot{V}O_2$ 和 $\dot{V}CO_2$ 带入公式 $1.67 \times \dot{V}O_2 - 1.67 \times \dot{V}CO_2$, 计算出每个受试者的最大脂肪氧化率(FATmax rate), 将FATmax rate所对应的运动强度(心率)定为运动组的运动强度^[6]。经过测试与计算, 运动组FATmax强度测试情况见表2。

运动形式、运动频率、运动时间及运动周期: 跑步是高校易开展且较安全的运动形式, 所以跑步为运动内容, 运动场所为湖北民族大学室外田径场。每周运动4次(隔天进行), 每次运动90 min, 其中热身运动和放松运动各15 min, 正式运动时间约为60 min。运动时间为下午16:00~17:30或者晚上19:00~20:30(可根据时间选择其中的任一时间段), 共持续12周(2020.9.28~2020.12.21), 具体见表3。

注意事项: (1) 运动过程中, 使用芬兰POLAR团队心率遥测仪对受试者进行运动强度监控, 将运动

强度维持在最大脂肪氧化强度。(2) 完成总运动计划量85%以上的受试者纳入试验后数据分析, 否则视为无效样本。(3) 运动组不进行其他系统性体育活动, 对照组不进行任何形式的系统性体育运动。(4) 为两组受试者制定相同的饮食计划, 并监督完成。

1.2.2 测试指标及测试仪器、方法 体成分指标包括体质量、体脂率、BMI等, 测试仪器为In Body 770高端专家型人体成分分析仪(韩国)。

采用北京产VBP-9动脉踝臂指数及脉搏波测量装置和北京产JYQ TCD-2000超声经颅多普勒血流分析仪配套装置测量患者的四肢血压。测试指标包括四肢(左臂、右臂、左踝、右踝)的收缩压、舒张压、压差、动脉阻塞指数、大动脉僵硬度(肱-踝脉搏波传导速度, brachial-ankle pulse wave velocity, baPWV), 其中动脉阻塞指数包括踝臂指数(ankle-brachial index, ABI)、臂踝指数(brachial -ankle-index, BAI)。

NO、一氧化氮合酶(nitric oxide synthase, NOS)、ET-1测试采用肘窝静脉抽血, 血量为3 mL, 然后常温离心(3 500 r/s, 离心4 min), 取上层血清, 其中NO含量测试采用硝酸还原酶法, NOS活性测试采用分光光度计法, ET-1测试采用ELISA酶标板法, 试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

表1 研究对象基本情况

Table 1 Basic situation of research objects

组别 Group	年龄/year Age /year	身高/m Height /m	体质量/kg Body weight /kg	体脂率/% Body fat rate /%	身体质量指数 Body mass index
Control group	21.2±0.7	1.66±0.07	73.2±14.0	31.0±5.0	26.7±3.7
Exercise group	21.0±1.1	1.67±0.06	74.4±16.0	31.2±5.3	27.1±4.1

n=30.

表2 运动组FATmax强度测试情况

Table 2 FATmax intensity test situation of exercise group

最大脂肪氧化速率/g·min ⁻¹ Maximum fat oxidation rate /g·min ⁻¹	FATmax强度对应的摄氧量 Oxygen uptake corresponding to FATmax		功率/W Power /W	心率/b·min ⁻¹ Heart rate /b·min ⁻¹
	Absolute value /mL·min ⁻¹	Relative value /mL·(kg·min) ⁻¹		
0.37±0.15	1 512±219	20±4	80±12	126±13

n=30.

表3 运动组运动干预处方

Table 3 Exercise intervention prescription for exercise group

运动项目 Sports	运动强度(心率) Exercise intensity (heart rate)	运动频率 Exercise frequency	运动时间 Exercise time	运动周期 Exercise cycle
Run	126±13 /b·min ⁻¹	4 /week	16:00-17:30/19:00-20:30	12 weeks

表4 两组受试者试验前后体成分的比较

Table 4 Comparison of body composition between the two groups of subjects before and after the test

指标 Index	组别 Group	试验前 Before the test	试验后 After the test	<i>F</i>	<i>P</i>	ES
Body weight /kg	Control group	73.2±14.0	75.5±13.8*	6.426	0.022	0.701
	Exercise group	74.4±16.0*	69.1±12.3			
Body fat rate /%	Control group	31.0	30.4*	4.370	0.032	0.672
	Exercise group	31.2*	28.1			
Body mass index	Control group	26.7±3.7	27.2±3.6*	5.111	0.038	0.662
	Exercise group	27.1±4.1*	25.2±2.4			

n=28。**P*<0.05, 与运动组试验后相应指标比较。

n=28。**P*<0.05 vs the corresponding index of the exercise group after the test.

上述指标分别在试验前和试验后测试一次,早晨空腹状态下组织受试者到湖北民族大学附属医院(国家三级甲等医院)体检中心进行测试。

1.3 统计学方法

使用SPSS 25.0对数据进行统计。首先对数据的正态分布情况进行检验,对于正态分布的数据进行统计学分析,通过双因素重复测量方差分析对两组受试者试验前后指标进行统计学分析,用Bonferroni进行事后检验,显著性差异为 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。

2 结果

2.1 两组受试者试验前后体成分的变化

试验前后,体质量($F=6.426$, $P=0.022$, $ES=0.701$)、体脂率($F=4.370$, $P=0.032$, $ES=0.672$)、BMI($F=5.111$, $P=0.038$, $ES=0.662$)呈现出组别和时间交互作用。试验前,组别对体质量、体脂率、BMI单独效应不显著($P>0.05$);试验后,组别对体质量、体脂率、BMI单独效应显著,其中运动组显著低于对照组($P<0.05$)。运动组中,时间对体质量、体脂率、BMI单独效应显著,试验后低于试验前($P<0.05$);对照组中,时间对体质量、体脂率、BMI单独效应不显著($P>0.05$)(表4)。

2.2 两组受试者试验前后血管硬化度的变化

试验前后,左侧BAI($F=4.592$, $P=0.030$, $ES=1.207$)、右侧BAI($F=9.997$, $P=0.010$, $ES=1.000$)、左侧baPWV($F=5.785$, $P=0.037$, $ES=0.760$)、右侧baPWV($F=7.062$, $P=0.024$, $ES=0.841$)呈现出组别和时间交互作用。试验前,组别对左侧BAI、右侧BAI、左侧baPWV、右侧baPWV单独效应不显著($P>0.05$);试验后,组别对左侧BAI、右侧BAI、左侧baPWV、右侧baPWV单独效应显著($P<0.05$),其中

运动组左侧BAI、右侧BAI显著高于对照组($P<0.05$),左侧baPWV、右侧baPWV显著低于对照组($P<0.05$)。运动组中,时间对左侧BAI、右侧BAI、左侧baPWV、右侧baPWV单独效应显著($P<0.05$),其中左侧BAI、右侧BAI显著高于试验前($P<0.05$),左侧baPWV、右侧baPWV显著低于试验前($P<0.05$);对照组中,时间对各指标的单独效应均不显著($P>0.05$)。试验前后,左侧ABI、右侧ABI及两侧baPWV差值均未呈现组别和时间交互作用($P>0.05$)(表5)。

2.3 两组受试者试验前后一氧化氮及内皮素-1的变化

试验前后,NO($F=5.301$, $P=0.032$, $ES=0.503$)、TNOS($F=4.628$, $P=0.043$, $ES=0.470$)呈现出组别和时间交互作用。试验前,组别对NO($F=0.448$, $P=0.511$, $ES=0.146$)、TNOS($F=0.710$, $P=0.409$, $ES=0.185$)单独效应不显著;试验后,组别对NO($F=20.217$, $P=0.000$, $ES=0.982$)、TNOS($F=16.306$, $P=0.001$, $ES=0.880$)单独效应显著,其中运动组NO、TNOS运动组显著高于对照组($P<0.05$)。运动组中,时间对NO($F=8.171$, $P=0.008$, $ES=0.644$)、TNOS($F=5.473$, $P=0.029$, $ES=0.511$)单独效应显著,其中试验后NO、TNOS显著高于试验前($P<0.05$);对照组中,时间对NO、TNOS单独效应均不显著($P>0.05$)。试验前后,cNOS、iNOS、ET-1均未呈现出组别和时间的交互作用($P>0.05$)(表6)。

3 讨论

3.1 12周FATmax强度运动对肥胖大学生外周动脉硬化化的影响

动脉硬化是一种常见的动脉慢性炎症性疾病,与血脂异常、炎症因子、氧化应激等因素密切

表5 两组受试者试验前后动脉阻塞和弹性指数比较

Table 5 Comparison of arterial occlusion and elasticity index between the two groups of subjects before and after the test							
指标 Index	肢体 Limb	组别 Group	试验前 Before the test	试验后 After the test	<i>F</i>	<i>P</i>	ES
ABI	Left limb	Control group	1.09±0.08	1.08±0.08	0.021	0.663	0.143
		Exercise group	1.07±0.09	1.11±0.07			
	Right limb	Control group	1.01±0.05	0.99±0.06	0.061	0.810	0.078
		Exercise group	0.99±0.08	1.03±0.06			
BAI	Left limb	Control group	0.80±0.04	0.81±0.03*	4.592	0.030	1.207
		Exercise group	0.79±0.03*	0.86±0.03			
	Right limb	Control group	0.78±0.02	0.79±0.03*	9.997	0.010	1.000
		Exercise group	0.76±0.03*	0.84±0.01			
baPWV /cm·s ⁻¹	Left limb	Control group	1 245.25±56.96	1 214.25±48.55	5.785	0.037	0.760
		Exercise group	1 220.75±47.74	1 139.00±34.08			
	Right limb	Control group	1 301.13±68.04	1 291.88±47.37*	7.062	0.024	0.841
		Exercise group	1 268.75±47.33*	1 170.25±55.05			
	Difference between two limbs	Control group	55.88±38.24	77.63±50.24	0.390	0.547	0.196
		Exercise group	48.00±37.39	31.25±25.89			

baPWV: 肱-踝脉搏波传导速度, ABI: 踝臂指数, BAI: 臂踝指数, 两侧差值=(左侧-右侧)的绝对值; *n*=28。**P*<0.05, 与运动组试验后相应指标比较。
baPWV: brachial-ankle pulse wave velocity, ABI: ankle-brachial index, BAI: brachial-ankle index. Difference between two limbs=the absolute value of (left-right); *n*=28。**P*<0.05 vs the corresponding index of the exercise group after the test.

表6 两组受试者试验前后NO、NOS及ET-1比较

Table 6 Comparison of NO, NOS and ET-1 between the two groups before and after the test						
指标 Index	组别 Group	试验前 Before the test	试验后 After the test	<i>F</i>	<i>P</i>	ES
NO /μmol·L ⁻¹	Control group	40.6±4.7	39.9±4.4*	5.301	0.032	0.503
	Exercise group	41.3±4.4*	44.1±3.6			
TNOS /U·mL ⁻¹	Control group	29.9±4.1	29.1±3.2*	4.628	0.043	0.470
	Exercise group	30.8±3.9*	33.7±4.4			
cNOS /U·mL ⁻¹	Control group	9.2±3.9	8.7±4.2	3.025	0.097	0.380
	Exercise group	10.0±3.8	12.1±4.8			
iNOS /U·mL ⁻¹	Control group	20.7±3.5	20.4 3.0	2.855	0.106	0.369
	Exercise group	19.1±2.3	21.6±2.9			
ET-1 /pg·mL ⁻¹	Control group	14.0±2.4	14.7±2.9	2.764	0.627	0.467
	Exercise group	14.6±2.4	13.4±1.8			

NO: 一氧化氮, TNOS: 一氧化氮合酶, cNOS: 结构型一氧化氮合酶, iNOS: 诱导型一氧化氮合酶, ET-1:内皮素-1; *n*=28。**P*<0.05, 与运动组试验后相应指标比较。
NO: nitric oxide, TNOS: total nitric oxide synthase, cNOS: constitutive nitric oxide synthase, iNOS: inducible nitric oxide synthase, ET-1: endothelin-1. *n*=28。**P*<0.05 vs the corresponding index of the exercise group after the test.

相关^[7], 其中肥胖是诱导动脉血管硬化和血管舒张反应能力下降的关键因素。研究表明, 与青年非肥胖人群相比, 青年肥胖人群运动后外周血管舒张功能降低^[8]。另有研究表明, 肥胖使成年人肌肉收缩时血管的舒张期减短, 导致血流灌注量不足^[9]。对于外周动脉硬化的诊断和评价, 四肢血压和臂踝脉搏速度测量是一种无创、快速、简便的方法, 已广

泛应用于外周血管硬化和堵塞的临床诊断。在动脉硬化发生中, 下肢动脉是最易发生血管狭窄及堵塞的地方, 且能导致严重心血管疾病的发生, 四肢血压最早应用于下肢动脉血管病变的检测与评估, 其中ABI已在临床上广泛应用于下肢动脉血管功能的评估。ABI指数降低与动脉粥样硬化程度有关, 其正常值范围为1.00~1.29, 动脉硬化指数越高, ABI指

数下降越明显。BAI主要用于上肢血管狭窄的评估,能反映同侧肱动脉较对侧踝动脉收缩压下降的程度,其正常范围为0.80~0.99。baPWV是评价大动脉硬化程度的经典指标,可以作为预测心血管疾病发生的独立危险因子。根据日本循环协会提出的血管衰竭概念,其正常值范围为1 400~1 800^[10]。研究发现,baPWV每增加1 m/s,心血管疾病的患病机率增大12%^[11]。

运动干预在改善外周动脉血管硬化中具有重要作用。研究发现,有氧运动能改善肥胖儿童少年动脉粥样硬化指数,降低成年后动脉粥样硬化发生的风险^[12]。另外,还有研究表明,有氧运动能通过促进内皮细胞生长、基质重塑和减少血管壁炎症刺激提高血管舒张功能,减少血管硬化的发生^[13]。动物实验表明,4周的有氧运动能改善肥胖大鼠动脉粥样硬化相关因子水平^[14]。此外,还有研究表明,有氧运动和有氧运动联合力量训练均能改善肥胖妇女脂质代谢,且有氧运动能够提高内皮细胞功能,降低动脉粥样硬化发生的风险^[15]。虽然现有的研究表明,有氧运动能够改善动脉粥样硬化因子的表达,提高血管舒张反应,减少动脉硬化发生的风险和程度,但以FATmax强度进行运动干预研究的较少。相比于对受试者采取统一的运动强度干预,FATmax强度不仅能最大程度上促进脂肪分解,而且体现了对不同受试者运动强度的个体差异性。

相比于大多数研究以中老年患者为干预对象,本研究中以年轻大学生为受试者。通过四肢血压监测,受试者外周动脉硬化指数处于临界值,表明受试者动脉硬化发生的病程较短且硬化程度较轻,处于动脉硬化初期。有研究表明,12个月FATmax强度运动能改善动脉硬化初期患者动脉硬化指数和动脉内膜-中膜厚度,且动脉弹性改变期是运动干预的最佳窗口期^[16]。另外,还有研究表明篮球运动能改善大学生下肢ABI指数和baPWV速度^[17]。此外,中国医疗保健国际交流促进会难治性高血压与周围动脉病分会专家也共识性提出,动脉病变早发现、早干预等可显著降低严重心血管事件的发生^[3]。本研究中,经过12周的FATmax强度运动干预后,运动组受试者体质量、体脂率及BMI指数均显著下降,同时BAI、baPWV指数均显著改善,表明FATmax强度运动具有较好的减肥效果,并能显著改善上肢动脉硬化指数。但运动组两侧ABI无显著变化,这主要由于两侧ABI

指数处于正常范围内(略高于正常值的下限),运动干预不能进一步改善ABI指数。综上,青年肥胖人群可能存在外周血管硬化的病变,且上肢和下肢之间存在一定的差异,而FATmax强度运动能改善病变肢体的血管硬化指数,因此青年肥胖人群应注重外周动脉硬化的早期评估与监测,并应尽早进行运动干预。

3.2 12周FATmax强度运动改善肥胖大学生外周动脉硬化的机制

在运动逆转外周动脉血管硬化的机制中,血脂代谢因子、氧化应激、炎症反应改善及防止斑块扩大是主要的生物学机制^[1]。在运动过程中,心输出量增加引起机体血液重新分布,肌肉、皮肤等处血流量增加,对血管内皮细胞产生更大的流体剪切应力^[18]。血管内皮细胞既是感应细胞,也是效应细胞,在流体剪切应力的作用下能通过多种途径发挥抗动脉粥样硬化的作用^[5]。流体剪切应力能激活内皮细胞中eNOS活性,促进内源性NO的生成。NO具有强效的舒血管作用,能够引起血管舒张,发挥抗动脉粥样硬化的作用^[5]。另外,血管剪切应力还能减轻血管黏着斑的过度重塑^[19]和上调机体抗氧化能力^[20],减少内皮细胞损伤及增加eNOS的活性,促进NO生成并减少降解量。ET-1作为体内最强效的血管收缩因子,能够促进炎症因子表达,引起血管内皮细胞损伤,参与血管重塑,导致动脉硬化的发生。研究发现,肥胖人群血液中的ET-1显著增加,且ET-1介导的血管收缩使超重和肥胖成年人血压升高,导致血管舒缩功能障碍和心血管疾病风险增加,而有氧运动通过降低ET-1生成改善超重/肥胖成年人内皮依赖性血管舒张功能^[21-22]。此外,还有研究发现,太极拳和健身气功通过改善NO、ET-1的水平提高原发性高血压患者血管功能,降低血压^[23]。综上,NO与ET-1作为体内维持血管舒张与收缩功能平衡的重要因子,与动脉血管硬化的发生有着密切的关系,改善NO与ET-1的分泌可能是运动抗动脉粥样硬化的重要生物学机制之一。

本研究中,经过12周的FATmax强度运动干预后,运动组受试者NO水平显著升高,表明FATmax强度运动能够促进NO生成,提高血管的舒张能力,增强血管弹性,发挥抗动脉粥样硬化的作用。目前,有关有氧运动对血清NO的干预研究多以中老年人(健康人群和慢性病患者)为研究对象,且研究结果相对

一致, 即有氧运动能促进NO的生成, 改善血管舒张功能, 发挥抗动脉血管硬化的作用^[24-26]。本研究的研究对象为年轻的肥胖大学生, 但研究结果与其他学者一致, 表明有氧运动对NO的干预效应与年龄无关, 而是取决于机体血管的病理性特征。为了进一步明确NO的生成路径, 本研究对不同类型的NOS进行了测定。NOS分为cNOS(钙依赖性)和iNOS(钙非依赖性), 其中cNOS包括eNOS和nNOS两种。研究表明, 由eNOS催化形成内源性NO生成增加是有氧运动提高血管舒张反应能力的重要生物学机制^[5,20,27]。本研究中, 运动组干预后cNOS的活性较试验前有所升高($P>0.05$), 但由于未能对cNOS中的分型(eNOS、nNOS)进一步测定, 因此本研究尚不能明确运动干预后NO增多的生成途径, 这也是本研究存在的重要不足之处。运动组受试者ET-1在试验后无显著变化, 这与其他学者的研究不一致^[22-23], 可能是由于本研究的受试者ET-1水平较正常人变化较小, 运动干预不能使其发生显著变化, 但其中更为准确的原因有待于进一步研究明确。虽然本研究得出运动组干预后NO与外周动脉硬化指数同步性变化, 但由于本研究未使用NO阻断剂验证NO生成路径阻断后动脉硬化指数的变化, 所以本研究尚不能明确动脉硬化指数的变化由NO的增加所致, NO生成增加可能是动脉硬化指数变化的机制之一。

4 结论

12周FATmax强度运动能显著降低肥胖大学生的体质量、体脂率, 改善肥胖大学生血管硬化指数, 其中NO生成增加可能是重要的生物学机制之一, 但NO的生成路径需进一步研究明确。

参考文献 (References)

- [1] 王帝之, 张培珍. 运动对动脉粥样硬化斑块逆转机制的研究进展[J]. 体育科学(WANG D Z, ZHANG P Z. The progress of reversal mechanism of atherosclerosis by exercise [J]. Chin spor scie), 2018, 38(9): 65-71.
- [2] 孙雪, 马京华, 石新丽, 等. 运动训练在周围动脉疾病康复中作用机制及临床应用的研究进展[J]. 中国老年学杂志(SUN X, MA J H, SHI X L, et al. Research progress on the mechanism and clinical application of exercise training in the rehabilitation of peripheral arterial diseases [J]. Chin J Gero), 2020, 40(3): 659-64.
- [3] 中国医疗保健国际交流促进会难治性高血压与周围动脉病分会专家共识起草组. 同步四肢血压和臂踝脉搏波速度测量临床应用中国专家共识[J]. 中国循环杂志(Chinese expert consensus on clinical application of simultaneously measurement of four-limb blood pressure and brachial-ankle pulse wave velocity [J]. Chin Circ J), 2020, 35(6): 521-28.
- [4] 刘松涛, 苏海, 李萍. 四肢血压测量诊断外周动脉疾病的价值[J]. 中华高血压杂志(LIU S T, SU H, LI P. The value of limb blood pressure measurement in the diagnosis of peripheral arterial diseases [J]. Chin J Hype), 2019, 27(2): 184-7.
- [5] 朱欢, 高炳宏. 有氧运动对人体微血管反应性的作用及机制研究进展[J]. 生命科学(ZHU H, GAO B H. Research progress in effects and mechanisms of aerobic exercise on human microvascular reactivity [J]. Chin Bull Life Scie), 2020, 32(8): 855-63.
- [6] LAWLER J M, RODRIGUEZ D A, HORD J M. Mito-chondria in the middle: exercise pre-conditioning protection of striated muscle [J]. J Physiol, 2016, 594(18): 5161-8.
- [7] LI W F, YU J J, ZHAO J M, et al. Pori acocos polysaccharides reduces high-fat diet-in-duced arteriosclerosis in ApoE mice by inhibiting inflammation [J]. Phytother Res, 2021, doi:10.1002/ptr.6980.
- [8] KANOKWAN B, ELIZABETH L C, GEORGIO G, et al. Central and peripheral postexercise blood pressure and vascular responses in young adults with obesity [J]. Med Sci Sports Exerc, 2021, doi:10.1249/MSS.0000000000002540.
- [9] SIMON G, EAMON O, CATNERINE K, et al. Effect of obesity on oxygen uptake and cardiovascular dynamics during whole-body and leg exercise in adult males and females [J]. Physiol Rep, 2018, 6(9): e13705-18.
- [10] TOSHIKI O, HIROFUMI T, TOSHIHARU N, et al. Proposed cutoff value of brachial-ankle pulse wave velocity for the management of hypertension [J]. Circ J, 2017, 81(10): 1540-2.
- [11] VLACHOPOULOS C, AZNAOURIDIS K, TERNTES-PRINTZIOS D, et al. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with brachial-ankle elasticity index: a systematic review and meta-analysis [J]. Hypert, 2012, 60(2): 556-62.
- [12] 林云, 陈文鹤. 4周运动减肥对肥胖青少年血浆致动脉粥样硬化指数和脂酰辅酶A胆固醇酰基转移酶2的影响[J]. 中国运动医学杂志(LIN Y, CHEN W H. Effects of 4-week exercise on plasma atherogenic index and fatty acyl-CoA cholesterol acyltransferase 2 in obese adolescents [J]. Chin J Sports Med), 2012, 31(12): 1043-7.
- [13] TERRA M F, PEDROSA D G, ZOPPI C C, et al. Physical exercises decreases thrombus and neointima formation in atherosclerotic mice [J]. Thromb Res, 2019, 175: 21-31.
- [14] 尹利军, 杨亚南, 林小晶, 等. 雄激素及其受体在有氧运动改善肥胖及肥胖相关疾病症状和血糖血脂中的作用[J]. 中国运动医学杂志(YIN L J, YANG Y N, LIN X J, et al. Roles of androgen and androgen receptor in aerobic exercise improving blood glucose and lipid, obesity and related symptoms of rats [J]. Chin J Sports Med), 2020, 39(7): 552-61.
- [15] MARZENA R, DAMIAN S, PAWEL B, et al. Effects of endurance and endurance-strength training on endothelial function in women with obesity: a randomized trial [J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(21): 4291-302.
- [16] 杜卫提, 王强. 最大脂肪氧化强度跑步运动对早期动脉硬化的影响研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版)(DU W T, WANG Q. Effects of fatmax intensity aerobic exercise on early arteriosclerosis [J]. J Anhui Norm Univ, Natural Science Edi-

- tion), 2020, 43(1): 91-7.
- [17] 韦秀霞, 李崎, 李续, 等. 篮球运动对大学生动脉血管硬化的影响[J]. 体育世界(学术版)(WEI X X, LI Q, LI X, et al. Effects of basketball on arteriosclerosis in college students [J]. Sport World, Scholarly), 2017(8): 179-80,74.
- [18] 王艺璇, 蔡军. 剪切力和拉伸应力对血管内皮细胞的影响[J]. 中国医学前沿杂志(电子版)(WANG Y X, CAI J. Effects of shear stress and tensile stress on vascular endothelial cells [J]. Chin J Fron Medi Scie, Electronic Version), 2012, 4(8): 38-41.
- [19] 钟挺挺, 李燕玲, 何小洪, 等. 流体剪切应力对氧化型低密度脂蛋白诱导血管内皮细胞损伤及黏着斑重塑的影响[J]. 山东医药(ZHONG T T, LI Y L, HE X H, et al. Effects of fluid shear stress on vascular endothelial cell injury and focal adhesion remodeling induced by oxidized low-density lipoprotein [J]. Shandong Medi J), 2018, 58(17): 1-4.
- [20] CONTI F F, BRITO J O, BERNARDES N, et al. Positive effect of combined exercise training in a model of metabolic syndrome and menopause: autonomic, inflammatory, and oxidative stress evaluations [J]. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 2015, 309(12): R1532-9.
- [21] JURRISSSEN J, GRUNEWALD Z I, WOODFORD M L, et al. Overproduction of endothelin-1 impairs glucose tolerance but does not promote visceral adipose tissue inflammation or limit metabolic adaptations to exercise [J]. Am J Physiol Endocr Metab, 2019, 317(3): E548-58.
- [22] DOW C A, STAUFFER B L, BRUNJES D L, et al. Regular aerobic exercise reduces endothelin-1-mediated vasoconstrictor tone in overweight and obese adults [J]. Exp Physiol, 2017, 102(9): 1133-42.
- [23] LIU D C, YI L, SHENG M X, et al. The efficacy of Tai Chi and Qigong exercises on blood pressure and blood levels of nitric oxide and endothelin-1 in patients with essential hypertension: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Evid Based Comp Alternat Med, 2020: 3267971.
- [24] 沈志涛, 张健, 张成. 中等强度有氧运动对原发性高血压患者动态血压和内皮素及一氧化氮水平的影响[J]. 中国慢性病预防与控制(SHEN Z T, ZHANG J, ZHANG C. Effects of moderate intensity aerobic exercise on ambulatory blood pressure, endothelin and nitric oxide levels in primary hypertension patients [J]. Chin J Prev Contr Chron Dis), 2019, 27(1): 46-8.
- [25] 尹夏莲, 李宁川, 瞿泽普, 等. 长期传统健身运动对中老年人NO、SOD、MDA的影响[J]. 安徽体育科技(YIN X L, LI N C, QU Z P, et al. Effects of long-term traditional fitness exercises on NO, SOD and MDA of middle-aged and elderly patients [J]. J Anhui Spor Scie), 2018, 39(5): 62-5,76.
- [26] 任可欣, 陶袁. 不同强度健步走锻炼对中老年人血清一氧化氮含量的影响[J]. 大连民族大学学报(REN K X, TAO Y. Effects of different walking intensity on the serum of the middle-aged and the aged [J]. J Dalian Minzu Univ), 2016, 18(6): 600-2,21.
- [27] MIKUS C R, RECTOR R S, ARCE-ESQUIVEL A A, et al. Daily physical activity enhance reactivity to insulin in skeletal muscle arterioles of hyperphagic otsuka long-evans tokushima fatty rats [J]. J Appl Physiol, 2010, 109(4): 1203-10.