

本文引用: 马 薇, 张培珍. 不同运动方式干预对动脉硬化的防控作用[J]. 中国动脉硬化杂志, 2022, 30(10): 896-904.  
DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2022.10.010.

· 文献综述 ·

[文章编号] 1007-3949(2022)30-10-0896-09

## 不同运动方式干预对动脉硬化的防控作用

马 薇, 张培珍

(北京体育大学运动医学与康复学院, 北京市 100084)

[摘 要] 随着日常生活方式和饮食结构的改变,动脉硬化的发生率也在逐渐增高,已成为心血管事件和全因死亡率的重要因素之一。健康的生活方式,尤其是有规律的运动和健康的饮食模式,是预防和/或治疗随年龄增长而出现的血管功能障碍的“一线”策略。文章就不同运动方式、运动强度、年龄等因素对血管机能的影响做一综述,为运动预防和/或治疗动脉硬化及血管功能相关疾病提供参考。

[关键词] 有氧运动; 抗阻训练; 高强度间歇训练; 冲刺间歇训练; 血管机能; 动脉硬化

[中图分类号] R195;R5

[文献标识码] A

### Preventive and control effects of different exercise intervention on arteriosclerosis

MA Wei, ZHANG Peizhen

(School of Sport Medicine and Rehabilitation, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

[ABSTRACT] With the change of daily life style and diet structure, the incidence of arterial stiffness is gradually increasing. The increase of atherosclerosis has become one of the important factors of cardiovascular events and all-cause mortality in the future. A healthy lifestyle, especially regular exercise and healthy diet, is a “first-line” strategy to prevent and/or treat vascular dysfunction with age. According to the influence of different exercise methods, exercise intensity and age on vascular function, this paper discusses the influence of exercise on vascular function, so as to provide reference for the prevention and/or treatment of arteriosclerosis and vascular function related diseases.

[KEY WORDS] aerobic exercise; resistance training; high-intensity interval training; sprint interval training; vascular function; arterial stiffness

生活方式和饮食结构的改变,使高血压、动脉粥样硬化(atherosclerosis, As)、冠心病等心血管疾病的发生率逐年升高<sup>[1]</sup>。心血管疾病(cardiovascular disease, CVD)成了中国乃至世界范围内的主要死亡原因<sup>[2]</sup>。血管机能相关指标可以衡量血管健康状况,对动脉硬化的发生和心血管疾病的预防起到重要的评估作用。动脉硬化是一种血管退行性病变,通常表现为随着年龄增加动脉管壁增厚、变硬,血管弹性降低<sup>[3]</sup>。研究显示,中心动脉硬度会随着静坐少动和衰老而增加<sup>[4]</sup>。动脉硬度的增加已成为未来心血管事件和全因死亡率的有力预测因子<sup>[5]</sup>。健康的生活方式,尤其是规律的运动和特定的饮食

模式,是预防和/或治疗随年龄增长而出现的血管功能障碍的“一线”策略<sup>[6]</sup>。

运动对预防心血管疾病以及减缓其发展速度非常重要<sup>[7]</sup>。规律运动可以预防和延缓动脉粥样硬化斑块的发展,明显降低男性和女性心血管疾病的发生风险<sup>[8-9]</sup>;研究显示,终身运动对人体动脉硬化有明显的剂量依赖性影响,这种影响因动脉部位和大小而异,每周4~5次的终身运动与老年人更“年轻”的中央动脉顺应性水平相关,可以降低中心动脉硬度(central arterial stiffness, CAS);较低频率的终身运动(每周2~3次)与心室后负荷和外周阻力降低有关,可以最大限度地减少中动脉(如颈动

[收稿日期] 2021-10-22

[修回日期] 2022-05-13

[基金项目] 国家重点研发计划“主动健康和老龄化科技应对”重点专项(2022YFC2010201);国家体育总局科技服务项目(2017B064);中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(2020045);教育部“运动与体质健康”重点实验室支持项目

[作者简介] 马薇,硕士研究生,研究方向为运动康复与健康, E-mail:958991462@qq.com。通信作者张培珍,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为运动与心血管健康、运动健身与运动处方、运动营养, E-mail:zhpzh17@hotmail.com。

脉)的动脉硬化;但运动训练对小的外周动脉的影响较小<sup>[4]</sup>。运动作为一项简单易行且相对安全的措施,可以有效改善血管机能和动脉硬度,对心血管疾病的预防和治疗有重要意义。

## 1 有氧运动对血管机能和动脉硬度的影响

### 1.1 急性有氧运动对血管机能和动脉硬度的影响

急性有氧运动过程虽短,却可对血管功能产生一过性的积极影响。研究显示,急性有氧运动对健康人、超重肥胖人群和慢性病患者的血管机能和动脉硬度改善均有积极效果。Masaki 等<sup>[10]</sup>选取 55 例健康成人[(64±10)岁]和 53 例亚临床甲状腺功能减退患者[(65±12)岁]进行一次急性有氧运动,在基线和运动后 5 min 测量心-踝血管指数(cardio-ankle vascular index, CAVI),急性运动后两组的 CAVI 均明显下降,且健康成人组的 CAVI 改善更大,表明急性有氧运动可以显著降低健康成人和亚临床甲状腺功能减退患者的动脉硬化水平。

朱蔚莉等<sup>[11]</sup>选取 14 例肥胖在校男生,在跑台上进行持续 45 min、靶心率为 80% HR<sub>max</sub> 的急性有氧运动,分别在运动前、运动 1 h 和 2 h 三个时间点测定其颈-股动脉脉搏波传导速度(catotid-femoral artery pulsed wave velocity, cfPWV)和颈-桡动脉脉搏波传导速度(carotid-radial artery PWV, crPWV),发现 crPWV 在运动 1 h 和 2 h 均明显低于 0 h(运动前),cfPWV 在运动 2 h 时明显低于 0 h(运动前)和运动 1 h,表明急性有氧运动可以在结束后较短一段时间内维持肥胖男生较低的 PWV 水平。对于心血管疾病患者,石亚君等<sup>[12]</sup>的研究显示 85 例冠心病患者和 84 例非冠心病者进行急性有氧运动后,两组踝臂指数(ankle brachial index, ABI)值均明显降低( $P<0.001$ )。

一篇系统回顾分析显示,急性有氧运动对动脉硬度的影响取决于评估的血管部位和运动后测量的时间,中心和上肢外周动脉段的动脉硬度在运动后即刻(5 min 内)较安静时增加,此后(>5 min)则会恢复到安静状态或低于安静状态;下肢主要工作肌肉部位的动脉硬度在运动后立即下降并可持续到运动后的恢复期(>5 min);中心动脉硬度的暂时增加可能是因为急性有氧运动过程中血压升高,交感血管张力改变或负荷从中心动脉弹性好的弹性蛋白纤维传递到弹性较差的胶原纤维,同时血管平滑肌细胞收缩导致<sup>[13]</sup>。因此,即使是急性有氧运动,也会引起血管功能指标的即刻变化,以 CAVI、

PWV、ABI 的改善尤为明显,但该变化持续的时间较短,无法使机体的血管机能获得长时间的受益。

### 1.2 长期有氧运动对血管机能和动脉硬度的影响

长期规律的有氧运动是改善心血管健康状况和动脉功能最有效的锻炼方式<sup>[14]</sup>。研究显示,长期的游泳、骑车、有氧健身操、步行等均可降低动脉硬度,改善血管弹性,对血管硬化的控制与改善具有积极意义<sup>[14-18]</sup>。方如梦<sup>[19]</sup>和邹吉玲等<sup>[20]</sup>的研究显示,6~12 个月的广场舞锻炼可以降低老年人的 PWV 和 ABI,有效预防和减少动脉粥样硬化。Kobayashi 等<sup>[21]</sup>选取 18 例日常运动活跃的女性[活动组,(18±1)岁,进行中低强度有氧耐力训练 2 h/周,3 次/周,≥2 年]和 18 例不活跃的女性[不活动组,(18±1)岁,静坐少动生活方式≥2 年]进行比较,结果显示,活动组的动脉波速指标(arterial velocity pulse index, AVI)、动脉压力容积指标(arterial pressure-volume index, API)均低于非活动组( $P<0.01$ ),体现了规律有氧运动对血管机能的积极效果。

长期的有氧运动不仅可以改善健康成人的血管机能,对慢性病患者同样具有良好的血管机能改善效果。17 例 2 型糖尿病(type 2 diabetes mellitus, T2DM)和糖尿病周围神经病变患者进行 16 周的有氧运动干预后,肱动脉峰值直径增加、峰值剪切时间缩短,血流介导的血管舒张功能(flow-mediated dilation, FMD)得到了改善<sup>[22]</sup>。31 例正常高值血压成人进行 3 个月的功率车训练后,颈动脉内膜中膜厚度(intima-media thickness, IMT)显著降低,表明规律的有氧运动可以改善一氧化氮依赖性血管内皮功能,并能促进该类患者动脉粥样硬化的逆转<sup>[23]</sup>。

此外,有氧运动对微血管的改善同样具有潜力。Hurley 等<sup>[24]</sup>选取 30 例静坐少动的老年人(60~80 岁)进行 12 周的上坡步行运动(强度为 70% 储备心率,每次 40 min,4 天/周),12 周后运动组的血氧水平依赖性反应增加 33%,运动组收缩后肱动脉血流峰值增加了 39%,表明中等强度的有氧运动能明显改善老年人小腿微血管功能。研究显示,规律的有氧运动是预防或逆转与年龄相关的血管退行性改变和降低 CVD 风险的最佳策略<sup>[25]</sup>。一项为期 10 年的纵向研究表明,规律的有氧运动可以减轻与年龄相关的动脉硬度,与不爱运动组相比,有氧运动超过 15(MET·h)/周的个体,10 年内其臂踝脉搏波传导速度(brachial-ankle PWV, baPWV)的增加幅度要小得多[+5% 比+(13%~14%)],这表明规律且充分的有氧运动可以最大限度地减少

与年龄相关的动脉硬化增加<sup>[5]</sup>。

## 2 抗阻运动对血管机能和动脉硬度的影响

### 2.1 急性抗阻运动对血管机能和动脉硬度的影响

抗阻运动是指机体通过骨骼肌收缩克服外加阻力进行主动运动达到增加肌肉力量和肌肉耐力的方法<sup>[26]</sup>。抗阻运动对动脉硬化的影响较为复杂,受评估时间和评估部位的影响较大。Augustine等<sup>[27]</sup>选取18例健康女性[(28±7)岁,BMI(22.6±2.9) kg/m<sup>2</sup>]在月经周期的卵泡早期和黄体早期完成一次急性抗阻运动,分别在安静及运动后立即、10 min、20 min和30 min后评估动脉硬度,结果显示中枢动脉和外周动脉硬度在两个阶段均有显著的时间效应,cfPWV在抗阻后立即增加,且在抗阻后的所有时间点保持升高( $P<0.05$ );而crPWV在抗阻后立即降低,并在抗阻后10~30 min保持降低( $P<0.05$ );急性抗阻运动后,女性的中心动脉硬度增加,外周动脉硬度减小,中心动脉硬度增加可能与急性抗阻运动后内皮素1的增加有关,外周动脉硬度的降低可能是由于抗阻运动后微血管/阻力血管内皮功能的改善造成的。Yoon等<sup>[28]</sup>选取13例健康男性在两天不同的时间里进行抗阻运动[8次,60%可重复一次的最大重量(one-repetition maximum,1 RM)]和对照(坐位休息),两组均在干预前、干预后20 min和40 min测量cfPWV和主动脉搏增强指数(augmentation index,AIx),干预20 min后,抗阻运动组的心率、cfPWV和AIx75(心率为75次/min时对应的AIx)较对照组显著增加( $P<0.05$ )。

但也有研究显示,急性抗阻运动只是在运动后短期内增加了中心动脉硬度。Mak等<sup>[29]</sup>选取18例健康年轻男性进行急性肱二头肌抗阻训练,分别在抗阻运动前、运动后立即和运动后15 min测试其颈动脉脉搏波传导速度(carotid pulsed wave velocity,cPWV),结果显示,抗阻运动后立即cPWV显著增加,但在第15 min时几乎恢复到其基线值。另外,抗阻运动的强度是改善动脉硬度的关键因素,中低强度可以作为一种有效的非药物策略用于治疗中青年心血管并发症<sup>[30]</sup>。Forde等<sup>[31]</sup>选取22例健康的年轻男性在不同日完成了两种等负荷的抗阻训练(35% 1RM或70% 1RM单侧伸膝),结果显示AIx75在以35% 1RM运动后5 min时显著低于70% 1RM,但两种强度运动后5 min时收缩压均显著降低。

### 2.2 长期抗阻训练对血管机能和动脉硬度的影响

有氧运动以有氧代谢供能为主,可持续活化大肌肉群;而抗阻运动以无氧代谢供能为主,可作用于单独的肌肉群<sup>[32]</sup>。长期抗阻训练在保持正常肌力和肌肉质量的同时,可以改善内皮功能和代谢。一项Meta分析显示,抗阻运动对一些心血管相关疾病的效果与有氧运动一样,甚至优于有氧运动,可用于一级预防和二级预防<sup>[33]</sup>。一项随机对照研究显示,抗阻训练可以改善T2DM患者的血管功能并降低其动脉硬度,是T2DM患者血管疾病的一级治疗和维持血管功能的有效手段<sup>[34]</sup>。Dias等<sup>[35]</sup>选取20例非肥胖青少年和24例肥胖青少年进行抗阻训练,12周后发现内皮素1和纤维蛋白原显著降低、血压下降,表现出抗阻运动对内皮功能、血液动力学和代谢功能改善的积极效果。Cahu等<sup>[36]</sup>将33例高血压患者[(61±2)岁,67%女性]随机分为等长握力训练(isometric handgrip training,IHT)组和对照组,IHT组每周完成3次等长握力训练(4×2 min组,强度为最大自主收缩的30%,双手交替),结果显示,IHT组的收缩压和舒张压显著降低;中心PWV和剪切率面积减少,表明12周的IHT可以降低高血压患者的血压和动脉硬度,改善内皮功能指标。

一项Meta分析显示,长期中等强度[(60%~80%)1RM]或低强度(<60% 1RM)抗阻训练可以降低动脉硬度,有利于预防心血管疾病<sup>[37]</sup>。低强度抗阻训练可能会降低健康年轻成人的全身动脉硬度<sup>[38]</sup>。但Morishima等<sup>[39]</sup>选取13例健康年轻人完成中等强度中等重复次数运动(中-中试验)、低强度高重复次数运动(低-高试验)、高强度低重复次数运动(高-低试验),在基线及运动后10 min、30 min和60 min重复测量肱动脉FMD和血压,结果显示高-低试验运动引起的血流和剪切率增加显著低于其他两组,在所有试验中,运动后收缩压均显著升高,但高-低试验时血压升高幅度明显低于中-中试验和低-高试验,中-中、低-高试验显示出肱动脉FMD明显受损,表明低重复次数的高强度抗阻运动可能会通过缩短高血压持续时间来抵消抗阻运动对内皮功能的不利影响。

## 3 间歇训练对血管机能和动脉硬度的影响

### 3.1 高强度间歇训练对血管机能和动脉硬度的影响

高强度间歇训练(high-intensity interval training,HIIT)是一种短时间相对高强度与较长时间低强度



反复交替进行的运动方式<sup>[40]</sup>,它因省时高效受到广泛关注。HIIT 可使参加者反复达到高强度运动水平,改善人体的心肺耐力和血管功能<sup>[41-42]</sup>。急性和长期 HIIT 对血管机能都有良好影响。一次急性的 5 km HIIT 可以明显降低男大学生收缩压(维持 1 h 以上),改善血管弹性(维持 30 min 以上)<sup>[43]</sup>。Francois 等<sup>[44]</sup>研究显示 12 周 HIIT(4 组,每组 10 次,每次 1 min,强度为 90% HR<sub>max</sub>)能有效降低 T2DM 患者股动脉 IMT、动脉硬化、安静心率,降低 T2DM 患者心血管疾病的发生率。Mora-Rodriguez 等<sup>[45]</sup>研究显示 6 个月的 HIIT(4 组 4 min 90% HR<sub>max</sub> 的功率车运动穿插 3 min 70% HR<sub>max</sub> 的运动)可以改善女性代谢综合征患者的动脉硬度和微血管功能障碍。

运动强度是运动处方的重要内容,对血管机能的改善有着重要影响(表 1)。研究显示,中等强度运动主要通过降低氧化应激和增强一氧化氮(nitric oxide, NO)来改善内皮细胞超微结构的不良重构和功能,而高强度运动则通过增加氧化应激和活性氧(reactive oxygen species, ROS),降低 NO,加强这些变化<sup>[46]</sup>。HIIT 在改善心血管健康和心肺耐力方面也有良好的效果<sup>[47]</sup>。研究显示,20 周间歇步行训练可以明显改善老年人[(70±4)岁]的 cfPWV,与普通步行相比,间歇步行训练降低中心动脉硬度的幅度更大<sup>[7]</sup>。Bond 等<sup>[48]</sup>选取 20 例青少年[(14.1±0.3)岁]分别进行一次中等强度运动(moderate intensity exercise, MIE)和 HIIT,结果显示,HIIT 后即刻 FMD 下降,MIE 后 FMD 无明显变化,与运动前相比,MIE 和 HIIT 后的总反应性充血都增加,HIIT 后 1 h 和 2 h 时 FMD 升高,而 MIE 没有变化;与 MIE 相比,HIIT 后的总反应性充血程度在运动后即刻和运动后 1 h 更大,表明运动强度与运动后 1 h 和 2 h 的血管功能有关,青少年进行一次 HIIT 可能比 MIE 会获得更多的血管益处,虽然两种运动方式都可以促进微血管功能,但 HIIT 的改善幅度更大。对 21 例体力活动不足的成年人进行 12 周中等强度和 HIIT 干预后发现,两组间主动脉 PWV 的变化有显著性差异,与中等强度组相比,HIIT 在改善 FMD 和降低 PWV 方面更有效<sup>[49]</sup>。一项系统回顾和 Meta 分析显示,HIIT 在改善肱动脉血管功能方面比中等强度持续运动更有效,可能是由于 HIIT 对心肺耐力、传统 CVD 危险因素、氧化应激、炎症和胰岛素敏感性有积极影响,4 组/每组 4 次的 HIIT,每周 3 次,持续至少 12 周,是一种增强血管功能的有效方式<sup>[50]</sup>。

表 1. HIIT 与 MIE 改善血管机能的特点

Table 1. Characteristics of vascular function improvement in HIIT and MIE

血管机能特点	高强度间歇训练 (HIIT)	中等强度运动 (MIE)
特点	强度较高、时间较短	强度较低、时间较长
机制	通过增加氧化应激和 ROS、降低 NO,加强上述变化	通过降低氧化应激和增强 NO 来改善内皮细胞超微结构的不良重构和功能
作用	对血管机能积极效果	对血管机能积极效果

### 3.2 冲刺间歇训练对血管机能和动脉硬度的影响

冲刺间歇训练(sprint interval training, SIT)是一种以“运动强度≥100% VO<sub>2max</sub>”、“全力”、“超极量运动”为特点的间歇训练方式<sup>[51]</sup>。与 HIIT 相比,SIT 冲刺强度更高,时间更短(表 2)。研究显示,SIT 可以增加肌肉毛细血管的密度和内皮型一氧化氮合酶(endothelial nitric oxide synthase, eNOS)含量,改善上下肢血管的内皮功能<sup>[52-53]</sup>。但一次 SIT 的运动时间非常短,因此,SIT 的运动量是引起血管机能发生变化的重要决定因素。

2 周的 SIT 训练可以显著改善超重/肥胖静坐少动男性的一些代谢和血管危险因素,可以作为该人群改善血管和代谢健康状况的一种可推荐的运动模式<sup>[54]</sup>。Olver 等<sup>[53]</sup>选取 16 例健康男性进行急、慢性冲刺间歇训练,一组进行一次 4×30 s 的冲刺,组间穿插 4 min 恢复;另一组进行每周 3 次,每次 4~7 组 30~45 s 冲刺,共 6 周,结果显示,一次急性 SIT 后受试者的 PWV 下降,前臂血管床顺应性增加,惯性和黏弹性降低;SIT 后 PWV 保持不变,前臂动脉硬度增加,前臂血管床黏弹性下降,顺应性和惯性无变化;急性 SIT 可以改善前臂血管的顺应性,而长期 SIT 可以使前臂血管系统的慢性适应增加,体现为弹性效率增加;表明急、慢性 SIT 诱导的血管功能适应存在差异。Ho 等<sup>[55]</sup>将 60 例超重的绝经后妇女随机分为运动组 and 对照组,运动组交替进行 8 s 冲刺和 12 s 恢复的功率车运动,8 周内完成 24 次 SIT,每次 20 min,结果显示,运动组的 baPWV 显著下降 7.2%,AIx 下降 10%,最大摄氧量显著增加,对照组无变化,表明 8 周 SIT 可以显著降低绝经后妇女的动脉硬度,增加有氧运动能力。

表 2. HIIT 与 SIT 改善血管机能的特点

Table 2. Characteristics of vascular function improvement in HIIT and SIT

血管机能特点	高强度间歇训练 (HIIT)	冲刺间歇训练 (SIT)
强度	85% ~ 95% $VO_{2max}$	$\geq 100\%$ $VO_{2max}$
特点	高强度运动, 时间较长, 通常为 4 min; 运动总时间相对较长	冲刺时间更短, 通常为 30 s; 运动总时间相对较短
作用	对血管机能有积极影响	对血管机能有积极影响

#### 4 有氧和抗阻联合训练对血管机能和动脉硬度的影响

抗阻运动常常作为有氧运动的补充, 和有氧运动共同对血管机能产生积极影响。有氧和抗阻的联合训练是否比单一的有氧或抗阻训练能起到更好的改善效果也备受关注。研究显示, 有氧和抗阻运动均可显著降低主动脉收缩压, 长期有氧运动可以降低  $AIx$ , 有氧运动和联合运动均可以显著改善心血管疾病患者的中心动脉硬度和心功能<sup>[56]</sup>。一项 Meta 分析显示, 联合训练可使不同健康状态的绝经后妇女的  $baPWV$  降低 0.6 ~ 2.1 m/s<sup>[57]</sup>。Qiu 等<sup>[58]</sup>的研究显示有氧运动和联合运动可以增加 T2DM 患者的 FMD, 而单独的抗阻训练无此效果, 表明运动训练特别是有氧运动和联合运动能改善 T2DM 患者的血管内皮功能。82 例冠心病患者进行 12 周循环抗阻训练后, 训练组的心功能、血管机能、血液和微循环状况相关动力学参数显著优于对照组, 表明循环抗阻干预可提高冠心病患者的心脏泵血功能, 改善组织微循环状况<sup>[59]</sup>。Son 等<sup>[60-61]</sup>的研究显示 12 周的联合运动可以改善高血压前期肥胖女孩[(15±1)岁]和高血压绝经后妇女[(75±2)岁]的  $baPWV$  和内皮素 1。26 例慢性卒中后偏瘫患者在进行 16 周有氧和抗阻的联合训练后,  $PWV$ 、 $AIx$  得到很大提高, 体现了联合运动降低慢性卒中后偏瘫患者中心动脉硬度的积极效果<sup>[62]</sup>。

此外, 41 例超重和肥胖老年妇女(65 ~ 77 岁)在进行 24 周的联合运动(抗阻+有氧)后, 与对照组相比, 颈动脉 IMT、颈动脉收缩期管腔直径、收缩期峰值血流速度和舒张期末血流速度在组别和时间之间有显著的交互作用; 运动组颈动脉 IMT 的变化与收缩压、最大步行速度、1 英里步行时间和最大摄氧量显著相关, 收缩期峰值血流速度的变化与骨骼

肌质量、舒张压、最大步行速度显著相关, 表明联合运动能有效改善超重和肥胖老年妇女颈动脉 IMT, 增加老年妇女的颈动脉收缩期管腔直径和血流速度, 可通过改善颈动脉来预防动脉粥样硬化性疾病<sup>[63]</sup>。Mitropoulos 等<sup>[64]</sup>的研究显示, 32 例局限性硬皮病患者进行 12 周联合运动(有氧+抗阻)后, 运动组的内皮依赖性反应峰值时间和内皮依赖性功能均较对照组明显改善。

#### 5 运动改善血管机能和动脉硬度的机制

运动对人体血管有着深远的影响, 急性运动会引起血管功能的即时变化, 长期运动则可以引起血管功能的慢性适应, 导致动脉结构重塑。运动对血管机能和动脉硬度改善的机制主要包括以下几个方面。

(1) 运动对血管的直接力学影响。运动可以改变血流、管腔剪切力、动脉压和切向应力, 通过增加动脉管径和改变管壁-管腔比实现动脉结构重塑, 进而改变动脉功能、直径和动脉壁厚度<sup>[65]</sup>。而动脉管径的改变和结构的重塑主要是由每次运动中重复的血流动力学刺激作用于血管壁导致的<sup>[66]</sup>。此外, 运动过程中骨骼肌对血管直接的机械性挤压及血流加快对血管壁的刺激都可以物理性地改变血管弹性, 降低动脉硬度<sup>[43]</sup>。

(2) 运动对血管的生物化学影响。在脉管系统内, ROS 和 NO 之间存在着动态平衡<sup>[67]</sup>。增加的剪切力能通过减少 ROS 和增加 NO 的生物利用度来改善血管内的稳态<sup>[68]</sup>。其中, 增加的剪切力能刺激内皮 NO 释放, 上调内皮一氧化氮合酶的表达<sup>[67]</sup>。同时, 规律运动可以增加血管舒张剂的形成, 降低血管收缩剂和 ROS 水平<sup>[68]</sup>。此外, Adropin 是一种调节 eNOS 和 NO 释放的因子, 其水平会随着年龄的增长而降低<sup>[69]</sup>。研究显示, 血清 Adropin 水平与颈动脉硬化( $\beta$ )呈负相关, 8 周有氧运动可以提高血清 Adropin 水平, 进而导致动脉硬度的降低<sup>[69]</sup>。

(3) 运动对血管内皮细胞的影响。内皮细胞在维持血管稳态和调节血管机能方面起着重要作用<sup>[70]</sup>。内皮素 1 是一种由血管内皮细胞分泌的血管收缩剂, 研究显示, 动脉内注射内皮素 1 会明显损害血管功能<sup>[71]</sup>。而规律的有氧运动可以降低静坐少动超重和肥胖成年人的内皮素 1 介导的血管收缩张力, 进而改善内皮依赖性血管舒张功能<sup>[72]</sup>。规律运动后氧化应激的减少也有助于改善内皮细胞功能, 预防内皮细胞衰老, 同时, 规律的运动还可以通

过调节内皮祖细胞的数量和改善内皮祖细胞的功能来促进内皮稳态,减缓“血管老化”<sup>[73]</sup>。

(4)运动对血管炎症的影响。有研究显示线粒体功能障碍是导致血管内皮损伤的主要因素,而血管内皮损伤在动脉粥样硬化的发生和发展中起主要作用<sup>[74]</sup>。规律运动可以增加剪切力和线粒体生物合成,上调线粒体抗氧化系统,引起抗炎反应,抑制肿瘤坏死因子 $\alpha$ (tumor necrosis factor- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ ),对 TNF- $\alpha$  诱导的血管损伤具有保护作用<sup>[75]</sup>。还有研究显示,运动可以通过释放肌肉因子(IL-6 和 IL-10)来阻断 Th1 细胞活性,激活 Th2 细胞功能,进而降低炎症反应<sup>[76]</sup>。

(5)运动对其他因素的影响。Masaki 等<sup>[10]</sup>研究显示,急性运动后,健康成人和亚临床甲状腺功能减退患者的血清促甲状腺激素水平均明显下降,表明两组 CAVI 的下降可能与急性有氧运动使两组人群血清促甲状腺激素水平降低有关。Hasegawa 等<sup>[77]</sup>研究显示,长期有氧运动可以减少脂肪积累,训练诱导的 baPWV 变化与训练诱导的肌细胞内脂质变化呈负相关,与训练诱导的肌细胞外脂质含量变化呈正相关,表明训练诱导的肌细胞内、外脂质含量的变化可能与中老年人动脉硬化降低有关。此外,低密度脂蛋白是引起血管硬化的主要危险因素<sup>[78]</sup>。运动通过消耗脂肪,可以加快低密度脂蛋白的分解,从而降低动脉硬化,增加血管弹性<sup>[43]</sup>。

综上,运动改善血管机能的机制是由多种因素相互作用的结果,其确切的生物学机制尚不完全明确,有待于进一步深入研究。

## 6 小结与展望

规律运动可以预防和延缓动脉硬化的发展,明显降低心血管疾病的发生风险,对心血管健康有重要意义。传统运动方式如有氧运动和抗阻运动都可以降低动脉硬化,改善血管弹性,对血管功能产生积极影响。新兴的间歇运动方式如 HIIT 和 SIT 以其短时、高效的特点,也在血管机能和动脉硬度的改善中发挥重要作用。此外,运动强度是运动处方的重要内容,也是引起血管功能和动脉硬化变化的重要因素,不同强度的运动对血管机能的影响也不同。目前运动对血管机能的整体影响是有益的,但也有部分研究显示,运动对血管机能的改善效果不明显,可能与训练时间、训练强度、年龄、性别等原因有关。此外,运动改善血管机能机制的研究还不够深入,探索不同运动方式引起血管机能

和动脉硬化改变的生理机制,有利于分析不同运动方式对血管机能和动脉硬度的影响,从而根据不同运动方式的特点,为不同人群推荐运动健身/康复的最佳运动组合方式,降低心血管疾病的发生,最大程度保障心血管健康。

## [参考文献]

- [1] 陈丽君, 袁慧, 赵臻. 1991 年—2013 年心血管病流行病学特征分析[J]. 中国病案, 2015, 16(3): 54-56.  
CHEN L J, YUAN H, ZHAO Z. Epidemiological characters analysis of cardiovascular diseases from 1991 to 2013 [J]. Chin Med Records, 2015, 16(3): 54-56.
- [2] LIU J, MA C. Current state of cardiovascular research in China[J]. Nat Rev Cardiol, 2019, 16(10): 575-576.
- [3] 杨雪雪, 毛开敏, 张存泰, 等. 人体成分相关指标与动脉硬化的相关性研究[J]. 实用老年医学, 2020, 34(7): 695-698.  
YANG X X, MAO K M, ZHANG C T, et al. Correlation between body composition and arteriosclerosis [J]. Pract Geriatr, 2020, 34(7): 695-698.
- [4] SHIBATA S, FUJIMOTO N, HASTINGS J L, et al. The effect of lifelong exercise frequency on arterial stiffness[J]. J Physiol, 2018, 596(14): 2783-2795.
- [5] SUGAWARA J, TOMOTO T, NODA N, et al. Effects of endothelin-related gene polymorphisms and aerobic exercise habit on age-related arterial stiffening: a 10-yr longitudinal study[J]. J Appl Physiol (1985), 2018, 124(2): 312-320.
- [6] ROSSMAN M J, LAROCCA T J, MARTENS C R, et al. Healthy lifestyle-based approaches for successful vascular aging[J]. J Appl Physiol (1985), 2018, 125(6): 1888-1900.
- [7] OKAMOTO T, HASHIMOTO Y, KOBAYASHI R. Effects of interval walking training compared to normal walking training on cognitive function and arterial function in older adults: a randomized controlled trial[J]. Aging Clin Exp Res, 2019, 31(10): 1451-1459.
- [8] FRANCIS K. Physical activity in the prevention of cardiovascular disease[J]. Phys Ther, 1996, 76(5): 456-468.
- [9] 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, 2020, 40(3): 659-664.  
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 artery diseases [J]. Chin J Gerontol, 2020, 40(3): 659-664.
- [10] MASAKI M, KOIDE K, GODA A, et al. Effect of acute aerobic exercise on arterial stiffness and thyroid-stimulating hormone in subclinical hypothyroidism[J]. Heart Vessels, 2019, 34(8): 1309-1316.
- [11] 朱蔚莉, 曾靖. 急性有氧运动对肥胖青年男性动脉僵



- 硬度的影响[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2010, 2 (2): 86-88.
- ZHU W L, ZENG J. Influence of acute aerobic exercise on arterial stiffness in fat young men[J]. Chin J Evid-Based Cardiovasc Med, 2010, 2 (2): 86-88.
- [12] 石亚君, 王晋丽, 陈韵岱, 等. 冠心病患者急性有氧运动后动脉硬化指标变化研究[J]. 中国心血管杂志, 2017, 22(1): 29-33.
- SHI Y J, WANG J L, CHEN Y D, et al. Effects of acute aerobic exercise on arterial stiffness in patients with coronary artery disease[J]. Chin J Cardiol, 2017, 22 (1): 29-33.
- [13] MUTTER A F, COOKE A B, SALEH O, et al. A systematic review on the effect of acute aerobic exercise on arterial stiffness reveals a differential response in the upper and lower arterial segments[J]. Hypertens Res, 2017, 40(2): 146-172.
- [14] WONG A, KWAK Y S, SCOTT S D, et al. The effects of swimming training on arterial function, muscular strength, and cardiorespiratory capacity in postmenopausal women with stage 2 hypertension[J]. Menopause, 2018, 26 (6): 653-658.
- [15] ALKATAN M, MACHIN D R, BAKER J R, et al. Effects of swimming and cycling exercise intervention on vascular function in patients with osteoarthritis[J]. Am J Cardiol, 2016, 117(1): 141-145.
- [16] 丁文权. 有氧健身操练习对成年女性心血管机能的影响[D]. 北京: 北京体育大学, 2015.
- DING W Q. The aerobic exercise influence on adult women cardiovascular's function[D]. Beijing: Beijing Sport University, 2015.
- [17] 张建平. 万步走对低体力活动中老年人动脉血管机能和代谢风险因子的影响[D]. 济南: 山东体育学院, 2015.
- ZHANG J P. 10 000 daily walk to low physical activity in the old arterial function and metabolic risk factors[D]. Jinan: Shandong Institute of Physical Education, 2016.
- [18] HA M S, KIM J H, KIM Y S, et al. Effects of aquarobic exercise and burdock intake on serum blood lipids and vascular elasticity in Korean elderly women[J]. Exp Gerontol, 2018, 101: 63-68.
- [19] 方如梦. 广场舞运动对中老年人动脉粥样硬化相关因子的影响[J]. 当代体育科技, 2020, 10(9): 191-192.
- FANG R M. Effect of square dance on atherosclerosis related factors in middle-aged and elderly people[J]. Contemp Sports Technol, 2020, 10 (9): 191-192.
- [20] 邹吉玲, 吴晓华, 李 军, 等. 广场舞对哈尔滨市 60 ~ 69 岁老年人体脂肪率、骨密度和血管机能的影响研究[J]. 冰雪运动, 2016, 38(6): 86-89.
- ZOU J L, WU X H, LI J, et al. Influence of the square dance on the 60-69 years old people's body fat rate, bone mineral density and vascular function in Harbin city[J]. Chin Wint Sports, 2016, 38 (6): 86-89.
- [21] KOBAYASHI R, IWANUMA S, OHASHI N, et al. New indices of arterial stiffness measured with an upper-arm oscillometric device in active versus inactive women[J]. Physiol Rep, 2018, 6(5): e13574.
- [22] BILLINGER S, SISANTE J V, ALQAHTANI A S, et al. Aerobic exercise improves measures of vascular health in diabetic peripheral neuropathy[J]. Int J Neurosci, 2017, 127(1): 80-85.
- [23] GLODZIK J, REWIUK K, ADAMIAK J, et al. Controlled aerobic training improves endothelial function and modifies vascular remodeling in healthy adults with high normal blood pressure[J]. J Physiol Pharmacol, 2018, 69(5): 699-707.
- [24] HURLEY D M, WILLIAMS E R, CROSS J M, et al. Aerobic exercise improves microvascular function in older adults[J]. Med Sci Sports Exerc, 2019, 51(4): 773-781.
- [25] KOZAKOVA M, PALOMBO C. Vascular ageing and aerobic exercise[J]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(20): 10666.
- [26] 刘晓龙, 何梦晓. 抗阻运动在康复治疗中的应用研究进展[J]. 现代医药卫生, 2020, 36(14): 2212-2215.
- LIU X L, HE M X. Research progress on the application of resistance exercise in rehabilitation therapy[J]. J Mod Med Health, 2020, 36 (14): 2212-2215.
- [27] AUGUSTINE J A, NUNEMACHER K N, HEFFERNAN K S. Menstrual phase and the vascular response to acute resistance exercise[J]. Eur J Appl Physiol, 2018, 118 (5): 937-946.
- [28] YOON E S, JUNG S J, CHEUN S K, et al. Effects of acute resistance exercise on arterial stiffness in young men[J]. Korean Circ J, 2010, 40(1): 16-22.
- [29] MAK W Y, LAI W K. Acute effect on arterial stiffness after performing resistance exercise by using the valsalva manoeuvre during exertion[J]. Biomed Res Int, 2015. DOI: 10.1155/2015/343916.
- [30] ZHANG Y, ZHANG Y J, YE W, et al. Low-to-moderate-intensity resistance exercise effectively improves arterial stiffness in adults: evidence from systematic review, Meta-analysis, and Meta-regression analysis[J]. Front Cardiovasc Med, 2021, 8: 738489.
- [31] FORDE C, JOHNSTON M, HABERLIN C, et al. Low dose resistance exercise: a pilot study examining effects on blood pressure and augmentation index between intensities[J]. High Blood Press Cardiovasc Prev, 2020, 27 (1): 83-91.
- [32] 陈影, 张爽, 余珍, 等. 有氧运动及抗阻运动改善肥胖大学生心血管疾病危险因素的研究进展[J]. 护理研究, 2019, 33(12): 2060-2063.
- CHEN Y, ZHANG S, YU Z, et al. Research advances on aerobic exercise and resistance exercise to improve cardiovascular disease risk factors of obese college students[J].

- Chin Nurs Res, 2019, 33 (12): 2060-2063.
- [33] EVANS W, WILLEY Q, HANSON E D, et al. Effects of resistance training on arterial stiffness in persons at risk for cardiovascular disease: a Meta-analysis [J]. Sports Med, 2018, 48(12): 2785-2795.
- [34] DOS SANTOS A J, NUNES M F, SALES B A, et al. Effects of resistance and combined training on vascular function in type 2 diabetes: a systematic review of randomized controlled trials [J]. Rev Diabet Stud, 2019, 15: 16-25.
- [35] DIAS I, FARINATTI P, DE SOUZA M G, et al. Effects of resistance training on obese adolescents [J]. Med Sci Sports Exerc, 2015, 47(12): 2636-2644.
- [36] CAHU R S, FARAH B Q, SILVA G, et al. Vascular effects of isometric handgrip training in hypertensives [J]. Clin Exp Hypertens, 2020, 42(1): 24-30.
- [37] JURIK R, ŻEBROWSKA A, STASTNY P. Effect of an acute resistance training bout and long-term resistance training program on arterial stiffness: a systematic review and Meta-analysis [J]. J Clin Med, 2021, 10(16): 3492.
- [38] FIGUEROA A, OKAMOTO T, JAIME S J, et al. Impact of high- and low-intensity resistance training on arterial stiffness and blood pressure in adults across the lifespan: a review [J]. Pflugers Arch, 2019, 471(3): 467-478.
- [39] MORISHIMA T, TSUCHIYA Y, IEMITSU M, et al. High-intensity resistance exercise with low repetitions maintains endothelial function [J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2018, 315(3): H681-H686.
- [40] ROSS L M, PORTER R R, DURSTINE J L. High-intensity interval training (HIIT) for patients with chronic diseases [J]. J Sport Health Sci, 2016, 5(2): 139-144.
- [41] 李岳, 余辉, 王建旗. 高强度间歇训练在心血管疾病预防和管理中的应用进展 [J]. 心血管病学进展, 2020, 41(3): 227-230.
- LI Y, YU H, WANG J Q. High-intensity interval training in prevention and management of cardiovascular disease [J]. Adv Cardiovascular Dis, 2020, 41(3): 227-230.
- [42] MARTLAND R, MONDELLI V, GAUGHRAN F, et al. Can high-intensity interval training improve physical and mental health outcomes? A Meta-review of 33 systematic reviews across the lifespan [J]. J Sports Sci, 2020, 38(4): 430-469.
- [43] 王少鹏. 高强度间歇运动与中强度持续运动对机体血管弹性的影响 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2019.
- WANG S P. Effects of high intensity intermittent exercise and moderate intensity continuous exercise on vascular elasticity [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2019.
- [44] FRANCOIS M E, PISTAWKA K J, HALPERIN F, et al. Cardiovascular benefits of combined interval training and post-exercise nutrition in type 2 diabetes [J]. J Diabetes Complications, 2018, 32(2): 226-233.
- [45] MORA-RODRIGUEZ R, RAMIREZ-JIMENEZ M, FERNANDEZ-ELIAS V E, et al. Effects of aerobic interval training on arterial stiffness and microvascular function in patients with metabolic syndrome [J]. J Clin Hypertens (Greenwich), 2018, 20(1): 11-18.
- [46] YE F, WU Y, CHEN Y, et al. Impact of moderate- and high-intensity exercise on the endothelial ultrastructure and function in mesenteric arteries from hypertensive rats [J]. Life Sci, 2019, 222: 36-45.
- [47] MATTIONI M F, MARTUS P, ZIPFEL S, et al. Effectiveness of HIIE versus MICT in improving cardiometabolic risk factors in health and disease: a Meta-analysis [J]. Med Sci Sports Exerc, 2021, 53(3): 559-573.
- [48] BOND B, HIND S, WILLIAMS C A, et al. The acute effect of exercise intensity on vascular function in adolescents [J]. Med Sci Sports Exerc, 2015, 47(12): 2628-2635.
- [49] RAMÍREZ-VÉLEZ R, HERNÁNDEZ-QUIÑONES P A, TORDECILLA-SANDERS A, et al. Effectiveness of HIIT compared to moderate continuous training in improving vascular parameters in inactive adults [J]. Lipids Health Dis, 2019, 18(1): 42.
- [50] 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.
- [51] GIST N H, FEDEWA M V, DISHMAN R K, et al. Sprint interval training effects on aerobic capacity: a systematic review and Meta-analysis [J]. Sports Med, 2014, 44(2): 269-279.
- [52] COCKS M, SHAW C S, SHEPHERD S O, et al. Sprint interval and endurance training are equally effective in increasing muscle microvascular density and eNOS content in sedentary males [J]. J Physiol, 2013, 591(3): 641-656.
- [53] OLIVER T D, REID S M, SMITH A R, et al. Effects of acute and chronic interval sprint exercise performed on a manually propelled treadmill on upper limb vascular mechanics in healthy young men [J]. Physiol Rep, 2016, 4(13): e12861.
- [54] WHYTE L J, GILL J M, CATHCART A J. Effect of 2 weeks of sprint interval training on health-related outcomes in sedentary overweight/obese men [J]. Metabolism, 2010, 59(10): 1421-1428.
- [55] HO T Y, REDMAYNE G P, TRAN A, et al. The effect of interval sprinting exercise on vascular function and aerobic fitness of post-menopausal women [J]. Scand J Med Sci Sports, 2020, 30(2): 312-321.
- [56] ZHANG Y, QI L, XU L, et al. Effects of exercise modalities on central hemodynamics, arterial stiffness and



- cardiac function in cardiovascular disease: systematic review and Meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *PLoS One*, 2018, 13(7): e0200829.
- [57] MANOJLOVIĆ M, PROTIĆ-GAVA B, MAKSIMOVIĆ N, et al. Effects of combined resistance and aerobic training on arterial stiffness in postmenopausal women: a systematic review[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(18): 9450.
- [58] QIU S, CAI X, YIN H, et al. Exercise training and endothelial function in patients with type 2 diabetes: a Meta-analysis[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2018, 17(1): 64.
- [59] 袁怡婷, 王丽梅, 周元芬, 等. 循环抗阻干预对冠心病患者泵血机能和组织微循环的影响[J]. *护理学杂志*, 2019, 34(6): 5-8.
- YUAN Y T, WANG L M, ZHOU Y F, et al. Effects of a combined aerobic and resistance exercise program on cardiac pump function and tissue microcirculation of patients with coronary heart disease [J]. *J Nurs Sci*, 2019, 34(6): 5-8.
- [60] SON W M, SUNG K D, BHARATH L P, et al. Combined exercise training reduces blood pressure, arterial stiffness, and insulin resistance in obese prehypertensive adolescent girls[J]. *Clin Exp Hypertens*, 2017, 39(6): 546-552.
- [61] SON W M, SUNG K D, CHO J M, et al. Combined exercise reduces arterial stiffness, blood pressure, and blood markers for cardiovascular risk in postmenopausal women with hypertension[J]. *Menopause*, 2017, 24(3): 262-268.
- [62] LEE Y H, PARK S H, YOON E S, et al. Effects of combined aerobic and resistance exercise on central arterial stiffness and gait velocity in patients with chronic poststroke hemiparesis[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2015, 94(9): 687-695.
- [63] PARK J, PARK H. Effects of 6 months of aerobic and resistance exercise training on carotid artery intima media thickness in overweight and obese older women[J]. *Geriatr Gerontol Int*, 2017, 17(12): 2304-2310.
- [64] MITROPOULOS A, GUMBER A, AKIL M, et al. Exploring the microcirculatory effects of an exercise programme including aerobic and resistance training in people with limited cutaneous systemic sclerosis[J]. *Microvasc Res*, 2019, 125: 103887.
- [65] GREEN D J, HOPMAN M T, PADILLA J, et al. Vascular adaptation to exercise in humans: role of hemodynamic stimuli[J]. *Physiol Rev*, 2017, 97(2): 495-528.
- [66] GREEN D J, SMITH K J. Effects of exercise on vascular function, structure, and health in humans [J]. *Cold Spring Harb Perspect Med*, 2018, 8(4): a029819.
- [67] DURAND M J, GUTTERMAN D D. Exercise and vascular function: how much is too much? [J]. *Can J Physiol Pharmacol*, 2014, 92(7): 551-557.
- [68] NYBERG M, GLIEMANN L, HELLSTEN Y. Vascular function in health, hypertension, and diabetes: effect of physical activity on skeletal muscle microcirculation[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2015, 25(Suppl 4): 60-73.
- [69] FUJIE S, HASEGAWA N, SATO K, et al. Aerobic exercise training-induced changes in serum adiponectin level are associated with reduced arterial stiffness in middle-aged and older adults[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2015, 309(10): H1642-H1647.
- [70] PHILLIPS S A, ANDAKU D K, MENDES R G, et al. Exploring vascular function biomarkers: implications for rehabilitation[J]. *Braz J Cardiovasc Surg*, 2017, 32(2): 125-135.
- [71] NISHIYAMA S K, ZHAO J, WRAY D W, et al. Vascular function and endothelin-1: tipping the balance between vasodilation and vasoconstriction [J]. *J Appl Physiol*, 2017, 122(2): 354-360.
- [72] 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): 1133-1142.
- [73] ROSS M D, MALONE E, FLORIDA-JAMES G. Vascular ageing and exercise: focus on cellular reparative processes [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2016: 3583956.
- [74] 闫明静, 沈涛. 线粒体功能障碍与血管内皮损伤的研究进展[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2021, 29(10): 829-837.
- YAN M J, SHEN T. The research progress on mitochondrial dysfunction and vascular endothelial cell injury[J]. *Chin J Arterioscler*, 2021, 29(10): 829-837.
- [75] ANTUNES B M, ROSSI F E, CHOLEWA JM, et al. Regular physical activity and vascular aging [J]. *Curr Pharm Des*, 2016, 22(24): 3715-3729.
- [76] DO B A, JASPERS R T, WÜST R C. Regular physical exercise mediates the immune response in atherosclerosis [J]. *Exerc Immunol Rev*, 2021, 27: 42-53.
- [77] HASEGAWA N, FUJIE S, KURIHARA T, et al. Effects of habitual aerobic exercise on the relationship between intramyocellular or extramyocellular lipid content and arterial stiffness[J]. *J Hum Hypertens*, 2016, 30(10): 606-612.
- [78] 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*, 2020, 32(8): 855-863.
- ZHU H, GAO B H. Research progress in effects and mechanisms of aerobic exercise on human microvascular reactivity[J]. *Chin Bull Life Sci*, 2020, 32(8): 855-863.
- (此文编辑 许雪梅)