·临床研究·

长期游泳和跑步运动对中年男性血管内皮功能和血流动力学的影响*

邱 丹[1] 何 辉[2,4] 陈晓可[3] 熊开宇[2]

摘要

目的:探讨长期游泳、跑步锻炼对正常血脂血压、高血脂、高血压中年男性血管内皮功能和血流动力学的影响。

方法:于北京某社区招募45—65岁中年男性,通过对血压、血脂、运动锻炼习惯等问卷调查,最终将其分为:正常静坐组、正常跑步组、正常游泳组,高血脂静坐组、高血脂跑步组、高血脂游泳组,高血压静坐组、高血压跑步组、高血压游泳组。采用日本UNEX EF血管内皮功能检测仪测试肱动脉血流介导的内皮舒张功能(flow-mediated dilation,FMD),美国GE vivid7彩超仪测试颈动脉阻力系数(RI)、收缩期峰值流速(PSV)、颈动脉内径(VD),并计算颈动脉血管壁面剪切力(wall shear stress,WSS)。

结果:高血脂、高血压静坐组FMD均显著低于正常静坐组($P<0.05$),各游泳组FMD均显著高于相对应的静坐组($P<0.05$)。高血脂静坐WSS、PSV均显著低于正常静坐组($P<0.05$),游泳组WSS均高于相对应的静坐组,跑步组、游泳组PSV值均高于各自对应的静坐组。高血脂、高血压静坐组RI均显著高于正常静坐组($P<0.05$),高血压静坐组VD显著高于正常静坐组($P<0.05$)。相关分析显示,FMD与WSS、PSV呈现正相关($P<0.05$),与RI、年龄呈负相关($P<0.05$)。WSS与年龄、BMI、舒张压为负相关($P<0.05$),与高密度脂蛋白呈现正相关($P<0.05$)。

结论:长期游泳锻炼可以改善不同血脂、血压水平的中年人血管内皮功能,可能与血流剪切力提高有关,在该强度下跑步运动的作用不明显,建议对于不能承受大强度跑步又希望提升血管内皮功能的中年男性选择游泳运动。

关键词 游泳;跑步;中年男性;血流动力学;内皮功能

中图分类号:R493 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2023)-09-1239-08

Effects of long-term swimming and running on vascular endothelial function and hemodynamics in middle-aged men/QIU Dan, HE Hui, CHEN Xiaoke, et al.//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2023, 38(9): 1239—1246

Abstract

Objective: To investigate the effects of long-term swimming and running on vascular endothelial function and hemodynamics in middle-aged men with normal blood lipid and blood pressure, simple hyperlipidemia and simple hypertension.

Method: The men aged 45—65 were recruited in a Beijing community and finally divided into: normal no-exercise group, normal running group, normal swimming group, hyperlipidemia no-exercise group, hyperlipidemia running group, hyperlipidemia swimming group, hypertension no-exercise group, hypertension running group, hypertension swimming group by the investigation survey on blood pressure, blood lipids and exercise habits. Brachial artery flow-mediated endothelial relaxation function (FMD) was tested by Japanese UNEX EF vascular endothelial function detector, and carotid artery resistance coefficient (RI), peak systolic velocity (PSV), and carotid artery diameter (VD) were measured by GE vivid7 ultrasound and carotid artery wall

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.09.010

*基金项目:内蒙古高校科研项目(NJZY22013);中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(2019PT012)

1 内蒙古科技大学包头师范学院,包头市,014030; 2 北京体育大学; 3 清华大学体育部; 4 通讯作者

第一作者简介:邱丹,女,副教授;收稿日期:2022-04-07

shear force（WSS）was calculated.

Result：FMD in the hyperlipidemia and hypertension sedentary group was significantly lower than that in the normal sedentary group（$P<0.05$），and FMD in swimming groups was significantly higher than that in the corresponding sedentary group（$P<0.05$）. The WSS and PSV of the hyperlipidemia sedentary group were significantly lower than those of the normal sedentary group（$P<0.05$），the WSS of the swimming group was higher than that of the corresponding sedentary group，and the PSV of the running and swimming groups was higher than that of the corresponding sedentary group. RI in the hyperlipidemia and hypertensive sedentary group was significantly higher than that in the normal sedentary group（$P<0.05$），and VD in the hypertensive sedentary group was significantly higher than that in the normal sedentary group（$P<0.05$）. Correlation analysis showed that FMD was positively correlated with WSS and PSV（$P<0.05$），and negatively correlated with RI and age（$P<0.05$）. WSS was negatively correlated with age，BMI and diastolic blood pressure（$P<0.05$），and positively correlated with high-density lipoprotein（$P<0.05$）.

Conclusion：Long-term swimming exercise can improve vascular endothelial function in middle-aged men with different levels of blood lipid and blood pressure，which may be related to the improvement of the carotid artery wall shear force. Running at this intensity has no obvious effect on the vascular endothelial function. Therefore, the middle-aged men who cannot withstand high-intensity running but want to improve vascular endothelial function should choose swimming exercise.

Author's address Baotou Teacher's College，Baotou，Inner Mongolia PRC，014030

Key word swimming；running；middle-aged men；hemodynamics；endothelial function

2020年相关数据显示，我国心血管疾病的死亡率位居首位[1]，血管内皮功能障碍与多种心血管疾病伴行，其可能为心血管疾病，如高血脂、高血压发生发展的重要诱因[2—4]。因此，寻找改善血管内皮功能的有效方法在高血压高血脂疾病的预防和干预中起到非常重要的作用。血管内皮细胞是位于血管内层的单层细胞，可调节局部血液流动，维持组织灌注和诱导血管舒张，使血管收缩-舒张保持动态平衡，维持血管壁内稳态[5]。大量研究证实运动能够改善肥胖、中老年等各类人群的心血管功能[6—8]，但是针对高血脂、高血压人群的血管内皮功能与血流动力学的关系，以及运动对其血流动力学和血管内皮功能的作用研究较少。

运动可以增强健康人群的血管内皮功能[9]，降低血栓形成的风险[10]。循环血液对与血液接触的第一层内皮细胞表面施加切向力，此为血管壁面剪切力（wall shear stress，WSS），在一定范围内较高的血管WSS对维持血管内皮的正常功能有重要作用，细胞培养实验研究显示[11]，WSS降低时，血管内皮细胞凋亡增加，健康女性卧床2个月会导致微循环水平的内皮功能障碍[12]。随着科技的发展，超声检测肱动脉血流介导的血管舒张功能（flow-mediated dilation，FMD）被广泛作为评估血管内皮功能的方法[13—14]，健康人群肱动脉FMD与颈动脉血管WSS呈现正相关[15]。研究报道高血脂、高血压患者存在血管内皮功能障碍[16—17]，推测长期的运动锻炼可以通过提高血管剪切力改善血管内皮功能。基于此，本研究对具有不同体育锻炼习惯（无、跑步、游泳）的中年男性（健康、高血脂、高血压）的血管内皮功能和血流动力学指标进行检测，探究不同运动锻炼习惯对正常、高血脂、高血压的中年男性血管内皮功能和血流动力学指标的影响以及二者的关系，以期为高血脂、高血压患者和血压血脂正常中年人提供科学健身方法，改善血管内皮功能提供参考。

1 对象与方法

1.1 研究对象

于2018年在北京上地东里第一社区、上地东里第二社区、上地西里社区和颐清园社区招募45—65岁中年男性，通过调查血压、血脂、运动锻炼习惯等情况对受试者进行分组，血压、血脂、运动锻炼习惯评价标准如下，高血压诊断标准为：收缩压≥140mmHg和（或）舒张压≥90mmHg[18]。高血脂的判断标准为：总胆固醇≥5.18mmol/L或者甘油三酯≥

1.7mmol/L[19]。筛选血脂正常的高血压患者纳入高血压组;血压正常的高血脂患者纳入高血脂组。通过发放调查问卷筛查运动锻炼习惯,采用《体育活动等级量表-3》(physical activity rating scale, PARS-3)进行评分,根据参加体育锻炼的强度、时间和频率3方面判断体育活动等级,得分≤4分为基本不参加体育运动,纳入静坐组;运动锻炼组纳入条件:具有一年以上单一规律体育锻炼(跑步或者游泳),近一年没有间断,每周运动2次以上,每次不低于30min,通过心率带或运动手环记录心率60%—70% HRmax,主观疲劳感觉(rating of perceived exertion,RPE)为11—12,根据PARS-3量表判断运动等级为中等[20]。根据规律锻炼的运动项目将锻炼组分为跑步组和游泳组。排除标准:①动脉粥样硬化、冠心病、心肌病等严重心血管疾病;②糖尿病;③正在服用药物;④吸烟史;⑤肥胖。检测前与受试者说明试验目的及流程,并签订知情同意书。

根据以上标准对招募对象进行筛选,最终确定118例受试者符合筛选要求纳入研究,根据血压、血脂和运动习惯将受试者分为正常静坐组、正常跑步组、正常游泳组、高血脂静坐组、高血脂跑步组、高血脂游泳组、高血压静坐组、高血压跑步组、高血压游泳组。各组纳入人数和基础信息见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 问卷调查法:在受试对象进行测试前,工作人员对每一位受试者进行问卷调查,包括受试者年龄、性别、身高、体重、血压、血脂、运动锻炼、有无疾病、生活习惯等信息,作为统计分析的背景资料。

1.2.2 实验测量法:受试者禁食12h,次日晨于北京体育大学中国健康与运动研究院测试血压、身高、体重并采血,于22—25℃、安静的房间仰卧10min后进行血流动力学和FMD测试。

血压测试:受试者静坐,右上臂与心脏保持同一水平线,采用水银血压计测试收缩压(systolic blood pressure,SBP),舒张压(diastolic blood pressure,DBP)以及安静心率(heart rate,HR),测试3次取平均值。

血脂测试:受试者禁食12h,采集静脉血,2h内离心分离血清进行血脂四项检测,指标包括总胆固醇(total cholesterol,TC)、甘油三酯(triglycerides,TG)、高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol,HDL-C)和低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol,LDL-C)。

血流动力学指标测试和WSS计算方法:受试者仰卧,头偏向非检一侧,暴露颈部。采用美国GE vivid7彩色超声影像测试仪,10.0MHz线阵探头,沿胸锁乳突肌外缘纵切扫查,测试最大峰值流速(peak systolic velocity,PSV)、颈动脉血管内径(carotid artery diameter,VD)、血管阻力指数(pesistance index,RI),结果取左、右侧平均值。

WSS计算公式:$\tau=4\eta V/D$,其中,τ为血流剪切力,η为血液黏滞度(取常数,η=4mPa.s)[21],V为血流速度,D为血管内径。

血管内皮功能测试:超声检测肱动脉血流介导的血管舒张功能(flow-mediated dilation,FMD)被广泛作为评估血管内皮功能的方法[13—14]。本研究采用日本UNEX EF高分辨血管内皮功能检测仪测试受试者肱动脉血流介导的内皮舒张功能FMD。具体测试方法:受试者仰卧10min后测定安静血压,于右侧肘上方3—5cm处找到肱动脉,测量肱动脉内径,后在安静血压基础上升高50mmHg,驱血5min,受试者保持静止不动,5min后放气,记录2min内内径和血流速度,计算FMD。

FMD=(最大直径-基础直径)÷基础内径×100%。

1.3 统计学分析

所有数据均采用SPSS 22.0统计学分析软件处理。对各组间差异检验采用双因素方差分析(two-way ANOVA,疾病×锻炼习惯),双侧检验,事后比

表1 受试者基本信息

	正常			高血脂			高血压		
	静坐组	跑步组	游泳组	静坐组	跑步组	游泳组	静坐组	跑步组	游泳组
例数(例)	16	12	14	12	12	14	12	14	12
年龄(岁)	53.57±1.92	51.78±2.16	53.00±2.29	55.75±2.37	53.20±1.72	57.17±1.24	54.40±2.23	55.83±3.36	53.01±3.62
BMI	25.66±0.60	23.35±0.56	23.26±0.74	25.93±0.62	23.70±0.73	26.20±0.64	24.83±1.15	24.93±0.67	24.73±0.61

注:BMI:body mass index,身体质量指数。各组年龄和BMI没有显著性差异。

较采用Bonferroni，$P<0.05$为有显著性差异；各变量间相关关系采用Spearman相关系数进行统计。结果以平均数±标准误表示。采用GraphPad Prism8软件进行做图。

2 结果

2.1 血压、血脂测试结果

经过血压和血脂测试，正常组受试者血压和血脂均处于正常水平，高血压组受试者血脂指标处于正常水平；高血脂组受试者血压处于正常水平，所有组受试者心率处于正常范围：60—90次/min。见表2。

2.2 高血脂、高血压和运动习惯对血管内皮功能的影响

FMD检测结果显示，高血脂静坐组5.75%±0.68%、高血压静坐组6.02%±0.43%，均显著低于正常静坐组7.09%±0.65%（$P<0.05$）。

游泳组FMD（正常组：8.68%±0.65%，高血脂组：8.48%±0.85%，高血压组：8.14%±0.54%）均显著高于相对应的静坐组，$P<0.05$。高血压游泳组FMD显著高于高血压跑步组6.03%±0.57%，$P<0.05$。正常跑步锻炼组、高血脂跑步锻炼组FMD 8.32%±0.93%，7.2%±0.24%均高于各自对应的静坐组，但差异无显著性意义。见图1。

2.3 高血脂、高血压和运动习惯对血流动力学的影响

通过颈动脉超声成像技术对血流动力学进行检测，结果显示高血脂静坐组WSS显著低于正常静坐组，$P<0.05$，各游泳组（包括正常、高血脂、高血压）WSS均高于其相对应的静坐组，并且正常游泳组与正常静坐组相比，高血压游泳组与高血压静坐组相比具有显著性意义（$P<0.05$）。高血脂静坐组PSV显著低于正常静坐组，跑步组（正常、高血脂）PSV均显著高于各自对应的静坐组，$P<0.05$，游泳组（正常、高血脂、高血压）PSV值均高于各自对应的静坐组，$P<0.05$。高血脂、高血压静坐组RI显著高于正常静坐组，$P<0.05$，高血压静坐组VD显著高于正常静坐组，$P<0.05$。见表3。

2.4 FMD与血流动力学指标、心血管危险因素间的相关关系

对所有受试者进行血管内皮功能FMD和血流动力学指标WSS、PSV、RI、VD相关分析，见表4，FMD与WSS、PSV为显著正相关，$P<0.05$，FMD与RI呈显著负相关，$P<0.05$，但是相关系数并不高，均为弱相关。FMD与血管内径没有显著性关系。

对所有受试者进行FMD、WSS和心血管危险因素年龄、BMI、血压、心率和血脂四项进行相关分析见表5，FMD与年龄呈现显著性负相关，$P<0.05$。WSS与年龄、BMI、舒张压呈显著负相关，与高密度脂蛋白呈显著正相关，$P<0.05$。

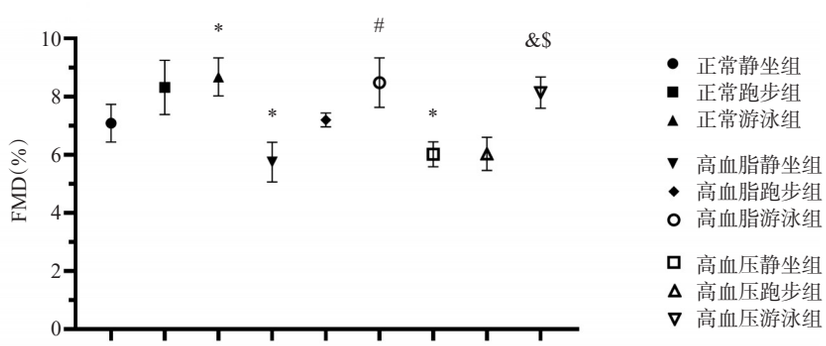
3 讨论

3.1 高血脂、高血压和运动习惯对血管内皮功能的影响

本研究结果表明，高血脂、高血压静坐组FMD均显著低于正常静坐组，FMD降低标志着血管内皮功能障碍。研究显示FMD降低与心血管疾病风险增加呈现相关[22—23]，内皮功能障碍可能是氧化应激和炎症触发的结果[24]，高血压[25]、高血脂[26]疾病状态下氧化应激增加，炎性因子过表达，活性氧（reactive oxygen species，ROS）产生增加，抗氧化防御能力下降。

比较静坐少动人群与从事体育锻炼人群，发现无论是健康中年人还是高血脂、高血压中年人，相较于静坐少动组，体育锻炼均可以提高其FMD值，并

图1 各组人群FMD值测试结果及比较



注：FMD：flow-mediated dilation，肱动脉血流介导的血管舒张功能。*与正常静坐组相比较，$P<0.05$；#与高血脂静坐组相比较，$P<0.05$；&与高血压静坐组相比较，$P<0.05$；$与高血压跑步组相比较，$P<0.05$。

表2 血压、心率和血脂四项测试结果

指标	正常			高血脂			高血压		
	静坐组	跑步组	游泳组	静坐组	跑步组	游泳组	静坐组	跑步组	游泳组
SBP（mmHg）	112.81±1.96	114.91±1.79	115.58±2.12	122.75±1.77	118.60±0.71	122.50±1.04	146.07±1.65①	149.38±6.53①	148.20±2.48①
DBP（mmHg）	71.57±1.51	70.73±2.03	72.17±2.43	77.50±3.91	73.00±2.78	76.17±2.81	84.60±2.62①	82.19±4.99①	83.80±3.17①
HR（次/min）	64.00±2.41	60.09±3.03	60.15±1.55	64.50±2.50	59.60±0.55	66.00±2.89	71.00±3.28①	74.67±4.37①	64.80±3.85①
TG（mmol/L）	1.09±0.10	0.62±0.07	0.91±0.10	1.64±0.09①	1.19±0.17①	2.26±0.35①	1.07±0.10	0.89±0.15	0.64±0.05
TC（mmol/L）	4.16±0.16	3.74±0.19	3.78±0.22	5.12±0.34①	5.51±0.07①	4.38±0.12①	3.92±0.14	3.61±0.14	4.31±0.26
HDL-C（mmol/L）	1.08±0.04	1.15±0.04	1.14±0.02	0.84±0.04①	1.28±0.15	0.96±0.06①	1.05±0.12	1.35±0.06	1.44±0.08
LDL-C（mmol/L）	2.33±0.20	2.09±0.21	2.57±0.12	2.81±0.27①	2.88±0.37①	2.31±0.25	2.40±0.06	2.36±0.15	2.66±0.16

注：SBP：systolic blood pressure，收缩压；DBP：diastolic blood pressure，舒张压；HR：heart-rate心率；TG：triglyceride，甘油三酯；TC：total cholesterol，总胆固醇；HDL-C：high-density lipoprotein，高密度脂蛋白；LDL-C：low-density lipoprotein，低密度脂蛋白。①与正常静坐组相比较$P<0.05$。

表3 血流动力学指标及血管内径测试结果及比较

指标	正常			高血脂			高血压		
	静坐组	跑步组	游泳组	静坐组	跑步组	游泳组	静坐组	跑步组	游泳组
WSS（dynes/cm^2）	15.68±0.59	17.07±0.93	17.50±0.86①	14.22±0.68①	15.45±0.61	14.70±0.32	15.15±0.69	15.69±1.06	17.03±1.11③
PSV（cm/s）	62.67±1.66	67.01±2.71①	70.65±3.33①	56.62±2.99①	64.02±2.03②	61.86±1.77②	61.15±2.23	63.78±4.37	68.62±3.67③
RI	0.71±0.02	0.71±0.04	0.72±0.03	0.77±0.01①	0.76±0.01	0.78±0.02	0.75±0.01①	0.75±0.01	0.74±0.03
VD（mm）	6.36±0.18	6.35±0.16	6.58±0.19	6.37±0.09	6.68±0.13	6.74±0.12	6.51±0.14①	6.99±0.24	6.53±0.18

注：WSS：wall shear stress，血流剪切力；PSV：peak systolic velocity，最大峰值流速；RI：pesistance index，阻力指数；VD：vessel diameter，血管内径。①与正常衰老静坐组相比较$P<0.05$；②与高血脂静坐组相比较$P<0.05$；③与高血压静坐组相比较，$P<0.05$。

表4 FMD与血流动力学指标的相关关系

指标	r值	P值
WSS	0.273	0.016
PSV	0.280	0.014
RI	- 0.229	0.043
VD	- 0.074	0.521

表5 FMD、WSS与心血管危险因素的相关关系

危险因素	与FMD相关		与WSS相关	
	r值	P值	r值	P值
年龄	- 0.332	0.003	- 0.442	0.000
BMI	- 0.041	0.737	- 0.368	0.002
SBP	- 0.185	0.109	- 0.035	0.764
DBP	- 0.051	0.659	- 0.267	0.020
HR	0.058	0.630	0.059	0.627
TG	- 0.136	0.340	- 0.131	0.358
HDL	0.069	0.631	0.336	0.016
LDL	- 0.013	0.929	- 0.198	0.164

且游泳运动对FMD值的提高作用显著。因此，增加体育锻炼无论是对健康人还是高血脂、高血压患者均能改善其血管内皮功能。比较游泳和跑步锻炼对改善血管内皮功能的作用，游泳对FMD值的提高效果显著，跑步运动对FMD的提高效果不具备显著性。有学者比较了进行8×30s最大强度冲刺游泳或者跑步后的代谢应激和炎症反应，发现游泳2h后，白细胞介素6（interleukin-6，IL-6）和皮质醇水平显著低于跑步后，表明游泳比跑步有更低的炎症反应和氧化应激[27]，这可能是有利于游泳更显著提高血管内皮功能。研究显示，8周游泳运动可以提高血清中NO含量和结构型一氧化氮合酶活性[28]，从而提高血管内皮功能。也有研究报道对高胆固醇血症、冠心病、二型糖尿病和心力衰竭患者进行8周循环训练法锻炼（结合抗阻训练、自行车和跑台运动），可以显著增加受试者肱动脉FMD水平[29]。12周平板运动试验[30]或者力量训练[31]可以显著提高老年人FMD水平。8周高强度间歇训练可以显著提高男性肥胖青年FMD水平[32]。对绝经女性进行跑台运动干预12周（RPE控制为11—13），FMD比干预前有显著增加并且可显著提升内皮祖细胞的数量[33]。本研究中跑步运动对FMD的提高效果不具备显著性的原因有可能与其锻炼的强度较低有关，预计增加运动强度后对FMD的改善作用更显著。而游泳运动由于水介质和运动的双重作用，在低强度下就能达到提高血管内皮功能的作用，因此，对于不适宜进行大强度跑步的人群可以选择游泳运动。

3.2 高血脂、高血压和运动习惯对血流动力学的影响

循环血液对与血液接触的第一层内皮细胞表面施加血管壁面剪切力WSS，本研究显示高血脂静坐组WSS、PSV均显著低于正常静坐组，由此可以看

出，高血脂人群的血液流动性较差，血液剪切力低与其血流速度过低可能有关。研究表明在一定范围内较高的WSS对维持血管内皮的正常功能有重要作用，细胞培养实验研究显示WSS降低时，血管内皮细胞凋亡增加[11]，WSS过低造成内皮功能受损，易形成血栓并诱导粥样斑块的发生和发展[34—35]。高血脂、高血压静坐组RI显著高于正常静坐组，RI反映血管舒张及阻力状况，因此，可以看出，高血脂、高血压静坐组血管的外部阻力高于正常组，也许是上述血流速度慢的原因。同时结果显示，高血压静坐组血管内径显著高于正常静坐组，可能是血管弹性和顺应性差导致的结果，以往的研究亦表明高血压会导致大动脉产生外向肥厚性重塑的结构变化，表现为血管内径和中膜厚度的增加，并且伴随着血压水平的不断增高，血管内径也不断增大[36]。

比较锻炼组和静坐组血流动力学特征，发现各游泳组WSS均高于其相对应的静坐组，其中正常组与高血压组差异具有显著性，这与运动引起的血流速度增加有直接关系。正常跑步组、高血脂跑步组和各游泳组PSV均显著高于各自对应的静坐组，究其原因，PSV增加有可能和运动引起的血容量增加有关，有研究记载耐力运动员的股动脉直径和血流量大于正常对照组[37]。以往的研究中有使用直径的变化来反映导管动脉的重塑[38]，在此研究中没有发现运动对血管内径的显著影响。高血压跑步组的血管内径有一定程度增加，虽然不具备显著性意义，但这也有可能是导致血流速度增加不显著的原因。分析跑步组的WSS，其高于相对应的静坐组，但是没有显著性意义，这可能与我们本次测试选取的部位有关，本次测试血流动力学的部位为颈动脉，位于颈部，其对脑部血供起重要作用，易于检测。游泳运动上肢和颈部需要对抗水的阻力负荷，肌肉收缩对血管进行规律按压，水压施于表浅静脉，使血容量向胸部和心脏转移，研究显示当水浸到颈部时，中心血容量增加约700ml，使心脏4腔室充盈扩大[39]，产生中心血流动力学效应，对血液流动起到促进作用，回心血量增加，同时，心脏收缩也受到水压作用，有利于收缩，因此游泳运动在较低强度时肌肉收缩结合水的作用可以提高颈动脉WSS。跑步运动虽然也是全身性运动，但是上肢及颈部参与运动的程度和强度远远不及游泳运动，因此预计跑步锻炼需要增加运动强度才能对血流动力学的指标有更好的改善。

3.3 FMD与血流动力学指标、心血管危险因素间的相关分析

从FMD与血流动力学指标相关性分析结果中发现，FMD与WSS、PSV呈现一定正相关，与RI有一定负相关，提示血管内皮功能与血流剪切力、血流速度和血管阻力有一定关系。如上所述，在一定范围内较高的WSS对维持血管内皮的正常功能有重要作用[34—35]。McCarthy等[40]发现相对于血压正常的Wistar大鼠，原发性高血压会降低自噬活性并伴有内皮功能障碍。内皮细胞内的自噬作为一种更新功能，保护内皮细胞免受损伤，机械力是内皮细胞自噬的重要调节器[41]。研究表明，高水平的剪切力促进内皮细胞自噬，上调内皮型一氧化氮合成酶的表达，同时抑制内皮素1的表达[42—43]。血流产生的剪切力可通过机械转导以可逆方式诱导自噬，这对内皮产生一氧化氮（NO）和缓解过量的ROS是至关重要的[44—45]。同时，在本研究中发现虽然FMD与血流动力学指标显著相关，但是相关性系数并不高，提示血流动力学与FMD的关系密切，但二者的相互作用可能是复杂的，并不完全呈线性关系，由于受试者身体状况、锻炼习惯各异，FMD与血流动力学的关系也更为复杂。

FMD和心血管危险因素相关分析中，发现FMD与年龄呈现显著负相关，说明年龄是影响血管内皮功能的关键因素，随着年龄的增加，血管内皮功能出现明显的下降，其原因可能是随着年龄的增长，ROS浓度过高，降低了NO的生物利用率，继而影响了脉管系统的健康和功能[46]。因此本研究选择实验对象为中年人，内皮功能障碍风险较年轻人大。WSS与年龄同样有显著性负相关，表明年龄依旧是影响血流动力学的关键因素，年龄增加WSS下降，可能是内皮功能下降的原因。有研究显示相比青年人，中老年人静坐时间明显增长，而且随着年龄的增长，每日总体力活动下降[47—48]，中国老年人参加体育锻炼的比例较低[49]，因此随着年龄增加伴随的静坐少动时间的增长是影响血流剪切力和血管内皮功能的重要原因，随着静坐少动的增加，内皮细胞损伤增加[50]。除此之外，WSS与BMI、舒张压有显著性负

相关,说明肥胖和高血压,特别是舒张压增高是WSS降低的风险因素,舒张压形成的关键因素是外周阻力,在本研究血流动力学测试中发现高血脂、高血压患者的RI显著增加,这也许是影响WSS的关键因素。Solomon等[51]证明血浆NO水平随着肥胖个体葡萄糖耐量的增加而逐渐下降,体内过多的脂肪会增加动脉粥样硬化的炎性脂肪因子和细胞因子,减少NO和其他上游旁分泌信号传导物质,危害血管健康。WSS与高密度脂蛋白有显著性正相关。本研究通过多组别比较,分析跑步和游泳运动分别对高血脂、高血压患者血管内皮功能以及血流动力学指标的影响,能够为高血脂、高血压患者提供具有针对性的健身方法。但同时,由于筛选纳入条件严格,完全符合各组要求的受试者人数有限,造成各组样本量偏少。

4 结论

长期游泳锻炼可以改善不同血脂、血压水平人群的血管内皮功能,这可能与游泳运动结合水阻力能够更好的提高血流剪切力有关。但是在本研究中长期跑步运动的作用不明显,原因有可能与本研究中设定的锻炼强度较低有关。游泳运动在较低强度时肌肉收缩结合水的作用能够提高血流剪切力和血管内皮功能,建议对于不能承受大强度跑步又希望提升血管内皮功能的人群选择游泳运动。

增龄、肥胖和高血压,特别是舒张压增高是血管剪切力降低的风险因素,在一定范围内维持较高的血管剪切力和较低的血管阻力对维持血管内皮的正常功能有重要作用。

参考文献

[1] 《中国心血管健康与疾病报告2020》编写组.《中国心血管健康与疾病报告2020》概述[J]. 中国心血管病研究，2021，19(7)：582—590.

[2] 聂志华，许顶立，郑侨克，等. 高血压病患者心-踝血管指数与血管内皮功能相关性研究[J]. 临床心血管病杂志，2014，30(05)：399—401.

[3] 李榕，王文清，张海锋，等. 高血脂通过氧化/硝基化双重作用介导大鼠血管内皮功能失调[J]. 中国病理生理杂志，2010，26(08)：1494—1497.

[4] Park KH，Park WJ. Endothelial dysfunction:clinical implications in cardiovascular disease and therapeutic approaches[J]. J Korean Med Sci，2015，30(9)：1213—1225.

[5] Cahill PA，Redmond EM. Vascular endothelium - Gatekeeper of vessel health[J]. Atherosclerosis，2016，248：97—109.

[6] 尚延侠，侯希贺，潘珊珊，等. 有氧运动对不同肥胖亚型儿童心血管危险因素的干预效果[J]. 中国运动医学杂志，2022，41(4)：266—273.

[7] 曲静，王业玲，林小晶，等. 4周有氧运动结合饮食控制降低肥胖青年的心血管疾病风险及其影响因素[J]. 现代预防医学，2021，48(12)：2243—2248.

[8] 于亚琳，郭瑞莹，张雪琰，等.抗阻运动对中老年人群心血管危险因素影响的Meta分析[J]. 中国全科医学，2022，25(13)：1651—1658.

[9] Hagg U，Wandt B，Bergstrom G，et al. Physical exercise capacity is associated with coronary and peripheral vascular function in healthy young adults[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol，2005，289(4)：H1627—1634.

[10] Gronek P，Wielinski D，Cyganski P，et al. A review of exercise as medicine in cardiovascular disease：pathology and mechanism[J]. Aging Dis，2020，11(2)：327—340.

[11] Dimmeler S Hermann C，Galle J，et al. Upregulation of superoxide dismutase and nitric oxide synthase mediates the apoptosis-suppressive[J]. Arterioscler Thromb Vasc Biol，1999，19：656—664.

[12] Demiot C，Dignat-George F，Fortrat JO，et al. WISE 2005：chronic bed rest impairs microcirculatory endothelium in women[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol，2007，293(5)：H3159—3164.

[13] Higashi Y. Assessment of endothelial function. History，methodological aspects，and clinical perspectives[J]. Int Heart J，2015，56(2)：125—134.

[14] Shechter M，Shechter A，Koren-Morag N，et al. Usefulness of brachial artery flow-mediated dilation to predict long-term cardiovascular events in subjects without heart disease[J]. Am J Cardiol，2014，113(1)：162—167.

[15] 王文荣，熊开宇，何辉. 中年人颈动脉WSS与FMD、IMT、心血管危险因素的相关关系[J]. 北京体育大学学报，2018，41(3)：76—81.

[16] Lin Y，Feng M，Lu CW，et al. Preservation of vascular DDAH activity contributes to the protection of captopril against endothelial dysfunction in hyperlipidemic rabbits[J]. Eur J Pharmacol，2017，798:43—48.

[17] Mordi I，Mordi N，Delles C，et al. Endothelial dysfunction in human essential hypertension[J]. J Hypertens，2016，34(8)：1464—1472.

[18] 高血压联盟，中国医疗保健国际交流促进会高血压分会，中国高血压防治指南修订委员会，等. 中国高血压防治指南(2018年修订版)[J]. 中国心血管杂志，2019，24(1)：25.

[19] 中国成人血脂异常防治指南修订联合委员会. 中国成人血脂异常防治指南(2016年修订版)[J]. 中国循环杂志，2016，31(10)：937—950.

[20] 王旭. 自我损耗对中学生身体活动的影响与自我控制干预[D]. 北京:北京体育大学，2015.

[21] 庄磊. 多普勒超声检测血流剪切力评价动脉粥样硬化血管重构的实验研究[D]. 西安:第四军医大学，2002.

[22] Yeboah J，Crouse JR，Hsu FC，et al. Brachial flow-medi-

ated dilation predicts incident cardiovascular events in older adults：the cardiovascular health study[J]. Circulation，2007，115(18)：2390—2397.

[23] Virdis A，Neves MF，Duranti E，et al. Microvascular endothelial dysfunction in obesity and hypertension[J]. Curr Pharm Des，2013，19(13)：2382—2389.

[24] Scioli MG，Storti G，Damico F，et al. Oxidative stress and new pathogenetic mechanisms in endothelial dysfunction：potential diagnostic biomarkers and therapeutic targets [J]. J Clin Med，2020，9(6)：1995.

[25] Guzik TJ，Touyz RM. Oxidative stress，inflammation，and vascular aging in hypertension [J]. Hypertension，2017，70(4)：660—667.

[26] Tosti V，Bertozzi B，Fontana L. Health benefits of the mediterranean diet：metabolic and molecular mechanisms [J]. J Gerontol A Biol Sci Med Sci，2018，73(3)：318—326.

[27] Casuso RA，Aragon-Vela J，Huertas JR，et al. Comparison of the inflammatory and stress response between sprint interval swimming and running[J]. Scand J Med Sci Sports，2018，28(4)：1371—1378.

[28] 孙红梅. 不同运动负荷对大鼠心肌超微结构及一氧化氮与一氧化氮合酶的影响[J]. 北京体育大学学报，2008，(07)：936—938.

[29] Green DJ，Walsh JH，Maiorana A，et al. Exercise-induced improvement in endothelial dysfunction is not mediated by changes in CV risk factors：pooled analysis of diverse patient populations[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol，2003，285(6)：H2679—2687.

[30] 夏文豪，张小勤，苏晨，等.运动提高健康老年男性内皮祖细胞内皮损伤修复能力，改善血管内皮功能[J]. 中华高血压杂志，2016，24(9)：869—873.

[31] 李世光，李伟，高前进，等. 力量训练对增龄性血管内皮功能的影响及机制[J]. 中国康复医学杂志，2015，30(2)：147—151.

[32] 魏胜敏，高前进，王二利. 高强度间歇训练对肥胖青年血清adropin水平和血管内皮功能的影响[J]. 中国康复医学杂志，2019，34(9)：1058—1064.

[33] 陈晓可，何辉，王文荣. 12周有氧运动对绝经女性血管内皮功能和内皮祖细胞的影[J]. 中国体育科技，2021，57：1—7.

[34] Peiffer V，Sherwin SJ，Weinberg PD. Does low and oscillatory wall shear stress correlate spatially with early atherosclerosis? A systematic review[J]. Cardiovasc Res，2013，99(2)：242—250.

[35] Lam RH，Sun Y，Chen W，et al. Elastomeric microposts integrated into microfluidics for flow-mediated endothelial mechanotransduction analysis[J]. Lab Chip，2012，12(10)：1865—1873.

[36] 王彦利，梁雨露，黄洁. 高血压与主动脉窦内径改变的相关性[J]. 同济大学学报(医学版)，2011，32(5)：101—104.

[37] Schmidt-Trucksass A，Schmid A，Brunner C，et al. Arterial properties of the carotid and femoral artery in endurance-trained and paraplegic subjects[J]. J Appl Physiol (1985)，2000，89(5)：1956—1963.

[38] Kamiya A，Togawa T. Adaptive regulation of wall shear stress to flow change in the canine carotid artery[J]. Am J Physiol，1980，239(1)：H14—21.

[39] Risch WD，Koubenec HJ，Beckmann U，et al. The effect of graded immersion on heart volume，central venous pressure，pulmonary blood distribution，and heart rate in man [J]. Pflugers Arch，1978，374(2)：115—118.

[40] McCarthy CG，Wenceslau CF，Calmasini FB，et al. Reconstitution of autophagy ameliorates vascular function and arterial stiffening in spontaneously hypertensive rats[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol，2019，317(5)：H1013—h1027.

[41] King JS，Veltman DM，Insall RH. The induction of autophagy by mechanical stress[J]. Autophagy，2011，7(12)：1490—1499.

[42] Guo F，Li X，Peng J，et al. Autophagy regulates vascular endothelial cell eNOS and ET-1 expression induced by laminar shear stress in an ex vivo perfused system[J]. Ann Biomed Eng，2014，42(9)：1978—1988.

[43] Ishibazawa A，Nagaoka T，Takahashi T，et al. Effects of shear stress on the gene expressions of endothelial nitric oxide synthase，endothelin-1，and thrombomodulin in human retinal microvascular endothelial cells[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci，2011，52(11)：8496—8504.

[44] Chatterjee S，Fisher AB. Mechanotransduction in the endothelium：role of membrane proteins and reactive oxygen species in sensing，transduction，and transmission of the signal with altered blood flow[J]. Antioxid Redox Signal，2014，20(6)：899—913.

[45] Hsieh HJ，Liu CA，Huang B，et al. Shear-induced endothelial mechanotransduction：the interplay between reactive oxygen species (ROS) and nitric oxide (NO) and the pathophysiological implications[J]. J Biomed Sci，2014，21(1)：3.

[46] Seals DR，Jablonski KL，Donato AJ. Aging and vascular endothelial function in humans [J]. Clin Sci (Lond)，2011，120(9)：357—375.

[47] Davis MG，Fox KR，Hillsdon M，et al. Objectively measured physical activity in a diverse sample of older urban UK adults[J]. Med Sci Sports Exerc，2011，43(4)：647—654.

[48] Buchman AS，Wilson RS，Yu L，et al. Total daily activity declines more rapidly with increasing age in older adults [J]. Arch Gerontol Geriatr，2014，58(1)：74—79.

[49] 杨凡，潘越，邹泽宇. 中国老年人体育锻炼状况及影响因素研究[J]. 中国体育科技，2019，55(10)：10—21.

[50] Thosar SS，Bielko SL，Mather KJ，et al. Effect of prolonged sitting and breaks in sitting time on endothelial function[J]. Med Sci Sports Exerc，2015，47(4)：843—839.

[51] Solomon TP，Haus JM，Li Y，et al. Progressive hyperglycemia across the glucose tolerance continuum in older obese adults is related to skeletal muscle capillarization and nitric oxide bioavailability[J]. J Clin Endocrinol Metab，2011，96(5)：1377—1384.