

垂直振动训练对2型糖尿病患者微血管功能的干预效应及潜在机制研究进展

李淼^{1,2} 文凡^{1,2} 付贝伦^{1,2} 朱欢^{1,2*} 赵鹏^{1,2} 王康锋³ 胡江平³

⁽¹⁾湖北民族大学, 硒食品营养与健康智能技术湖北省工程研究中心, 恩施州 445000;

⁽²⁾湖北民族大学体育学院, 恩施州 445000; ⁽³⁾广西民族师范学院体育学院, 崇左 532200)

摘要 该研究总结垂直振动训练对2型糖尿病患者(T2DM)微血管功能的干预效果及潜在的作用机制, 为T2DM患者微血管功能障碍的干预治疗提供新的方法和思路。研究认为(1) 15~50赫兹、2~4毫米、持续5~15分钟单次局部垂直振动训练和持续2~12周的长期干预均能改善T2DM患者微血管功能。12~40赫兹、2~6毫米、持续时间3~5分钟及以上的单次全身垂直振动训练和12周的长期干预也能改善T2DM患者微血管功能。为了使干预效果有效累积, 建议T2DM患者采取长期干预治疗模式。(2) 垂直振动训练主要通过调控内皮细胞生成内源性一氧化氮以及促进血管内皮生长因子表达等改善T2DM患者微血管功能, 其中增大血管内皮细胞剪切应力、抑制氧化应激及改善胰岛素敏感性等是垂直振动训练促进内源性一氧化氮的产生的重要路径。(3) 建议后续研究重点围绕振动频率、振动部位、干预周期、患者微血管功能障碍程度等因素深入探究振动训练的干预效果, 并多角度探讨相关的作用机制, 为振动训练方案的制定提供更加科学、精准的证据。

关键词 局部垂直振动训练; 全身垂直振动训练; 2型糖尿病; 微血管功能; 一氧化氮; 血管内皮生长因子

Research Progress on the Intervention Effect and Potential Mechanism of Vertical Vibration Training on Microvascular Function in Type 2 Diabetic Patients

LI Miao^{1,2}, WEN Fan^{1,2}, FU Beilun^{1,2}, ZHU Huan^{1,2*}, ZHAO Peng^{1,2}, WANG Kangfeng³, HU Jiangping³

⁽¹⁾Hubei Engineering Research Center of Selenium Food Nutrition and Health Intelligent Technology, Hubei Minzu University, Enshi Prefecture 445000, China; ⁽²⁾School of Physical Education, Hubei Minzu University, Enshi Prefecture 445000, China; ⁽³⁾School of Physical Education, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, China)

Abstract This study was to summarize the intervention effect and potential mechanism of vertical vibration training on microvascular function in T2DM patients, and provide new methods and ideas for intervention and treatment of microvascular dysfunction in T2DM patients. It was concluded that (1) a single local vibration training of 15-50 Hz, 2-4 mm, lasting 5-15 min and long-term intervention lasting 2-12 weeks can improve microvascular

收稿日期: 2025-02-21

接受日期: 2025-03-18

2025年湖北省自然科学基金体育创新发展联合基金(批准号: 2025AFD659)、广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划(批准号: 2023QGRW048)和2022年度硒产品营养与健康智能技术湖北省工程研究中心开放基金(批准号: PT082208)资助的课题

*通信作者。Tel: 18817873692, E-mail: 1207105091@qq.com

Received: February 21, 2025

Accepted: March 18, 2025

This work was supported by the Hubei Provincial Natural Science Foundation for Sports Innovation and Development Joint Fund in 2025 (Grant No.2025AFD659), the Cultivation Plan for One Thousand Young and Middle-aged Backbone Teachers in Guangxi Higher Education Institutions (Grant No.2023QGRW048) and the Open Fund Project of Hubei Provincial Engineering Research Center for Nutrition and Health Intelligent Technology of Selenium-containing Products in 2022 (Grant No.PT082208)

*Corresponding author. Tel: +86-18817873692, E-mail: 1207105091@qq.com

function in T2DM patients. A single whole-body vibration training of 12-40 Hz, 2-6 mm, lasting 3-5 min or more, and a long-term intervention of 12 weeks also improved microvascular function in T2DM patients. In order to accumulate the effect of intervention effectively, it is recommended that T2DM patients adopt long-term intervention treatment mode. (2) vibration training mainly improves the microvascular function of T2DM patients by regulating the production of endogenous N by endothelial cells and promoting the expression of VEGF, among which increasing the shear stress of vascular endothelial cells, inhibiting oxidative stress and improving insulin sensitivity are important pathways for vibration training to promote the production of NO. (3) it is suggested that subsequent studies should focus on factors such as vibration frequency, vibration location, vibration mode (local and systemic), and the degree of microvascular dysfunction of patients to deeply explore the intervention effect of vibration training, and explore the relevant mechanism of action from multiple perspectives, so as to provide more scientific and accurate evidence for the formulation of vibration training programs.

Keywords local vertical vibration training; whole body vertical vibration training; type 2 diabetes; microvascular function; nitric oxide; vascular endothelial growth factor

微血管功能障碍是2型糖尿病(type 2 diabetes mellitus, T2DM)重要的病理特征,也是典型的血管并发症。胰岛素抵抗是诱导T2DM发生的关键因素,其与微血管功能障碍密切相关,并能预测微血管的病变^[1]。微血管是机体物质能量交换的唯一场所,决定胰岛素和葡萄糖向骨骼肌的转运能力。微循环障碍使胰岛素和葡萄糖向骨骼肌细胞的转运能力下降,导致骨骼肌对葡萄糖的摄取功能障碍,从而产生胰岛素抵抗。因此,微血管功能障碍是胰岛素抵抗和促进T2DM发生的重要因素。另外,T2DM患者体内长期存在高血糖状态会通过降低细胞变形性、增加红细胞聚集度、阻碍一氧化氮(nitric oxide, NO)从内皮细胞转移到平滑肌等,降低微循环血流灌注水平和血管反应性;同时高血糖引起的血管内皮损伤会提高血流灌注的异质性,导致机体对微血管使用频率不足,而其他血管过度使用,引起血管供氧能力过载,最终导致末梢神经系统损伤。此外,T2DM患者体内的慢性炎症和氧化应激状态会进一步加剧微血管功能障碍^[2-3]。综上,微血管功能障碍与T2DM发生和发展有着密切关系,改善微血管功能障碍对提高T2DM的治疗效果具有重要作用。

运动疗法是改善T2DM患者微血管功能障碍的有效方式,已用于T2DM患者的干预治疗^[4-7]。但对于下肢血管严重病变以及足部溃疡的患者,传统运动方式难以实施,尤其运动会增大足底压力和摩擦力,加重足部溃疡的程度。此外,由于下肢血管严重病变或足部溃疡的发生,部分患者无法进行正常的体育运动。因此,对T2DM患者进行无负重运动干

预是解决上述问题的关键。振动训练是在振动平台上为身体或身体特定部位提供振动运动的一种训练方式,其原理是基于振动波对人体组织和生理系统产生刺激效应^[8-9]。振动训练分为垂直方向的振动训练和水平方向的振动训练^[10],其中垂直方向的振动训练是最常用的振动模式(以下简称垂直振动训练),并在临床上用于T2DM患者微血管功能障碍的干预治疗。研究指出,垂直振动训练能显著改善T2DM患者微血管功能障碍,提高微血管血流灌注能力,对糖尿病足溃疡等有较好治疗效果,且患者无不良反应^[11-13]。振动训练能避免T2DM患者足部与地面之间产生过高的作用力,特别适用于具有糖尿病足溃疡的患者。虽然现有的证据表明,垂直振动训练是改善T2DM患者微血管功能障碍的有效方式,但鲜有研究系统阐述垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的影响。鉴于此,本研究将系统总结垂直振动训练对T2DM患者微血管功能障碍的干预效应及潜在的作用机制,为T2DM患者微血管功能障碍的干预治疗提供新的方法和思路。

1 局部垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的干预效应

根据作用部位,垂直振动训练分为局部垂直振动训练和全身垂直振动训练两种形式。两种振动训练方式均已应用于T2DM患者微血管功能障碍的干预治疗。局部垂直振动训练是一种利用振动设备产生的机械振动,对身体特定部位(如四肢、躯干、足部等)进行刺激的训练方法。

1.1 局部垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的急性干预效应

在局部垂直振动训练干预研究中, 下肢和足部是常用的干预部位, 这与T2DM患者微血管神经病变等有关。下肢和足部血流灌注不足是诱发糖尿病足溃疡发生的重要原因, 并延缓溃疡伤口的愈合进程。MARTINS等^[14]对644名糖尿病患者进行研究, 发现糖尿病足溃疡的累计发病率为26.6%, 其中5.8%患者下肢截肢, 14.0%患者死于足部溃疡, 糖尿病足溃疡对患者下肢截肢和死亡发生率有显著影响。另有研究指出, 85%以上的下肢糖尿病患者截肢前常伴有足部溃疡^[15]。因此, 改善T2DM患者下肢和足部微血管血液供应对治疗糖尿病足溃疡至关重要。

目前, 有关局部垂直振动训练对T2DM患者下肢或足部微血管功能的干预研究较少, 仅有少量学者进行研究。REN等^[11]研究指出, 两种间歇性局部垂直振动训练(10秒振动+5秒暂停、10秒振动+10秒暂停, 50赫兹, 2毫米, 干预总时间分别为7.5分钟、10分钟)和5分钟连续振动训练(50赫兹, 2毫米)均能提高T2DM患者和健康受试者足底皮肤微循环血流量, 但间歇性振动方法干预效果更佳。该研究表明间歇性和连续垂直振动训练均能对T2DM患者微血管功能产生积极的干预效果, 但间歇性振动训练能给患者带来更大的干预效益, 这与间歇性振动训练的间歇时间有关。在该研究中, 连续性振动训练的时间为5分钟, 但间歇性训练总时间达到7.5分钟、10分钟。在间歇振动训练过程中, 患者即便处于间歇休息阶段, 机体内部的血流量以及能量代谢水平依旧维持在较高的状态, 血流剪切应力仍显著高于安静值, 仍能促进血管内皮细胞释放血管因子, 发挥舒血管效应。同时, 间歇性振动训练产生的剪切力更大, 会引起更强烈的细胞和分子反应, 而连续刺激的原则可能诱导较弱的生理反应。相比于健康受试者, T2DM患者微循环功能受损, 当持续振动运动刺激较小时, 微血管内皮细胞无法释放足量的NO, 因此微血管血流量的提高幅度有限。

另外, 间歇性振动训练还能避免长时间持续振动训练对神经肌肉系统的损伤风险。当振动频率较高时, 持续长时间振动训练会引起神经肌肉损伤, 而间歇性训练能降低损伤风险和损伤程度。基于振动训练时间的因素可能会导致肌肉损伤等负面影响,

为了保证训练过程中的安全性, 振动训练中应严格控制持续振动时间或选择间歇振动训练。该研究还进一步指出, 间歇时间10秒的振动方式诱导健康受试者血流量的增加幅度大于5秒的间歇方式, 这说明间歇时间的长短也会影响微血管反应性^[11]。根据该研究的设计, 振动时间与间歇时间达到1:1能对患者微血管产生更加显著的干预效果, 这与整个振动训练的总持续时间有关。总时间越长, 血管剪切应力对内皮细胞的作用时间越长, 促进内皮细胞释放更多的NO。提示, 在一定范围之内, 间歇性振动训练的总时间越长, T2DM患者微血管功能的变化越显著, 但最佳振动干预时间和间歇时间还需进一步研究明确。

上肢垂直振动训练也能显著提高T2DM患者微血管血流量。研究指出, 5分钟前臂垂直振动训练(50赫兹, 5~6毫米)能显著提高T2DM患者和健康老年人皮肤微血管血流量, 但T2DM患者提高幅度显著小于健康受试者(223% vs 461%), 表明与正常受试者相比, T2DM患者的皮肤微血管血流量对振动刺激的反应减弱, 可能需要更高剂量的振动训练才能达到与健康人群相同的干预效果^[16]。有研究得出相似结论, 局部垂直振动训练能显著提高T2DM患者和健康受试者足部微血管血流量, 但健康受试者的升高幅度显著高于T2DM患者, 其原因可能与交感神经对足部血管的调节功能受损有关^[11]。由于T2DM患者微血管已出现内皮细胞损伤等功能障碍, 虽然振动训练能通过剪切应力刺激内皮细胞释放NO等血管因子, 但由于内皮细胞损伤导致血管因子释放能力下降。另外, MALONEY等^[16]还发现, 垂直振动训练结束后5分钟患者微血管血流量仍显著高于安静值。该研究提示, 单次局部垂直振动训练对微血管的干预效应在训练结束后仍持续存在。但由于该研究未进一步延长观察时间, 因此单次局部垂直振动训练干预效果的具体持续时间尚不明确, 建议后续进一步延长观察时间, 明确单次局部振动训练效果的持续时间。

虽然上述研究发现局部垂直振动训练能提高T2DM患者微血管功能, 但仅使用了血流量基线值评价患者微血管功能。目前, 对微血管功能的评价主要有微血管血流灌注量基线值和各种刺激下微血管的血流变化能力(即微血管反应性)两种方式。由于安静状态下微血管舒张和收缩程度不同, 因此不

能仅用微血管血流灌注量基线值评价微循环功能^[17]。针对这一问题,常用局部皮肤热充血、血流阻断充血、离子渗透等刺激评价微血管的血流储备能力和反应性。局部热刺激充血(42℃~44℃)是评价微血管反应性的常用手段,能够较好反映出微血管的血流储备能力,在临床上局部热刺下的微血管反应性是评价糖尿病患者微循环功能的重要参考指标。局部热刺下微血管反应性的变化与内源性NO生成有关。陈友强等^[18]、FUCHS等^[19]指出,与健康受试者相比,T2DM患者皮肤局部热刺激下微血管反应性明显下降,表明T2DM患者微血管内皮细胞生成NO的能力下降,导致血管舒张功能障碍。

血流阻断后充血反应与局部代谢因子、神经系统和肌源性反应对微血管舒张功能的调节有关。当代代谢产物、血管压力和/或血流发生变化时,乳酸、二氧化碳、腺苷等代谢产物刺激小动脉产生舒张反应;神经调节主要通过交感神经释放作用于内皮细胞和血管平滑肌的神经递质来调节血管舒张功能和血流量。另外,在充血的情况下,肌源性调节被激活,以调节血管直径和血流阻力。为了满足闭塞组织中的代谢需求,三种途径(代谢、神经源性和肌源性)协同调节血管舒张和控制血流。目前,对于血流阻断后反应性充血,多数研究观察上臂缺血再充血过程中前臂微血管血流量的变化。但对于T2DM患者,仅观察其前臂微血管的反应性充血能力具有局限性,尤其是对于足溃疡并发症的患者。

足部溃疡是T2DM患者最常见的血管并发症,由压力引起的组织缺血引起。足部微血管血流阻断后反应性充血是评价T2DM患者足部微血管功能的常用方式。外部施加在足部组织上的压力(阻力)超过毛细血管压力,会导致血管和淋巴管闭塞引起代谢变化,使代谢废物堆积。随着压力进一步增大,皮肤中的微血管被阻塞,使组织缺血、缺氧。缺氧组织需要大量的血液来提供营养物质和清除代谢废物。压力解除后血管反应性充血随之发生,为缺血组织提供氧气并清除废物。当人体的神经系统功能和内皮功能调节机制均处于正常状态时,身体会对压迫造成的缺血进行代偿,此时足部皮肤将表现为明显的反应性充血变化,以补偿压迫引起的缺血。但由于糖尿病患者微循环功能受损,当压力解除后足底皮肤增加的反应性充血量可能不足以补偿缺氧,造成足部缺血以及代谢废物的积累,增加感染和

溃疡发生风险。振动训练能减弱这种代偿反应,减轻足部压力性缺血症状。ZHU等^[20]研究发现,运动前(行走)10分钟足部垂直振动训练(100赫兹)能减少运动时足部第一跖骨皮肤微血管反应性充血量和血流恢复时间,表明振动训练预处理对血流量具有调节作用,可提高患者运动前的下肢血流量,降低运动时微血管的充血反应。REN等^[15]得出相似结论,加压血流闭塞(压力150毫米汞柱,持续15分钟)后,受试者足部组织出现明显的充血反应,而在加压的同时施加15分钟垂直振动训练(50赫兹,2毫米),受试者的足部皮肤微血管充血反应显著下降,说明振动训练通过相关调节机制补偿压力引起的缺血反应,保护足部组织免受压力引起的缺血性损伤,这对于预防足溃疡的发生有着重要意义。基于该研究结果,认为50赫兹的足部垂直振动训练可以改善足部微循环功能,促进伤口愈合。另外,足底真皮层营养毛细血管深度小于3毫米,2毫米的振动便能有效增加糖尿病患者足底皮肤血流量。

综上,持续5~15分钟、频率为50赫兹、振幅介于2~6毫米的局部垂直振动训练能改善T2DM患者特定部位的微血管功能,提高微血管血流灌注水平,促进营养物质的运输和代谢废物的排除,有利于微血管功能的恢复。相较于持续性振动训练,间歇性振动训练的干预效果更佳。另外,对于有足部溃疡或具有高风险溃疡的患者,为了降低运动时缺血反应,运动前可通过足部振动训练预处理提高微血管血流量。由于振动训练干预在临床上未发现严重的不良反应,振动训练可以作为糖尿病神经病变足部溃疡现有治疗方法的补充,对提高治愈率有重要作用。但目前局部垂直振动训练的干预研究也存在一些问题。除振动部位外,局部垂直振动训练能否对其他部位微血管功能也能产生干预效果尚不明确,目前尚无相关研究成果报道。对于T2DM患者,微血管功能障碍存在于多个器官和组织,仅观察特定部位微血管功能的变化无法准确了解全身微血管的变化特征,不利于整体血管病变的治疗,因此后续研究应在特定部位的基础上进一步观察局部垂直振动训练对其他部位微血管功能的变化。另外,当局部垂直振动训练时间超过5分钟是否能对T2DM患者微血管功能产生更加显著的效果尚不明确,后续研究应进一步探讨时间与干预效应的剂量关系。此外,虽然有研究指出间歇性振动训练的干预效果更好,

但振动时间与间歇时间最佳比例的设置还需进一步研究明确。

1.2 局部垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的长期干预效应

目前, 有关局部垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的长期干预效应的研究也较少。HABA等^[12]研究发现, 14天局部垂直振动训练(50赫兹, 40分钟/天)能改善T2DM大鼠微血管功能和促进微血管生成。SYABARIYAH等学者^[21]以80名糖尿病神经病变足溃疡患者为研究对象, 发现12周下肢垂直振动训练(1.78毫米, 47赫兹, 1次/2天, 15分钟/次)能改善患者足部微血管功能, 促进血管生成和伤口愈合。基于上述研究, 认为2~12周的局部垂直振动训练能改善T2DM微血管功能, 但目前该方面的研究成果较少, 且干预时间的差异性较大, 干预效果还有待进一步明确。T2DM作为一种慢性疾病, 需长期介入治疗。虽然HABA等^[12]的研究结果显示14天的局部垂直振动训练能改善糖尿病大鼠微血管功能, 但研究对象为动物模型, 并非T2DM患者。对于T2DM患者, 14天局部垂直振动训练是否也能有效改善患者微血管功能, 以及该干预周期是否能够作为治疗微血管功能障碍的最短疗程等都尚不明确。因此, 该研究结果能否直接应用到临床干预尚需更多的证据支撑。建议, 后续相关研究以T2DM患者为研究对象, 探讨局部垂直振动训练改善患者微血管功能的干预周期, 为患者周期性治疗方案提供参考。

另外, 针对不同振动频率干预效果的比较研究也较少, 尚未见相关成果的报道。上述研究中, 仅发现有学者对47赫兹和50赫兹的振动训练模式进行研究, 尚未有其他频率的干预研究。振动频率是影响振动训练干预效果的重要因素。适宜的振动频率能对T2DM患者微血管功能产生积极影响, 但不适宜的频率可能会导致干预效果不显著或带来神经损伤等。过高频率或强度的振动可导致感觉神经性疾病的发生, 尤其频率接近或达到机体组织的共振频率可使感觉神经性疾病进一步恶化。神经性病变是T2DM患者的重要并发症, 在足溃疡等产生中起到重要作用。如果振动训练的频率过高, 会加重血管神经病变的程度, 促进足溃疡的恶化。因此, 对于有神经性病变以及足部溃疡的T2DM患者, 应慎重选择振动频率。针对该问题, 建议后续研究设置不同的干预频率, 探究振动频率与T2DM患者微血管功

能的变化是否有“频率-剂量”效应关系, 为患者制定振动训练方案提供更加科学、精准的证据参考。此外, 随着患者微血管功能的改善, 单一频率的振动干预可能不会产生持续性干预效果, 因此建议根据患者微血管功能的变化改变干预频率, 以获得持续有效的干预。

2 全身垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的干预效应

2.1 全身垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的急性干预效应

全身垂直振动训练主要原理是通过振动平台产生机械刺激, 由脚底传递至全身从而对神经、肌肉、骨骼活动产生良性影响。相比于局部垂直振动训练, 全身垂直振动训练能对全身微血管产生干预效果。JOHNSON等^[22]研究发现, 5分钟全身垂直振动运动(26赫兹, 2毫米)能提高伴有下肢感觉受损的T2DM患者微血管血流量, 认为振动训练是非药物治疗糖尿病神经血管并发症的一种潜在方法。BETIK等^[23]进一步指出, 3分钟全身垂直振动训练(12.5赫兹, 3~4毫米)和全身抗阻运动(25%最大力量)均能通过激活骨骼肌感觉和运动神经元、增加氧气消耗等, 提高受试者肌肉股动脉和微血管峰值血流量, 但全身垂直振动训练后微血管血流量的提高幅度更大, 全身振动训练可用于改善骨骼肌微血管功能障碍。基于全身垂直振动训练对骨骼肌微血管反应性的干预效果, 该研究认为对于T2DM患者等微血管功能障碍的人群难以进行传统抗阻运动, 全身振动训练是改善微血管功能障碍的有效方法。

但也有研究结果显示, 单次全身垂直振动训练不能调节T2DM皮肤温度和提高微血管血流量。皮肤温度是评价机体微循环功能的重要指标, 与微血管血流灌注、组织损伤及代谢密切相关。利用激光多普勒血流测定仪测定皮肤温度和局部血流灌注量可用于评价皮肤微循环功能, 尤其是微血管舒张功能; 皮肤温度和局部血流灌注量并被国际外周动脉诊疗多学会专家共识列为相关疾病诊断和疗效判断的主要指标^[18]。皮肤温度下降是T2DM患者微循环功能的重要变化特点, 对诊断微循环功能有着重要作用。有研究指出, 单次间歇性全身垂直振动训练后(24赫兹, 4毫米, 45秒振动+30秒休息, 连续重复8次), 老年T2DM患者皮肤温度和微循环血流量均出

现下降^[24]。分析其原因,可能是在振动训练过程中由于血流重新分配导致温度低的肌肉外部皮肤温度和血流量出现暂时下降。但这种变化可能是暂时现象,当振动训练诱发的舒血管效应发挥作用后,外周皮肤温度和血流量会恢复甚至升高。基于相关学者之间的研究差异,建议后续研究进一步观察单次全身振动训练对T2DM患者皮肤温度和微血管血流量的影响,并在干预中、干预后不同时间点观察患者相关指标的变化。

2.2 全身垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的长期干预效应

长期全身垂直振动训练能使T2DM患者微血管功能产生适应性变化。经皮氧分压(transcutaneous oxygen pressure, TcPO₂)是氧气透过毛细血管弥散出来的氧气含量,能直接反映局部组织细胞的血流灌注与供氧状态的变化,是评估T2DM微血管血流营养状态的重要指标,同时该指标对预测T2DM足溃疡发生风险和判断足溃疡程度有重要参考价值^[25]。研究指出,中老年T2DM患者足背TcPO₂显著下降,且年龄越大下降越明显,测量TcPO₂能早期发现亚临床状态足部组织灌注不足^[26-27]。对于早期糖尿病足部溃疡患者,微血管病已出现病变,导致血流灌注障碍,使TcPO₂降低。因此TcPO₂能够检出患者足部微血管出现的早期病变,可作为早期发现糖尿病足风险的指标。RODRÍGUEZ等^[28]研究指出,12周全身垂直振动训练(30赫兹,3次/周)能使T2DM患者足部TcPO₂升高7毫米汞柱,足背TcPO₂与T2DM患者足溃疡治疗后的预后有关。当糖尿病足病变周围测量的TcPO₂<20毫米汞柱,预示着患者后期预后不良,足溃疡几乎无愈合可能^[29]。因此,提高T2DM患者足部TcPO₂对预防或管理糖尿病足并发症具有重要意义。全身振动训练对T2DM患者足部TcPO₂的干预效应,有利于足溃疡伤口的愈合。

但RODRÍGUEZ等^[30]的后续一项研究指出,12周全身垂直振动训练(30赫兹,3次/周)仅使T2DM患者足部TcPO₂升高3毫米汞柱。不同的研究结果可能与患者干预前足部TcPO₂的水平有关,当患者足部TcPO₂相对较高时,振动训练对TcPO₂的提高幅度有限。提示,在评价振动训练对T2DM患者TcPO₂时应结合患者干预前的基础值,以科学判断干预治疗效果。此外,对于具有足溃疡并发症的T2DM患者,建议在TcPO₂的基础上进一步通过肌氧饱和度(muscle

oxygen saturation, SmO₂)监测患者足部血管的氧合状态。SmO₂是评价骨骼肌细胞氧合状态的常用指标,能反映出肌红蛋白(myoglobin, Mb)的氧合能力。Mb是肌细胞储存和分配氧的蛋白质,其氧合情况取决于微血管向肌肉细胞输送氧的能力,因此SmO₂较TcPO₂能进一步评价细胞的氧合状态,对判断足部肌肉的供氧能力有着重要作用^[31]。有研究指出,T2DM患者股直肌、腓肠肌内侧SmO₂水平均显著降低,下肢运动耐受能力明显下降^[32]。但目前尚未见有关振动训练对T2DM患者下肢和足部SmO₂的干预研究,因此该研究是未来相关研究重要的关注点。

长期全身垂直振动训练还能通过改善T2DM患者微血管阻力降低血压。MANIMMANAKORN等^[33]研究发现,12周全身间歇性垂直振动训练(30~40赫兹,2~4毫米,3次/周)能降低T2DM患者静息舒张压和峰值收缩压^[33]。静息状态下,血管外周阻力是影响舒张压的关键因素,收缩压主要由心输出量决定。由此可知,振动训练降低患者的静息舒张压的原因归于血管外周阻力的变化。微血管是形成血管外周阻力的主要场所,微血管舒张障碍导致血管外周阻力增大会诱发高血压的产生,因此微血管功能障碍是诱导高血压发生的重要因素。振动训练能提高骨骼肌微血管的舒张能力,降低外周阻力,进而改善患者血压。该研究提示,当T2DM患者合并高血压疾病时,全身振动训练能通过改善患者微血管功能障碍降低血压。但该研究指出全身垂直振动训练对T2DM患者血糖和胰岛素敏感性的调控作用不明显^[33]。正常情况下,全身振动训练能通过改善β细胞功能和胰岛素抵抗或增强肌肉葡萄糖摄取的反应性达到调控血糖的作用,但由于该研究中受试者病情较为严重,因此全身振动训练未能显示显著的干预效益。提示,当患者病情较为严重时,应通过提高振动训练的干预剂量(如振动频率)来获得更加显著的干预效果。

全身垂直振动训练还能在抗阻运动的基础上进一步增强T2DM患者微血管功能。抗阻力量训练是改善T2DM患者微血管功能的有效方式,并被用于患者微血管功能的干预治疗。有研究指出,12周抗阻力量训练能显著提高T2DM患者下肢微血管血流量,促进患者微血管功能恢复;在抗阻力量的基础上联合全身垂直振动训练(16~26赫兹,2~5毫米,3次/周)训练能产生更加显著的效果,说明全身垂直振动训练在力量训练的基础上对T2DM患者血管功能产生的额外的

效益, 两者的干预效果具有叠加效应^[34]。基于上述研究结果, 在身体条件允许的条件下, 建议将抗阻力量训练和全身垂直振动训练联合使用, 以获得更有效的干预效果。此外, 作为一种新型抗阻运动方式, 低强度血流限制抗阻运动不仅具有运动强度小、安全性高等特点, 且能对微血管产生针对性和特异性的干预效果。如果将低强度血流限制抗阻与振动训练相结合, 可能会产生更加显著的效果。因此, 后续相关研究可在传统抗阻运动的基础上探讨低强度血流限制抗阻联合垂直振动训练对T2DM患者微血管功能的干预效果。

基于上述研究结果, 认为持续12周、12~40赫兹、2~6毫米、单次时间5分钟及以上的全身垂直振动训练能显著提高T2DM患者微血管血流量, 改善微血管氧合状态, 增强微血管功能。相比于传统的有氧和抗阻训练来说, 全身垂直振动训练具有对患者运动系统的要求较小、所要花费的时间较少、频率和振幅可调节等优点。另外, 在抗阻运动基础上复合全身振动训练能产生更加显著的干预效果, 两者的干预效果具有叠加效应。但目前有关全身振动训练对T2DM患者微血管功能的干预研究也存在局限性, 主要为干预周期较为单一。虽然上述研究指出, 全身振动训练能显著改善T2DM患者微血管功能, 但干预时间均为12周。当干预时间小于12周是否仍具有显著的干预效应尚不明确, 同时当干预时间大于12周是否能对患者带来更佳的干预效果也缺乏研究证据。在局部垂直振动训练干预研究中, 虽然有研究指出14天的干预能显著改善糖尿病大鼠微血管功能^[12], 但全身垂直振动训练能否产生类似的干预效果尚缺乏证据支撑。随着病情的发展, T2DM会使患者全身微血管出现不同程度的病变, 因此局部振动训练不能发挥全面的干预效果。相比于局部垂直振动训练, 全身垂直振动训练对T2DM患者能产生更加全面的干预效应, 对提高患者身体微血管的整体功能有着重要作用。基于这一问题, 建议对于全身或多处微血管已出现病变的患者采取全身垂直振动训练干预, 并深入探讨干预周期与干预效果之间的剂量-效应关系。

综上, 对于体弱、无法长时间进行体育活动的T2DM患者而言, 振动训练是较好的运动替代方式。在干预治疗的开始阶段, 建议体弱患者以低频(20~30赫兹)、低振幅(2毫米)模式为主, 干预时间介

于3~5分钟, 或采取间歇性干预模式, 使总干预时间达到5分钟, 避免高强度和长时间干预对患者的副作用。对于无足溃疡并发症的患者, 建议采取全身垂直振动训练方式改善全身微血管功能。对于有足溃疡并发症的患者, 建议在全身垂直振动训练的基础上对下肢或足部进行单独的振动干预, 使足部获得特异性和针对性的干预效果。随着干预治疗的推进, 患者可适当提高干预频率(不超过50赫兹)、振幅(不超过6毫米)以及延长干预时间, 以获得持续性效果。此外, 当身体机能提高后, 患者可以在振动训练期间进行小强度的抗阻力量运动, 以获得更佳的干预效果。

3 垂直振动训练改善T2DM患者微血管功能的潜在机制

3.1 调控血管内皮细胞生成内源性NO

NO是一种气体血管扩张剂, 能引导血管舒张反应, 同时NO还能扩散到邻近的血管平滑肌细胞诱导血管扩张^[17]。对于振动训练改善T2DM患者微血管的机制, 调控患者体内NO的产生是最主要的机制。SYABARIYAH等^[21]研究发现, 下肢垂直振动训练干预后糖尿病神经病变足溃疡NO水平显著提高。MALONEY等^[16]得出相似结论, 前臂局部垂直振动训练能显著提高T2DM患者和健康老年人NO水平, 但T2DM患者提高幅度显著小于健康受试者, 表明与正常受试者相比, T2DM患者NO对外部振动的反应能力下降。由于T2DM患者微血管已出现内皮细胞损伤等功能障碍, 虽然振动训练能通过剪切应力刺激内皮细胞释放NO等血管因子, 但由于内皮细胞损伤导致血管因子释放能力下降。

对于NO的生成来源, 有研究进一步指出, 振动训练主要促进内源性NO生成与表达。HABA等^[12]研究发现, 垂直振动训练能促进糖尿病大鼠内源性一氧化氮合酶(endothelium-derived nitric oxide synthase, eNOS)表达, 促使内皮细胞产生内源性NO, 从而改善微血管内皮依赖性舒张功能诱导血管舒张。此外, LIAO等^[35]也发现垂直振动训练能提高糖尿病患者eNOS活性, 促进血管扩张, 提高局部血流量。但JOHNSON等^[22]得出不一致结论。该研究指出, 虽然全身垂直振动运动能提高T2DM患者微血管血流量, 但受试者全血NO浓度无显著变化。其原因可能与血液采集位置有关。由于糖尿病患者足部伤口

的固有问题,用于测量NO血液样本是从肘前窝提取的,而微血管血流量的测试位置在足背。此外,受试者处于蹲姿进行振动,剪切应力诱导的NO生成未发生在手臂中,而是由脚部剪切应力引起的NO局部效应。提示,对T2DM实施全身振动训练干预时,身体姿势可能是影响干预效果的重要因素,建议患者站在振动平台时手部也放于振动平台,进而使上肢等部分也获得显著的振动刺激。振动训练主要通过改变血管内皮剪切应力、抑制氧化应激反应及提高胰岛素敏感性等途径调控NO的生成。

剪切应力是血流施加于血管内皮细胞的机械刺激,对调节血管的舒张功能和血流量有重要作用。振动训练会加快血流速度,增大血流与血管内皮细胞之间的剪切应力,通过PI3K-Akt与MEK-ERK1/2两种信号转导通路促使NO产生,同时抑制ET-1的释放,NO扩散至血管平滑肌细胞,引发血管平滑肌舒张,增强微血管舒张功能。但需要指出的是,血流剪切应力的大小和模式与振动训练的强度有关。当振动强度适宜时,主要通过顺性剪切应力促使内皮细胞释放NO,且这种效应与振动强度(生理范围之内)具有“剂量效应”关系。但振动强度过大,会增大扰动性或振荡性剪切应力的比例,使血管细胞产生损伤,降低内皮细胞释放NO的能力,并促进ET-1等缩血管因子的释放^[36-37]。此外。相比于局部垂直振动训练,全身垂直振动训练能对全身的微血管产生剪切应力刺激,促使全身微血管释放NO等血管因子,因此全身振动训练能产生更高剂量的NO。

抑制T2DM患者氧化应激反应也能促进NO的生成。长期的高血糖状态使T2DM患者糖基化终末产物水平升高,该产物与其受体结合能促进胰岛B细胞中活性氧的生成,进而引起氧化应激反应。氧化应激及诱导的炎症反应会损伤T2DM患者微血管内皮细胞,抑制内皮细胞释放NO^[38]。同时,自由基还会干扰内皮细胞NO信号转导、介导NO合酶解耦联,使内皮细胞介导的血管舒张功能紊乱^[39]。此外,自由基还会与NO结合,促使NO降解并降低NO生物利用度,进一步加重T2DM患者微血管内皮细胞功能障碍。T2DM患者普遍存在NO生物利用度降低,导致血管内皮细胞受损。研究指出,垂直振动训练能抑制T2DM患者氧化应激,能对微血管内皮细胞产生保护作用,为内皮细胞释放NO及提高NO的生物利用度提供结构基础^[40]。

胰岛素敏感性对NO的生成也有着重要作用。正常生理情况下,胰岛素在微循环系统中起着舒张血管的作用,通过诱导微血管扩张和毛细血管动员作用,来增加微血管的开放数量,从而促进胰岛素和葡萄糖向骨骼肌的递送,且这种作用占胰岛素刺激的肌肉葡萄糖摄取的40%。胰岛素抵抗能引起微血管损伤。胰岛素能刺激血管内皮细胞释放NO,增强血管内皮依赖式舒张功能,胰岛素抵抗会抑制eNOS活性,减少内源性NO的生成,同时增强ET-1的血管收缩效应,诱发微循环功能障碍,影响血浆胰岛素和葡萄糖向骨骼肌细胞的转运能力,导致骨骼肌对葡萄糖的摄取功能障碍。因此,改善T2DM患者对胰岛素敏感性能促进NO的生成。垂直振动训练能显著改善T2DM大鼠的胰岛素敏感性,刺激血管内皮细胞释放NO,同时抑制ET-1的缩血管收缩效应,进而增强血管内皮依赖式舒张功能^[41]。

3.2 促进血管生成因子VEGF的表达

血管生长因子主要通过微血管生成影响微血管功能。血管形成是各种诱导和抑制血管形成分子间的局部平衡失调所致的,增加诱导血管形成因子的活性或减少抑制因子的产生,均能上调局部血管的生成能力。血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)是促进血管生成最有效的阳性因子,能促进微血管内皮细胞的分裂,增加血管生成,并增强微血管通透性^[42]。研究发现,垂直振动训练能促进糖尿病大鼠VEGF表达,促进新毛细血管的形成,促进创面愈合^[12]。YU等^[43]得出相似结论,低强度高频垂直振动训练能降低糖尿病大鼠的血糖水平,提高大鼠伤口处的血液灌注量、血小板内皮细胞黏附分子-1、VEGF和增殖细胞核抗原的表达水平,通过促进血管生成和细胞增殖来加速伤口愈合^[43]。作者团队的相关研究也发现,运动通过调控VEGF、NO等血管因子水平改善T2DM患者足背微循环功能^[4]。NO对VEGF的产生有调节作用,其机制涉及cGMP/PKG、MAPK、PI3K/Akt等信号通路。除VEGF外,碱性成纤维细胞生长因子(basic fibroblast growth factor, bFGF)等也参与了微血管新生。bFGF是一种参与肿瘤微血管新生的强效活性因子,并与VEGF有互相协调的作用。但目前尚未见振动训练对T2DM患者bFGF的干预研究,振动训练能否通过促进bFGF的表达改善T2DM患者微血管功能有待进一步明确。

综上,垂直振动训练主要通过调控内皮细胞生成内源性NO以及促进VEGF的表达等改善T2DM患者微血管功能,其中增大血管内皮细胞剪切应力、抑制氧化应激及改善胰岛素敏感性等是垂直振动训练促进NO的产生的重要路径。但目前相关研究的证据多为间接性证据链条,即未同时观察患者微血管功能指标和相关机制性指标的变化,所以上述机制仅可能是振动训练改善T2DM患者微血管功能的潜在生物机制,其中准确的生物学机制还需进一步研究明确。因此,建议后续研究同时观察干预前后患者微血管功能指标和相关机制性指标的变化,明确两者的变化关系。

4 结论

垂直振动训练能改善2型糖尿病患者的微血管功能。(1) 15~50赫兹、2~4毫米、持续5~15分钟单次局部垂直振动训练和全身垂直振动训练均能对T2DM患者微血管功能产生有益的干预效果。12~40赫兹、2~6毫米、持续时间3~5分钟及以上的全身垂直振动训练和12周的长期干预也能改善T2DM患者微血管功能。为了使干预效果有效累积,建议T2DM患者采取长期干预治疗模式。(2) 垂直振动训练主要通过调控内皮细胞生成内源性NO以及促进VEGF的表达等改善T2DM患者微血管功能,其中增大血管内皮细胞剪切应力、抑制氧化应激及改善胰岛素敏感性等是垂直振动训练促进内源性NO的产生的重要路径。(3) 建议后续研究重点围绕振动频率、振动部位、干预周期、患者微血管功能障碍程度等因素深入探究振动训练的干预效果,并多角度探讨相关的作用机制,为振动训练方案的制定提供更加科学、精准的证据。

参考文献 (References)

- [1] 张磊, 乔岗, 韩丽, 等. 2型糖尿病患者炎症因子与糖脂代谢指标的相关性及其预测微血管病变的价值[J]. 实用临床医药杂志(ZHANG L, QIAO G, HAN L, et al. Correlation between inflammatory factors and indicators of glucose and lipid metabolism in patients with type 2 diabetes mellitus and the value of predicting microvascular complications [J]. Journal of Clinical Medicine in Practice), 2023, 27(13): 114-8.
- [2] 杨若梅, 刘玉双, 江南, 等. 系统免疫炎症指数与2型糖尿病下肢血管病变的相关性研究[J]. 陆军军医大学学报(YANG R M, LIU Y S, JIANG N, et al. Study on the correlation between the systemic immune-inflammation index and lower extremity vascular lesions in type 2 diabetes mellitus [J]. Acta Academiae Medicinae Militaris Tertiae), 2024, 46(18): 2138-44.
- [3] 崔健. 隔日禁食改善2型糖尿病小鼠血管内皮功能的机制研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2023.
- [4] 彭永, 朱欢, 刘尧峰, 等. 24周太极拳结合弹力带抗阻运动对2型糖尿病患者足背微循环功能的影响[J]. 首都体育学院学报(PENG Y, ZHU H, LIU X F, et al. The Influence of 24-week taijiquan combined with elastic band resistance exercise on the dorsum pedis microcirculation function of patients with type 2 diabetes mellitus [J]. Journal of Capital University of Physical Education and Sports), 2023, 35(1): 77-85.
- [5] GAFFNEY K, LUCERO A, MACARTNEY-COXSON D, et al. Effects of whey protein on skeletal muscle microvascular and mitochondrial plasticity following 10 weeks of exercise training in men with type 2 diabetes [J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2021, 46(8): 915-24.
- [6] LINO RODRIGUES K, VIEIRA DIAS DA SILVA V, NUNES GOULART DA SILVA PEREIRA E, et al. Aerobic exercise training improves microvascular function and oxidative stress parameters in diet-induced type 2 diabetic mice [J]. Diabetes Metab Syndr Obes, 2022, 15: 2991-3005.
- [7] 姚毅. 12周五禽戏运动对2型糖尿病患者微循环功能的影响及可能机制研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2023.
- [8] 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(FENG L L, LI B W, TIAN Z J. Research progress in the prevention and treatment of cardiovascular and brain diseases by vibration training [J]. Life Science), 2021, 33(4): 502-11.
- [9] 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(QIAO Z J, CHAI N B, ZHENG L Y, et al. Meta-analysis of the effect of whole-body vibration training on improving bone mineral density in postmenopausal women [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research), 2025, 29(24): 5195-202.
- [10] 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(TAN J W, HAN J, SHEN Y Q, et al. Progress on the influence and mechanism of whole-body horizontal vibration training on the cardiovascular system [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice), 2019, 25(4): 430-3.
- [11] 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]. Front Bioeng Biotechnol, 2019, 7: 310-7.
- [12] HABA D, QIN Q, TAKIZAWA C, et al. Local low-frequency vibration accelerates healing of full-thickness wounds in a hyperglycemic rat model [J]. J Diabetes Investig, 2023, 14(12): 1356-67.
- [13] SACKIRIYAS K S B, LOHMAN E B, DAHER N S, et al. Effect of passive vibration on skin blood flow in persons with good glycemic control and poor glycemic control type 2 diabetes [J]. National Editorial Advisory Board, 2014, 8(4): 288-94.
- [14] MARTINS-MENDES D, MONTEIRO-SOARES M, BOYKO E J, et al. The independent contribution of diabetic foot ulcer on lower extremity amputation and mortality risk [J]. J Diabetes Complicat, 2014, 28: 632-8.
- [15] REN W, ZHANG M, LIU H, et al. Effect of vibration on alleviating foot pressure-induced ischemia under occlusive compression [J]. J Health Eng, 2021, 25: 6208499-507.

- [16] MALONEY-HINDS C, PETROFSKY J S, ZIMMERMAN G, et al. The role of nitric oxide in skin blood flow increases due to vibration in healthy adults and adults with type 2 diabetes [J]. *Diabetes Technol Ther*, 2009, 11(1): 39-43.
- [17] 彭永, 胡江平, 朱欢. 低负荷血流限制和高强度抗阻运动对男性运动青年大腿微循环功能的影响[J]. *中国组织工程研究*(PENG Y, HU J P, ZHU H. Influence of low-load blood flow restriction and high-intensity resistance exercise on thigh microcirculation function of young male athletes [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*), 2025, 29(2): 393-401.
- [18] 陈友强, 程瑞豪, 贺纓, 等. 基于皮肤温度信号的糖尿病患者血管舒张功能评价[J]. *医用生物力学*(CHEN Y Q, CHENG R H, HE Y, et al. Evaluation of vascular dilatation function of diabetic patients based on skin temperature signals [J]. *Journal of Medical Biomechanics*), 2023, 38(2): 368-74.
- [19] FUCHS D, DUPON P P, SCHAAP L A, et al. The association between diabetes and dermal microvascular dysfunction non-invasively assessed by laser Doppler with local thermal hyperemia: a systematic review with meta-analysis [J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2017, 16(1): 11-22.
- [20] ZHU X, WU F L, ZHU T, et al. Effects of preconditioning local vibrations on subsequent plantar skin blood flow response to walkings [J]. *Int J Low Extrem Wounds*, 2021, 20(2): 143-9.
- [21] SYABARIYAH S, NURACHMAH E, WIDJOJO B D, et al. The effect of vibration on the acceleration of wound healing of diabetic neuropathic foot ulcer: a prospective experimental study on human patients [J]. *Healthcare*, 2023, 11(2): 191.
- [22] JOHNSON P K, FELAND J B, JOHNSON A W, et al. Effect of whole body vibration on skin blood flow and nitric oxide production [J]. *J Diabetes Sci Technol*, 2014, 8(4): 889-94.
- [23] BETIK A C, PARKER L, KAUR G, et al. Whole-body vibration stimulates microvascular blood flow in skeletal muscle [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2021, 53(2): 375-83.
- [24] ALVES K F P, FERREIRA A P L, PARENTE L C O, et al. Immediate effect of whole-body vibration on skin temperature and lower-limb blood flow in older adults with type 2 diabetes: pilot study [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 690-700.
- [25] 彭茂, 车亚梅, 鲁严. 经皮氧分压监测在老年糖尿病足病人诊治中的应用[J]. *实用老年医学*(PENG M, CHE Y M, LU Y, et al. Application of transcutaneous oxygen partial pressure monitoring in the diagnosis and treatment of elderly patients with diabetic foot [J]. *Practical Geriatrics*), 2024, 38(2): 181-4.
- [26] 厚荣荣, 尹涛, 孔颖, 等. 利拉鲁肽改善2型糖尿病合并周围血管病变患者经皮氧分压的效果分析[J]. *中国糖尿病杂志*(HOU R R, YIN T, KONG Y, et al. Analysis of the effect of liraglutide on transcutaneous oxygen partial pressure in patients with type 2 diabetes mellitus complicated by peripheral vascular lesions [J]. *Chinese Journal of Diabetes Mellitus*), 2022, 30(10): 762-5.
- [27] DINESH R, VINOD K V, RAMKUMAR G. Comparison of resting/postexercise ankle-brachial index and transcutaneous partial pressure of oxygen for noninvasive diagnosis of peripheral artery disease in type 2 diabetes mellitus [J]. *Med J Armed Forces India*, 2023, 79(2): 157-64.
- [28] 王春梅, 贾建国, 庞书勤, 等. 糖尿病患者足背经皮氧分压结果的分析[J]. *中国糖尿病杂志*(WANG C M, JIA J G, PANG S Q, et al. Analysis of transcutaneous oxygen partial pressure in the dorsum of the foot of diabetic patients [J]. *Chinese Journal of Diabetes Mellitus*), 2020, 28(11): 814-7.
- [29] RODRÍGUEZ REYES G, NÚÑEZ CARRERA L, ALESSI MONTERO A, et al. Effect of mechanical vibration on transcutaneous oxygen levels in the feet of type 2 diabetes mellitus patients [J]. *Med Clin*, 2017, 148(1): 16-9.
- [30] RODRÍGUEZ-REYES G, GARCÍA-ULLOA A C, HERNÁNDEZ-JIMÉNEZ S, et al. Effect of whole-body vibration training on transcutaneous oxygen levels of the foot in patients with type 2 diabetes: a randomized controlled trial [J]. *J Biomech*, 2022, doi: 10.1016/j.jbiomech.2021.110871.
- [31] 肖哲, 朱欢, 胡江平, 等. 10周有氧运动和有氧结合抗阻运动对肥胖大学生微循环功能的影响及机制研究[J]. *中国全科医学*(XIAO Z, ZHU H, HU J P, et al. Mechanism of action of 10-week aerobic exercise versus combined aerobic and resistance exercise in improving the microcirculation in obese college students [J]. *China Sport Science and Technology*), 2022, 25(19): 2349-55, 62.
- [32] LAI Y C, CHAO Y H, KUO C Y, et al. Microcirculatory responses to muscle and tendon exercises in individuals with and without type 2 diabetes mellitus and the association between microcirculatory and exercise performance [J]. *Metab Syndr Relat Disord*, 2021, 19(6): 325-31.
- [33] MANIMMANAKORN N, MANIMMANAKORN A, PHUTHARAK W, et al. Effects of whole body vibration on glycemic indices and peripheral blood flow in type II diabetic patients [J]. *Malays J Med Sci*, 2017, 24(4): 55-63.
- [34] RODRIGUES F T M, FERREIRA A P L, ALVES K F P, et al. Whole-body vibration associated with strength training on the lower-limb blood flow and mobility in older adults with type 2 diabetes: a study protocol for a randomized controlled trial [J]. *Diagnostics*, 2022, 12(7): 1550-64.
- [35] LIAO F, JAN Y K. Nonlinear dynamics of skin blood flow response to mechanical and thermal stresses in the plantar foot of diabetics with peripheral neuropathy [J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2017, 66(3): 197-210.
- [36] 时文霞, 谢军, 何玉凤, 等. 血管内皮功能障碍运动干预的血流剪切力作用机制研究进展[J]. *中国体育科技*(SHI W X, XIE J, HE Y F, et al. Research progress on the mechanism of blood flow shear force in the exercise intervention of vascular endothelial dysfunction [J]. *China Sport Science and Technology*), 2024, 60(3): 51-64.
- [37] 时文霞, 谢军, 何玉凤, 等. 高强度间歇训练和中等强度持续训练对肥胖男大学生血管内皮功能和血流剪切力的影响[J]. *中国体育科技*(SHI W X, XIE J, HE Y F, et al. Influence of high-intensity interval training and moderate-intensity continuous training on vascular endothelial function and blood flow shear force of obese male college students [J]. *China Sport Science and Technology*), 2024, 60(7): 3-11, 78.
- [38] 王海燕, 张永红. 糖尿病微血管病变发病机制研究进展[J]. *河北医科大学学报*(WANG H Y, ZHANG Y H. Research progress on the pathogenesis of diabetic microangiopathy [J]. *Journal of Hebei Medical University*), 2024, 45(5): 585-9.
- [39] 王玲, 蒲里津. 内皮细胞氧化应激对动脉粥样硬化发病过程的作用机制[J]. *微循环学杂志*(WANG L, PU L J. The mechanism of endothelial cell oxidative stress in the pathogenesis of atherosclerosis [J]. *Chinese Journal of Microcirculation*), 2022, 32(3): 66-70, 78.

- [40] 刘玉琳, 李国泰. 高压氧、振动训练与虾青素联合干预糖尿病骨质疏松模型大鼠骨密度、糖代谢及氧化应激的变化[J]. 中国组织工程研究(LIU Y L, LI G T. Changes in bone mineral density, glucose metabolism and oxidative stress in rats with diabetic osteoporosis model under combined intervention of hyperbaric oxygen, vibration training and astaxanthin [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research), 2021, 25(20): 3117-24.
- [41] 程加秋, 张庭然. 低氧环境振动训练条件下2型糖尿病骨质疏松大鼠骨代谢及胰岛素敏感性[J]. 中国组织工程研究(CHEN J Q, ZHAN T R. Bone metabolism and insulin sensitivity of type 2 diabetic osteoporotic rats under vibration training in a hypoxic environment [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research), 2018, 22(12): 1852-8.
- [42] LI J, LIU G, ZHANG D, et al. Physiological mechanisms driving microcirculatory enhancement: the impact of physical activity [J]. Rev Cardiovasc Med, 2025, 26(2): 25302-17.
- [43] YU, OI LING. Interventional study of low-magnitude high frequency vibration on the healing of foot wound in streptozotocin-induced diabetic rat model [M]. Hong Kong: the Chinese University of Hong Kong, 2017.