

·综述·

全身律动训练在心血管疾病中的应用进展*

李佳俊¹ 王日旺² 黄莹¹ 丁荣晶^{2,3}

全身律动训练(whole body vibration training, WBVT)首次提出是在1987年,由俄罗斯体操教员Nazarov V与科学家Spivak G共同提出,目的是通过将力量训练和律动训练结合在一起来提高体操运动员的肌力与伸展性^[1]。鉴于WBVT存在提高肌肉力量和强度的优势,使它迅速受到极大关注。经过几十年发展,WBVT被发现对于心血管疾病(cardiovascular disease, CVD)也存在一定的预防和治疗作用,因此WBVT不仅应用于体育领域,在医学领域也有所涉足。在第61届美国运动医学会(American College of Sports Medicine, ACSM)年会暨第5届运动是良药世界科学大会上把WBVT纳入康复医学和体育领域中^[2]。

WBVT是一种新兴无创的神经肌肉训练手段,通过在X(横轴)、Y(纵轴)、Z(垂直轴)上施加不同的振频(Hz)、振幅(mm)和持续时间(s)产生的机械振动刺激肌梭,肌梭通过强直振动反射作出反应,即通过激活肌梭中的Ia传入纤维,支配同一肌肉的 α 运动神经元兴奋,梭外肌收缩,诱导放松被激动肌腱的拮抗肌,增加肌肉收缩强度,使人体中枢神经系统产生适应性反应并提高机体运动能力^[3-4]。

CVD传统康复方式包括有氧运动训练、肌肉力量训练与柔韧协调性训练等,有研究表明有氧运动和肌力训练对心功能很重要^[5-6]。高强度间歇有氧训练和动态抗阻训练(最大单次重复的70%)比低强度有氧和抗阻训练对提高心肺耐力、增加肌肉力量和改善心功能更有效,柔韧性训练能有效预防慢性腰痛和保持肌肉骨骼系统处于最佳状态^[7-9]。但有氧运动训练和抗阻训练需要医务人员密切关注心血管病患者的血压、心率、心电图和运动耐受性等,超过50%最大一次收缩运动可能会造成过分的心率和血压升高,诱发更多心律失常^[9],不是所有人都能够很好完成,如高危心血管病患者、高龄老年人或体质衰弱者。柔韧性训练也需要一定的关节活动度,对于身体素质欠佳的患者在放松肌肉和保持肌肉骨骼系统状态需要一个替代方式。

需要寻找一项安全有效的提升肌力、保持神经肌肉系统状态并且改善心血管系统功能的训练方式。本综述的目的是探讨全身律动训练在心血管疾病中的应用潜力及机制,以

期为心血管疾病临床预防和康复应用提供依据和思路。

1 全身律动训练的基本原理和禁忌证

1.1 WBVT的工作机制

WBVT的工作机制可以从肌肉骨骼系统和心血管系统两方面来阐述。

在肌肉骨骼方面,WBVT从提高神经-肌肉反射效率、增加肌浆网内钙离子释放、提高肌肉激活程度,并使肌肉肌腱单位(muscle tendon unit, MTU)中存储肌肉弹性势能释放发挥作用^[3]。具体来说,首先,WBVT以律动刺激直接或间接作用在骨骼肌的肌腹或肌腱上,刺激Ia类传入纤维传递冲动到脊髓前角 α 运动神经元^[10,12]。然后,这冲动刺激分成两部分,一部分调节肌梭牵张反射的敏感性,提高肌肉的拉长—缩短周期和个体在高阈值运动单位内产生高放电率的能力,从而改善神经-肌肉反射效率,增强肌肉收缩能力^[10-12],另一部分使 α 运动神经元兴奋及梭外肌纤维收缩,进而导致MTU迅速收缩,增强机体在短时间内募集肌纤维的能力,使MTU储存的肌肉弹性势能释放^[13-14]。最后,冲动会传递到神经—肌肉接点^[15],促进乙酰胆碱释放,作用于肌质网的乙酰胆碱受体使 Ca^{2+} 释放增加,释放的 Ca^{2+} 引起肌球蛋白轻链磷酸化,改变肌球蛋白和肌动蛋白头部结构,使得两者结合更快,提高肌肉激活程度,促使更多运动单位参与肌肉收缩,从而提高肌肉力量^[15-17]。

在心血管系统方面,谭景旺等^[18]学者检索国内外大量文献得出全身水平律动训练(whole body periodic acceleration, WBPA)可以通过拍频现象提高血流速,通过激活丝氨酸苏氨酸蛋白激酶(phosphoinositide 3-kinase/serine threonine kinase, PI3K-Akt)和丝裂原细胞外信号调节激酶(mitogen extracellular signal regulated kinases/extracellular signal regulated kinase, MEK-ERK1/2)促使一氧化氮(nitric oxide, NO)释放,NO舒张血管、抑制血小板聚集和减少炎症反应。Adams等^[19]发现经WBVT后会增加内皮细胞剪切应力使之发生变形,导致它们释放NO、6-酮-前列腺素 $\text{F}_{1\alpha}$ 和前列腺素 E_2 ,组织型纤溶酶原激活物(tissue plasminogen acti-

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2026.07.025

*基金项目:中央高水平医院临床科研专项(2023-PUMCH-Z-005)

1 哈尔滨医科大学第五临床医学院,黑龙江省大庆市,163711; 2 中国医学科学院北京协和医院; 3 通讯作者
第一作者简介:李佳俊,男,硕士研究生; 收稿日期:2025-02-17

vator, t-PA)等物质,从而舒张血管平滑肌,提高血流速度,抗凝溶栓。Alexei Wong等^[20]认为, WBVT(振频25—40Hz, 振幅0—2mm)可能通过增加NO,减少血管紧张素Ⅱ,抑制肾素-血管紧张素-醛固酮系统发挥兴奋副交感神经和抑制交感神经作用,从而降低心率,促进运动后恢复。但也有研究表明,急性WBVT振频在1—7Hz更显著影响副交感神经活动,20—35Hz主要促进交感神经的激活^[21—22]。推测相同振频的WBVT对体液—神经双通路的影响呈现差异性调控特征,这种作用可能通过二者的协同或拮抗机制,最终表现为同一振频下交感神经或副交感神经活动的相对优势。

1.2 WBVT的禁忌证和特定人群适用性

由于CVD患者本身疾病造成的运动限制,在进行运动训练时需要更多的关注度和安全防范,但目前尚未有严重的WBVT产生的不良心血管事件(major adverse cardiovascular events, MACE)报告,针对WBVT介入CVD的疾病类型和时机也未有统一的共识和高质量的证据。根据张丽^[23]等的综述报告, WBVT介入的CVD禁忌证包含:心肌梗死急性期、高血压不稳定期、支架或起搏器植入、下肢静脉血栓和高危动脉疾病。我们应考虑到WBVT仅作为补充治疗措施,则仍需在稳定的疾病状态下参与介入,因此,可参考CVD康复相关禁忌证对WBVT禁忌证进行考虑分析。

CVD康复介入时机最好应在患者情况稳定下进行,对于CVD高危患者进行早期康复也应推迟12h—3d^[24],但某些CVD需规避运动,如急性冠脉综合征(缺血性胸痛再发、心力衰竭无法控制及持续性心律失常)、血运重建失败的患者^[25]。有指南指出瓣膜疾病患者要慎重运动,如重度主动脉瓣狭窄、伴左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)≤50%的重度主动脉反流、LVEF≤60%的重度二尖瓣反流或二尖瓣膜面积<1cm²都不适合中等强度以上运动^[26]。但即使排除了这些绝对禁忌证,在WBVT过程中仍需密切关注患者的血压、心率变化情况,尤其是在WBVT+力量训练组合运动过程中,汤一帆^[27]等认为中等强度运动中收缩压每升高10mmHg, MACE发生率和病死率会增加4%,也有指南建议心脏病患者的训练强度建议在50%—85%最大心率^[28]。总的来说,一旦运动时收缩压升高>40mmHg或下降>10mmHg或舒张压超过110mmHg,心率较静息时增加超过40次/min就需立即终止运动^[24]。

CVD的特定人群—老年人由于身体功能下降,造成对于某些康复运动已然不耐受。WBVT对心肺功能要求较低,亦可减轻慢性疾病患者的心肺系统负担,改善循环系统功能^[29—30]。Yuta Kanazawa等^[31]将70例平均年龄在69岁的接受体外循环的心内直视手术后老年患者随机分为常规心脏康复31例(常规组)和WBVT+常规心脏康复39例(AT组),研究结果显示AT组患者出院时肌肉质量明显高于常规组,

同时身体功能恢复也更快。因为在训练前后进行短期WBVT可通过降低乳酸脱氢酶和肌酸激酶水平发挥减少乳酸来缓解肌肉延迟性酸痛的作用,因此推测可能是通过调节乳酸水平导致的身体功能较快恢复^[32]。AT组整个过程安全有效且没有患者因律动而不适,同时相较于阻力训练,可以在不引起血压和脉搏过度升高情况下进行,表明WBVT利于心内直视手术后容易发生血流动力改变的老年患者。据报道,老年人进行为期24周的WBVT(振频25Hz, 振幅4mm),可有效增强动脉血管的弹性,有助于降低血流阻力和血压水平,从而减轻心脏负担^[33]。因此, WBVT对于老年CVD患者是一项值得选用的后续治疗措施。

2 全身律动训练对代谢性危险因素的影响

代谢异常对CVD影响非常大,我国CVD发生与死亡危险因素主要归因于糖尿病、血脂异常、慢性炎症、氧化应激和高水平的低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)^[34—35],同时这些危险因素可以相互影响,造成促炎因子(C反应蛋白为代表)、尿酸和同型半胱氨酸升高,内皮细胞损伤和血管平滑肌结构重塑,发生代谢异常风险很高,最终代谢失调,导致动脉粥样硬化等心血管疾病^[36—37]。

Shanshan An^[38]等以糖尿病小鼠为试验对象,通过12周,频率15Hz的全身律动训练,发现WBVT可以上调高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、降低LDL和升高葡萄糖-6-磷酸酶(glucose-6-phosphatase, G6P)水平。G6P是葡萄糖糖酵解过程中限速酶的载体,通过调节胰岛素信号下的葡萄糖分解速率来刺激葡萄糖代谢^[39],同时LDL是动脉粥样硬化的主要致病因子,因此升高G6P、上调HDL且降低LDL,使WBVT对血脂和血糖的干预可以成为WBVT干预CVD的潜在措施。

张丽^[23]等总结WBVT对肌肉组织的代谢反应,发现经过WBVT训练后小鼠肝脏中非酯化游离脂肪酸和甘油三酯含量降低至少40%。可以指出WBVT能作为一种针对肥胖或高血脂人群可供选择的干预方法。罗炯^[40]等研究发现WBVT(振频30Hz, 振幅1.5mm)+抗阻力训练(半蹲举动作, 负荷为75%个人最大举载)作为试验组,发现训练过程中试验组的糖类供能比例、能量消耗量和脂肪供能比例比单纯的抗阻力训练(对照组)更显著,如试验组糖类供能比例比对照组平均高4%,能量消耗量平均高5—14kCal/min,脂肪供能比例平均高1%—2%,并且有显著性差异。对于干预高脂血症或高血糖达到一定的治疗效果。Borja del Pozo-Cruz等^[41]和Weiyang Ren等^[42]都探究了WBVT对代谢综合征患者的影响,均发现WBVT能改善代谢综合征患者的生理状况,如胆固醇由202mg/dl降低到173mg/dl,甘油三酯由152mg/dl降到139mg/dl,糖化血红蛋白和空腹血糖均显著降低。

根据冯丽丽^[43]和 Zheng Wang 等^[44]的研究, WBVT 对炎症标志物,如半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶 1、白细胞介素-1 β (interleukins-1 β , IL-1 β)、半胱氨酸天冬氨酸募集结构域蛋白表达下降,显著降低炎症因子激活水平,抑制炎症反应,同时也可降低血浆丙二醛,升高过氧化氢酶和超氧化物歧化酶含量,提高抗氧化能力,抑制过度氧化应激。也有研究表明 WBVT 可有效增加循环鸢尾素水平^[45],鸢尾素能减少活性氧的产生和保护细胞免受氧化应激损伤^[46]。调节炎症物质和抑制过度氧化应激,保持活性氧与抗氧化系统之间平衡对 CVD 干预起到了积极作用^[47]。

因此,在针对代谢综合征患者的干预预防和治疗过程中,加入 WBVT 不乏是一个好的补充措施。

3 全身律动训练对心血管功能的影响

3.1 循环功能的影响

循环系统血流量增加有助于改善人体血液循环功能,供应各种营养物质并带走代谢废物,同时血流量的增加和加速回流有助于供应更多氧提高心肺功能。Andrzej Szopa^[48]等对 31 例脊髓脊膜膨出儿童进行 2 周常规物理治疗与 4 周 WBVT 改善下肢血流中最大收缩速度(peak systolic velocity, PSV)和舒张末期速度(end-diastolic velocity, EDV)的有效性评估,结果发现股浅动脉(PSV: 69.76cm/s $\rightarrow$ 74.94cm/s, EDV: 8.22cm/s $\rightarrow$ 9.91cm/s)、腘动脉(PSV: 58.85cm/s $\rightarrow$ 65.51cm/s, EDV: 7.45cm/s $\rightarrow$ 9.06cm/s)、胫前动脉(PSV: 44.41cm/s $\rightarrow$ 47.81cm/s, EDV: 5.36cm/s $\rightarrow$ 6.38cm/s)血流速度均明显提高, P 值 <0.05 有显著的差异。也有研究表明, WBVT 后外周循环血流量增加近 14%,振频 45Hz 的 WBVT 持续 7min 小腿血流量增加近 46%^[49],毛细血管比纤维增加了 14%^[50]。同时,根据谭景旺^[18]等、Adams^[19]等、Alexei Wong^[20]等的研究结果和 Sánchez-Delgado JC^[51]等的 Meta 分析所述, WBVT 可在体液和神经调节两方面共同舒张血管、调节交感迷走神经平衡控制血流速度。WBVT 对循环血液的影响可能是促进血管生成^[52]、降低动脉硬度^[53]、提高血管扩张能力^[18-20]和调节交感迷走神经平衡引起的,因此利用此类效果可对高血压、外周动脉疾病等有一定干预治疗作用, WBVT 应作为一种可行有效的补充措施。

3.2 心脏功能的影响

Farshad Ghazalian 等^[54]将 24 名健康男性分为高低振幅两组分析 WBVT 对左心室每搏输出量与射血分数的影响。WBVT 为期 8 周,振幅 2—4mm,频率从 20Hz 开始,每周渐进增加 5Hz。低振幅组内的每搏输出量和射血分数在试验前是(72.42 $\pm$ 14.34)cm³和(65.22 $\pm$ 3.41)%,试验后为(78.42 $\pm$ 23.19)cm³和 67% $\pm$ 4.18%,无显著性差异,同样对于高振幅组内的每搏输出量 $P>0.05$ 及射血分数 $P>0.05$ 也无显著性意

义,不同组间的同一训练时期 P 值都 >0.05 。即 WBVT 对左心室每搏输出量与射血分数无明显影响,不足以影响心脏的收缩功能。

F Item^[50]等研究也支持上述结论,该研究将 21 名年轻女性随机分配进行每周 3 天,共持续 5 周的 VibroX(振频 30Hz-WBVT+阻力运动+血管闭塞)或久坐不动组(对照组 9 名), VibroX 组的心输出量与对照组相比无明显差异,其最大值相似。VibroX 组通气量与耗氧量的最大值在训练前后无明显变化,但试验后 VibroX 组的通气量(83 $\pm$ 13)L/min 与对照组(71 $\pm$ 17)L/min 相比有显著性差异。推测 WBVT 可能对心输出量和耗氧量不造成显著影响,但增加通气量可能使运动能力提高、降低心脏代偿负担、激活副交感神经降低心率来减少心肌耗氧量。

4 全身律动训练在心血管疾病中的应用

4.1 心血管疾病运动功能下降人群

对 CVD 患者来说,除了疾病本身需要治疗以外,也要针对因为患病卧床继发的自身肌力、协调性与平衡性下降问题,进行心脏康复治疗,帮助患者更快回归家庭和社会。

Agata Nowak-Lis^[55]等评估 WBVT 对缺血性心脏病或心肌梗死患者运动耐量的影响,将心肌梗死(2 个月 $\leq$ 梗死时间 $\leq$ 6 个月,运动耐受性良好 $\geq$ 7 代谢当量[metabolic equivalent, MET])患者先在自行车上热身 10min,随后采用 WBVT(40Hz, 2mm,半蹲 1min,脚跟离地)训练 20min,结果显示代谢当量平均由 10.95MET 上升到 12.05MET,最大耗氧量(决定运动耐量的指标)平均由(38.59 $\pm$ 5.91)ml/kg/min 增加到(45.17 $\pm$ 7.45)ml/kg/min,表明运动耐量有显著性改善。朱晓凤^[56]分别采用 30Hz/2mm 和 45Hz/2mm 的 WBVT 模式,对平均 65 岁的健康老年人进行 12 周的运动训练(包括半蹲、深蹲、提踵、单腿蹲训练),训练结束后单脚闭眼站立时间提升 8s, 30s 连续站坐次数提升 8 次,最大前后倾压力中心距离提升 11%,这些结果均表明 WBVT 能显著改善老年人动静平衡能力,增强核心稳定性,并且 45Hz 的 WBVT 效果更佳。An Bogaerts 等^[57]探究为期一年的 WBVT(30Hz $\rightarrow$ 40Hz, 2.5mm $\rightarrow$ 5mm)与健身训练对健康老年人肌肉力量和质量的影响,研究结果显示两组训练均能显著增加等长肌力、爆发性肌力和肌肉质量, WBVT 和健身训练分别增加 9.8% vs 13.1%、10.9% vs 9.8% 和 3.4% vs 3.8%。由此可见 WBVT 与健身训练一样有效,并且与健身训练相比, WBVT 最大限度地减少了对肌肉骨骼、呼吸系统有意识运动和心血管系统负荷压力需求。此外, WBVT 的依从性非常好,大多数参与者结束后希望继续参加。因此 WBVT 是健身训练的一种有效替代措施^[58]。

WBVT 对脑卒中后遗症中运动障碍也具有显著的康复

效果,能改善平衡功能、步行能力以及肌肉痉挛状态等^[59-61],并且在患者可耐受情况下振频越高,改善效果越佳^[62]。

4.2 外周动脉疾病人群

外周动脉疾病(peripheral artery disease, PAD)是一种因动脉中脂肪斑块堆积引起动脉狭窄或阻塞的血管疾病,常见症状导致疲劳、麻木、间歇性跛行等,运动时疼痛,休息后缓解^[63]。炎症和氧化应激被认为是导致PAD的两大主要机制^[63-64]。

Yameena Jawed^[52]等研究WBVT(35Hz, 4mm)对循环干细胞(circulating stem cell, CPC)/循环祖细胞(circulating progenitor cell, CPCs)和细胞因子的影响,以单独WBVT、重复深蹲90°、WBVT+重复深蹲90°作对比,研究发现单独WBVT使抗炎因子白细胞介素-10(IL-10, $P < 0.03$)、血管内皮生长因子($P < 0.005$)、肿瘤坏死因子- α ($P < 0.01$)均能显著升高,并且促进CPC升高33%,而白细胞介素-6水平下降($P = 0.056$)。WBVT联合重复深蹲使血管生成性CPCs增加39%。WBVT对CPC/CPCs及细胞因子的积极影响,发挥促进血管生成和抗炎作用,缓解动脉狭窄或阻塞导致的血液供应不足。Halina Gattner^[65]等研究以12周WBVT(40—50Hz, 2mm)与无律动训练对年轻健康女性血液指数的影响,结果发现红细胞平均体积($P = 0.015$)和血红蛋白平均质量($P = 0.006$)显著降低,并且随时间显著变化($P < 0.05$),血红蛋白浓度显著增加($P = 0.005$)、红细胞的变形性和聚集幅度增加。通过增强红细胞穿越狭窄毛细血管及血窦微小孔隙的形变能力,同时提升其携氧效能,从而有效缓解因血管狭窄或闭塞引发的疲乏、麻木等症状。

综上, WBVT能使IL-1 β 生成减少,从而抑制平滑肌细胞增殖和血小板聚集,阻碍血管内斑块形成^[63],此外IL-6减少和IL-10升高发挥抗炎作用,帮助减轻炎症反应^[66]。尽管肿瘤坏死因子- α 水平升高是促进炎症,但能通过诱导各种促血管生成因子来促进血管新生和改善微循环灌注,对血管内皮功能稳态产生正向调控作用。最后在氧化应激方面, WBVT能促进NO、超氧化物歧化酶和超氧化物歧化酶生成,抑制或清除活性氧,改善内皮功能障碍和抗氧化能力,保护血管正常功能^[67]。

因此, WBVT不仅在心血管系统中能发挥一定积极作用,在外周动脉系统中也能达到促进血管生成、提高红细胞形变和携氧能力,同时干预炎症和氧化应激,应用WBVT在干预治疗外周动脉疾病是一种可行的补充方案。

5 全身律动训练的局限性与挑战

目前临床对全身律动训练虽然有更多的关注度,但大部分都集中于神经骨骼系统方面,对心血管系统的研究仍然不足,并且研究结论中律动产生积极作用的频率和不良生理学

效益的频率多有重叠,甚至有些研究结果显示,全身律动训练效果有限或与常规运动无明显差异,临床应加强大规模的随机对照试验的设计与实施,探索全身律动训练在不同心血管疾病亚组的律动参数影响及相关生理机制研究,以期为建立统一的标准律动训练指南提供支持和思路。

目前对全身律动训练的潜在风险研究较少,缺乏全面的安全性评估,对绝对和相对禁忌证证明明确不足,并且由于律动训练可能引发不适感或枯燥感,长期使用的依从性较低,尤其在缺乏监督和指导的情况下更明显。开发基于人工智能的个性化推荐系统,将远程康复监测与全身律动训练结合,让康复治疗师可以远程监督和指导患者进行律动训练,根据实时数据归纳整理,不断调整适合患者的律动参数,形成患者的个性化运动处方,以期达到最大的治疗效果。

6 结论

全身律动训练是一种新兴、非药物和非侵入性的运动干预方式,广泛应用于神经骨骼系统方面,以此提高患者的肌力、平衡性及协调性等,但其在心血管系统方面研究相对较少。根据目前研究,全身律动训练能降低动脉硬化程度、调节交感迷走神经平衡、促进剧烈运动后心率恢复和调节乳酸缓解延迟性肌肉酸痛,同时增加内皮细胞剪切应力释放某些血管活性物质,舒张血管、加速血流、抗凝溶栓,即使对于心血管病前期的危险因素预防也能产生一定积极作用。因此,全身律动训练在心血管疾病管理中具有广阔的应用前景,作为一种辅助治疗手段潜力巨大,在后续康复治疗中能有效提高患者的生活质量,促进更快回归家庭和社会。但全身律动训练仍需更多高质量研究来验证其效果和安全性,需要开展大规模的随机对照试验,探索不同心血管疾病亚组适合的不同律动参数,更要建立一个统一的标准律动训练指南,指导各治疗师制定个性化的运动处方。全身律动训练无论是作为各年龄段各身体素质人群的运动训练方式,还是未来心血管疾病预防和康复的一种辅助手段,都是一项值得深入研究的运动干预方式。

参考文献

- [1] Nazarov V, cSpivak G. Development of athlete's strength abilities by means of biomechanical stimulation method[J]. Theory and Practice of Physical Culture (Moscow), 1985, 12:445—450.
- [2] 卜淑敏, 韩天雨. 全身振动训练在运动训练和康复领域中的应用及研究进展[J]. 北京体育大学学报, 2014, 37(8):65—70.
- [3] 曹丹炫, 李斐, 张勤, 等. 全身振动训练的应用效果与作用机制[J]. 武汉体育学院学报, 2023, 57(8):92—100.
- [4] 乔正基, 柴牛兵, 郑璐瑶, 等. 全身振动训练改善绝经后女性骨密度效果的Meta分析[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(24):5195—5202.

- [5] 励建安, 顾晓圆, 王红, 等. 力量训练在心血管疾病康复中的应用[J]. 中国运动医学杂志, 1997(3):210—214.
- [6] 程晋芳, 薛君, 由迪慧, 等. 心脏康复在不同心血管疾病中应用的进展[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2024, 26(2):229—231.
- [7] 洪怡, 郭小亚, 吴雪娇, 等. 科学运动与心脏康复[J]. 中国实用内科杂志, 2022, 42(5):363—366.
- [8] 卢冬磊, 冯展鹏, 曹立全, 等. 老年肌少症的运动干预[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(35):5723—5731.
- [9] Shailendra P, Baldock KL, Li LSK, et al. Weight training and risk of all-cause, cardiovascular disease and cancer mortality among older adults[J]. International Journal of Epidemiology, 2024, 53(3):74.
- [10] Eklund G, Hagbarth KE. Normal variability of tonic vibration reflexes in man[J]. Exp Neurol, 1966, 16(1):80—92.
- [11] Karatrantou K, Bilios P, Bogdanis GC, et al. Effects of whole-body vibration training frequency on neuromuscular performance: a randomized controlled study[J]. Biology of Sport, 2019, 36(3):273—282.
- [12] Wang Z, Wei Z, Li X, et al. Effect of whole-body vibration on neuromuscular activation and explosive power of lower limb: A systematic review and meta-analysis[J]. PloS One, 2022, 17(12):e0278637—e0278637.
- [13] 李志远, 虞松坤, 杨铁黎. 肌肉“拉长-缩短周期”运动理论及其在爆发力训练中的应用研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2019, 38(3):228—234.
- [14] Kalaoglu E, Faruk Bucak Ö, Kökçe M, et al. High-frequency whole-body vibration activates tonic vibration reflex [J]. Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 2023, 69(1):46—51.
- [15] Tillin NA, Bishop D. Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities[J]. Sports Medicine (Auckland, N.Z.), 2009, 39(2):147—166.
- [16] 刘瑞东, 李庆. 激活后增强效应的生理机制、影响因素与应用策略[J]. 成都体育学院学报, 2017, 43(6):58—64.
- [17] Liu Y, Fan Y, Chen X. Effects of whole-body vibration training in static and dynamic semi-squat patterns on the lower limb muscle activity[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):14432—14432.
- [18] 谭景旺, 韩甲, 沈玉芹, 等. 全身水平振动训练对心血管系统的影响与机制进展[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(4):430—433.
- [19] Adams JA, Bassuk J, Wu D, et al. Periodic acceleration: effects on vasoactive, fibrinolytic, and coagulation factors [J]. Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985), 2005, 98(3):1083—1090.
- [20] Wong A, Figueroa A. Effects of whole-body vibration on heart rate variability: acute responses and training adaptations[J]. Clinical Physiology and Functional Imaging, 2018, 39(2):115—121.
- [21] Zhang N, Fard M, Bhuiyan MHU, et al. The effects of physical vibration on heart rate variability as a measure of drowsiness[J]. Ergonomics, 2018, 61(9):1—19.
- [22] Tan J, Lei J, Wu SSX, et al. Modulation of heart rate variability and brain excitability through acute whole-body vibration: the role of frequency[J]. Journal of Human Kinetics, 2024, 92:111—120.
- [23] 张丽, 瓮长水. 全身振动训练在老年康复领域应用的研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2015, 21(2):163—167.
- [24] 钟优, 顿耀山, 魏文哲, 等. 心血管运动医学指南[J]. 中国循环杂志, 2024, 39(10):937—955.
- [25] 王雨桐, 钟优, 张倩, 等. 中国《心血管运动医学指南》要点解读[J]. 中国心血管杂志, 2024, 29(6):535—539.
- [26] Pelliccia A, Sharma S, Gati S, et al. 2020 ESC Guidelines on sports cardiology and exercise in patients with cardiovascular disease[J]. European Heart Journal, 2021, 42(1):17—96.
- [27] 汤一帆, 胡晓琳, 杜文洁, 等. 心血管疾病人群康复运动急性不良事件及其影响因素的研究进展[J]. 中国护理管理, 2021, 21(10):1563—1568.
- [28] Mezzani A, Hamm LF, Jones AM, et al. Aerobic exercise intensity assessment and prescription in cardiac rehabilitation: a joint position statement of the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation, the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation and the Canadian Association of Cardiac Rehabilitation[J]. European Journal of Preventive Cardiology, 2013, 20(3):442—467.
- [29] de Souza HCM, Pessoa MF, Dos Santos Clemente R, et al. Inspiratory muscle training in addition to whole body vibration for functional and physical outcomes in pre-frail older women: a randomized controlled trial[J]. Age and ageing, 2022, 51(4):afac083.
- [30] 刘思敏, 王谦鑫宏, 刘俊楠, 等. 全身振动训练在重度慢性阻塞性肺疾病中的康复机制研究进展[J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2023, 22(4):289—294.
- [31] Kanazawa Y, Saito S, Okubo S, et al. Safety and effectiveness of acceleration training as cardiac rehabilitation immediately after open heart surgery: a pilot study[J]. CIRC J, 2024, 88(9):1432—1439.
- [32] Kang SR, Min JY, Yu C, et al. Effect of whole body vibration on lactate level recovery and heart rate recovery in rest after intense exercise[J]. Technology and Health Care, 2017, 25(S1):115—123.
- [33] 陈金鳌, 张林, 陈璇, 等. 振动训练对低龄老年人动脉血管弹性的影响[J]. 体育学刊, 2015, 22(2):120—126.
- [34] 王明宏, 张飞云, 黄宜林, 等. 心血管代谢危险因素与心血管疾病发病和死亡的关联及归因负担[J]. 中华高血压杂志, 2025, 33(3):252—257.
- [35] Silveira Rossi JL, Barbalho SM, Reverete de Araujo R, et al. Metabolic syndrome and cardiovascular diseases: Going beyond traditional risk factors[J]. Diabetes-metabolism Research And Reviews, 2022, 38(3):e3502—e3502.
- [36] 李建军. 心血管代谢相关危险因素是心血管疾病防控的关键[J]. 中国循环杂志, 2022, 37(10):969—973.
- [37] Cheng XM, Hu YY, Yang T, et al. Reactive oxygen species and oxidative stress in vascular-related diseases[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2022, 2022:7906091—7906091.
- [38] An S, Wang D, Ma X, et al. Whole body vibration remodels skeletal muscle via autophagy and energy metabo-

- lism in diabetic mice[J]. *Molecular Medicine Reports*, 2022, 25(5):1—8.
- [39] Kundu BK, Zhong M, Sen S, et al. Remodeling of glucose metabolism precedes pressure overload-induced left ventricular hypertrophy: review of a hypothesis[J]. *Cardiology*, 2015, 130(4):211—220.
- [40] 罗炯, 欧阳一毅. 全身振动介入抗阻力训练对能量消耗的影响研究[J]. *武汉体育学院学报*, 2017, 51(6):77—82.
- [41] del Pozo-Cruz B, Alfonso-Rosa RM, del Pozo-Cruz J, et al. Effects of a 12-wk whole-body vibration based intervention to improve type 2 diabetes[J]. *Maturitas*, 2014, 77(1):52—58.
- [42] Ren W, Pu F, Luan H, et al. Effects of local vibration with different intermittent durations on skin blood flow responses in diabetic people[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2019, 7:310—310.
- [43] 冯丽丽, 李博文, 田振军. 振动训练与心血管及脑部疾病防治研究进展[J]. *生命科学*, 2021, 33(4):502—511.
- [44] Wang Z, Zhang X, Sun M. The application of whole-body vibration training in knee osteoarthritis[J]. *Joint Bone Spine*, 2022, 89(2):105276—105276.
- [45] Dos Santos JM, Taiar R, Ribeiro VGC, et al. Whole-body vibration training on oxidative stress markers, iris levels, and body composition in women with fibromyalgia: a randomized controlled trial[J]. *Bioengineering*, 2023, 10(2):260—260.
- [46] Zhao J, Qiao L, Dong J, et al. Antioxidant effects of irisin in liver diseases: mechanistic Insights[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022, 2022:3563518—3563518.
- [47] Yan Q, Liu S, Sun Y, et al. Targeting oxidative stress as a preventive and therapeutic approach for cardiovascular disease[J]. *Journal of Translational Medicine*, 2023, 21(1):519.
- [48] Szopa A, Domagalska-Szopa M, Siwiec A, et al. Effects of whole-body vibration-assisted training on lower limb blood flow in children with myelomeningocele[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9:601747.
- [49] Button C, Anderson N, Bradford C, et al. The effect of multidirectional mechanical vibration on peripheral circulation of humans[J]. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 2007, 27(4):211—216.
- [50] Item F, Denking J, Fontana P, et al. Combined effects of whole-body vibration, resistance exercise, and vascular occlusion on skeletal muscle and performance[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2011, 32(10):781—787.
- [51] Sánchez-Delgado JC, Jácome-Hortúa AM, Yoshida de Melo K, et al. Physical exercise effects on cardiovascular autonomic modulation in postmenopausal women—a systematic review and meta-analysis[J]. *International Journal of Environmental Research And Public Health*, 2023, 20(3):2207.
- [52] Jawed Y, Beli E, March K, et al. Whole-body vibration training increases stem/progenitor cell circulation levels and may attenuate inflammation[J]. *Military Medicine*, 2020, 185(S1):404—412.
- [53] Alvarez-Alvarado S, Jaime SJ, Ormsbee MJ, et al. Benefits of whole-body vibration training on arterial function and muscle strength in young overweight/obese women[J]. *Hypertension research*, 2017, 40(5):487—492.
- [54] Ghazalian F, Hakemi L, Pourkazemi L, et al. Effects of amplitudes of whole-body vibration training on left ventricular stroke volume and ejection fraction in healthy young men[J]. *Anatolian Journal of Cardiology*, 2015, 15(12):976—980.
- [55] Nowak-Lis A, Nowak Z, Gabrys T, et al. The use of vibration training in men after myocardial infarction[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(6):3326.
- [56] 朱晓凤. 不同频率全身振动训练对老年人平衡和核心稳定性的影响[J]. *中国康复理论与实践*, 2020, 26(3):291—294.
- [57] Bogaerts A, Delecluse C, Claessens AL, et al. Impact of whole-body vibration training versus fitness training on muscle strength and muscle mass in older men: a 1-year randomized controlled trial[J]. *The Journals of Gerontology*, 2007, 62(6):630—635.
- [58] Tóth K, Oroszi T, Nyakas C, et al. Whole-body vibration as a passive alternative to exercise after myocardial damage in middle-aged female rats: Effects on the heart, the brain, and behavior [J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2023, 15:1034474.
- [59] 杜志伟, 陈艳, 王路, 等. 三维运动平台联合全身振动训练对老年脑卒中患者平衡功能及跌倒风险的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(11):1600—1605.
- [60] 忻菲菲. 全身振动训练对脑卒中偏瘫患者下肢张力及步行能力的影响:评《脑卒中的治疗与调养》[J]. *中国试验方剂学杂志*, 2022, 28(21):112.
- [61] Yang X, Xue X, Tu H, et al. Effect of whole-body vibration training on the recovery of lower limb function in people with stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Disability and Rehabilitation*, 2023, 45(23):3823—3823.
- [62] 王路, 陈艳, 杜志伟, 等. 不同频率全身振动训练对脑卒中患者下肢功能的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2023, 38(12):1696—1700.
- [63] 郑凯, 韩佩佩. 运动与饮食干预治疗外周动脉疾病的研究进展[J]. *中国医学科学院学报*, 2024, 46(6):932—939.
- [64] Peñín-Grandes S, Martín-Hernández J, Valenzuela PL, et al. Exercise and the hallmarks of peripheral arterial disease [J]. *Atherosclerosis*, 2022, 350:41—50.
- [65] Gattner H, Adamiak J, Piotrowska A, et al. Effect of whole-body vibration training on hemorheological blood indices in young, healthy women[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(4):3232.
- [66] Ahuja G, Arauz YLA, van Heuvelen MJG, et al. The effects of whole-body vibration therapy on immune and brain functioning: current insights in the underlying cellular and molecular mechanisms[J]. *Frontiers in Neurology*, 2024, 15:1422152.
- [67] Zuccarelli L, Baldassarre G, Winnard A, et al. Effects of whole-body vibration or resistive-vibration exercise on blood clotting and related biomarkers: a systematic review [J]. *NPJ microgravity*, 2023, 9(1):87.