DOI: 10.13376/j.cbls/2021053
文章编号：1004-0374(2021)04-0502-10

振动训练与心血管及脑部疾病防治研究进展

冯丽丽，李博文，田振军*
(陕西师范大学体育学院暨运动生物学研究所，运动与心血管健康研究室，西安710119)

摘　要：心血管疾病 (cardiovascular disease, CVD) 及脑部疾病已成为全球范围内主要疾病致死原因和重大公共卫生问题，振动训练可作为心血管及脑部疾病的有效干预手段，其主要通过调节人体血压与心率、血管阻力与血流量、神经结构与功能，改善代谢综合征、心血管及脑部疾病患者心功能和认知及运动功能，延缓疾病发展进程；其机制涉及到增强心率变异性 (heart rate variability, HRV) 和自主神经功能，抑制机体过度炎症和氧化应激，提高机体细胞因子水平等方面。该文通过梳理相关文献，归纳总结振动训练对心血管及脑部疾病的防治效应及相关机制，为振动训练在心血管及脑部疾病临床预防和康复的应用提供依据和思路。

关键词：振动训练；心血管及脑部疾病；心率变异性；细胞因子；氧化应激
中图分类号：G804.2；R541　　**文献标志码：**A

Research progress in the prevention and treatment of cardiovascular and brain diseases by vibration training

FENG Li-Li, LI Bo-Wen, TIAN Zhen-Jun*
(Department of Sports and Cardiovascular Health, Institute of Sports Biology, College of Physical Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Cardiovascular and brain diseases have become a major cause of death from diseases and a major public health problem worldwide. Vibration training can be used as an effective intervention for the cardiovascular and brain diseases, mainly by regulating the blood pressure and heart rate, vascular resistance and blood flow, and nerve structure and function, improving the heart function, cognitive and motor functions of patients with metabolic syndrome and cardiovascular and brain diseases, and alleviating the disease development process of patients. Its mechanism involves enhancing the heart rate variability and autonomic nervous functions, inhibiting excessive inflammation and oxidative stress, and improving the level of cytokines in the body. The effects of vibration training on the cardiovascular and brain diseases and the related mechanisms were summarized in this paper to provide basis and ideas for the application of vibration training.

Key words: vibration training; cardiovascular and brain diseases; heart rate variability; cytokines; oxidative stress

心血管疾病 (cardiovascular disease, CVD) 及脑部疾病已成为全球范围内主要疾病致死原因和重大公共卫生问题，其发病机制较为复杂，尚未完全明确 [1]。其中，心血管疾病包括动脉粥样硬化、心肌梗死 (myocardial infarction, MI)、高血压、心肌肥厚和心力衰竭 (heart failure, HF) 等，致病因素涉及肥胖、高血压、高血脂、糖尿病、衰老及不良生活方式和精神状态 [2-3]。脑部疾病包括精神疾病和神经退行性疾病，如抑郁症、阿尔茨海默症 (Alzheimer's disease, AD)、帕金森病 (Parkinson's disease, PD)、亨廷顿病 (Huntington's disease, HD)、脑卒中、创伤性脑损伤及脑肿瘤等 [4-05]，其致病因素包括神经元丢失、星形胶质细胞发生病理性改变或丢失、血脑屏障 (blood-brain barrier, BBB) 通透性降低、脑供血

收稿日期：2020-10-12；**修回日期：**2020-12-20
基金项目：国家自然科学基金项目(31671240)
***通信作者：**E-mail: tianzj611@snnu.edu.cn

血管病变及过度氧化应激与炎症反应等[6]。研究表明，心脏和大脑之间存在交互作用，即心脏损伤可对脑产生不良影响，脑疾病可使心脏损伤进一步发展[5]。适当运动可有效降低诱发心血管及脑部疾病的风险因素，预防及减缓该疾病的发生发展，甚至逆转疾病发展状态[7-10]。因此，针对心血管及脑部疾病的防控除重视临床救治外，积极预防和运动康复具有重要意义。特别是针对患有骨关节疾病不宜进行抗阻运动和有氧运动的患者，筛选合适的运动方式具有现实意义。振动训练能够产生显著的训练效应，本文通过梳理相关文献，归纳总结了振动训练对心血管及脑部疾病的防治效应及相关机制，以期为振动训练在心血管及脑部疾病临床预防和康复的应用提供依据和思路。

1 振动训练概述及分类

振动训练作为被动锻炼方式由外源装置提供力学刺激，包括局部肌肉振动和全身振动，是一种低成本、安全和有效的锻炼方式，适合老年、部分疾病患者 (如认知障碍、骨关节炎患者) 等日常行动不便的人群[11-13]。局部肌肉振动 (local muscle vibration, LMV) 是在目标肌肉上施加局部机械刺激，其影响训练效应的主要参数是振幅和频率[13]。全身振动训练 (whole body vibration, WBV) 是全身承受振动的训练方式，频率、振幅、方向及加速度等参数均可对实际训练效应产生影响[14]。原先振动训练作为一种提高运动员运动成绩的训练手段，目前在多领域得到广泛应用，包括提高骨密度、肌肉力量、心肺功能、外周血流量，降低血压和改善平衡能力与认知功能[15-16]。过高频率或强度的振动可导致感觉神经性疾病的发生发展，当频率接近或达到机体组织的共振频率时，可使感觉神经性疾病进一步恶化，如长期接触手持式振动工具可导致周围毛细血管损伤和感觉神经系统功能紊乱，降低手部触觉敏感度和握力[17]。因此，在进行振动训练时，选择适宜的频率和强度在预防和治疗心血管及脑部疾病方面意义重大，建立更安全有效、明确完善的振动治疗方案是研究的重点。目前，在临床应用上仍缺乏防治不同类型和病程心血管及脑部疾病的适宜振动训练方案，随着振动训练防治心血管及脑部疾病机制的不断完善，期待在适合患者治疗与康复的振动强度、频率及其临床效应等系统研究方面取得突破。

2 振动训练对心脑血管的生物学效应

2.1 调节心率、血压和血流量

据中国心血管疾病报告 (2019) 显示，心血管疾病死亡人数呈现逐年增加的趋势。伴随我国人口老龄化加快，衰老已成为心血管疾病的重要致病因素之一，其导致动脉变厚且顺应性降低，脉搏波速度、收缩压和左心室后负荷增加；心脏短轴缩短率以及射血分数也随之下降，继而引发一系列心血管疾病[18-20]。振动训练可引起人和动物各系统机能变化，尤其是心血管系统。心血管疾病患者在振动台上分别保持 5 种姿势：下蹲、宽站姿、脚尖站立、下蹲 + 腰带束缚、前弓步，接受频率为 30 Hz、振幅为 3 mm 的全身垂直振动训练后，反应性充血 - 外周张力测试 (reactive hyperemia peripheral arterial tonometry index，RH-PAT；反映血管内皮功能状态) 指数显著升高，全身血管阻力指数显著降低，外周血管血流量显著增加[21]；这说明振动训练可改善血管内皮功能，调节血流量。文献表明，适宜的全身振动训练可能是通过调节内皮细胞表面剪切应力，诱导内皮依赖性血管舒张，即剪切应力通过感受器刺激内皮细胞膜或降低血管表面黏附分子，释放 NO 调节内皮依赖性舒张功能，促使血管扩张，降低外周循环阻力，降低动脉血压，改善心血管循环功能[22]。65 至 70 岁老年人接受 10 min 的振动训练 (20 Hz，6 mm) 后，心率由 77 下降至 75[23]，推测长期适宜的振动训练可有效调节心率和血压。文献报道，持续 24 周的长期低频振动训练 (25 Hz，4 mm) 对老年人动脉血管弹性有一定的积极作用，可降低血液循环阻力和血压，减轻心脏负担；另外，合适的振动训练可上调血液中的血管内皮生长因子 (vascular endothelial growth factor, VEGF) 循环水平，促进血管生成，降低血压，改善心血管循环功能[24]。实验表明，代谢综合征 (metabolic syndrome, MetS) 患者和正常人在接受间歇振动 (50 Hz，2 mm) 训练中和训练后恢复期 1.5 min 内，皮肤血流量显著增加，且效果优于持续振动[25]。老年人分别经 15 Hz、20 Hz、25 Hz，振幅 4 mm 的全身振动训练后，皮肤血流量显著增加，且 25 Hz 的振动训练效果更显著；推测这种变化是因为振动训练激活机体神经信号、激素与介质相互作用，通过调节局部和中央血管功能，从而增加皮肤血流量[26]。

综上，振动训练可引发机体多种生物学效应，

频率和幅度是影响效应的关键因素，适宜振动训练对机体有利，不当振动刺激可对机体产生负面作用。安全有效的振动训练可调节血流量、加快血流速、降低血管阻力，改善血管内皮及心血管系统功能；此外，振动训练对心肺功能的要求较低，亦可减轻慢性疾病患者心肺系统负担，改善患者循环系统功能[27-28]，可用于心肺功能较弱的慢性病患者的康复训练。因此，振动训练在防治肺动脉高压、动脉粥样硬化及脑部疾病等方面发挥重要作用。据临床分析认为，10~30 Hz 的振动可对人体心血管系统产生一定的保护效应。因此，上述频率或可作为心血管疾病患者及其他慢性病患者进行振动训练的参数，但在实际应用中仍需根据患者疾病程度和身体耐受情况，进一步探索更适合患者的精确数值。

2.2 改善脑认知功能

文献报道，皮肤机械感受器 (如 Meissner 小体) 对 30 Hz 的振动刺激极敏感；振动训练可刺激皮肤机械感受器，激活脊髓丘脑通路和内侧后索神经通路，改善老年痴呆患者认知功能和运动能力[16]。临床试验发现，8 周全身振动训练 (20 Hz，每 2 周增加 5 Hz) 可刺激老年痴呆患者肌肉纺锤体和感觉器官，引发神经肌肉系统反应，增强脑电活跃度，改善认知功能，预防和延缓脑功能减退[29]。动物实验发现，持续 30 d 的全身振动训练 (40 Hz) 可减少雌性 SD 大鼠脑卒中后的脑区梗死体积，显著降低梗死区半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶 1 (cysteinyl aspartate specific proteinase-1, caspase-1)、白介素 1β (interleukin-1β, IL-1β) 水平，减轻脑损伤，改善认知功能和运动能力[30]。30 Hz 的振动训练 (5 d/wk) 可增强 C57BL/6J 雄性小鼠的平衡能力和认知功能[31]。临床试验发现，无认知障碍的正常人接受 5 周全身振动训练 (30 Hz，0.5~1 mm，0.9~1.8 g；4 min/d，4 d/wk) 后，Stroop 颜色单词测试成绩增加，认知能力和记忆力提高[31]。文献表明，全身振动训练可以提高日常生活不便人群的运动能力和认知功能；全身振动训练 (30 Hz，5 mm，5 min) 可缩短腰椎前凸女性听视觉复合选择反应时间，提高其快速预测能力，改善认知功能[32]。实验结果表明，全身振动训练比起离心运动 (利用离心机吊舱进行训练) 对小鼠血脑屏障产生的副作用更小，可保证血脑屏障的通透性；因此，振动训练是一种更为安全的康复手段[33]。一项对青年进行振动训练 (30 Hz，0.5 mm) 的研究表明，全身振动训练可增强青年的执行和认知功能[34]。正常人和多动症患者经过全身振动训练 (30 Hz，0.4 mm、0.6 mm、0.5 mm) 后，Stroop 实验结果具有显著差异，多动症患者认知功能的提高较正常受试者更显著[35]。Meta 分析结果表明，运动锻炼可以改善老年痴呆患者整体认知能力和情绪状况，且不同运动方案可带来不同程度的改善效应[36]。

在动物实验和临床应用中，振动训练频率多集中在 20~30 Hz，且被证明是一种行之有效的辅助治疗方案。因此认为，20~30 Hz 的振动训练对有认知障碍的慢性病患者及正常人群的认知功能及运动能力的改善效果较为安全有效，可能涉及可激活相关细胞信号通路、调节脑部血流量、改善脑血管供血功能等，提示振动训练可用于脑卒中预防和康复治疗。临床数据显示，进行振动训练时人体可接受的安全及有效范围是 10~50 Hz，且已有的训练方案振动频率主要集中在 20~30 Hz (表 1)，动物可接受的安全有效范围是 40 Hz 左右 (表 2)。因此，在临床应用全身振动训练改善认知功能时，不同疾病与病程应进行针对性分析，进一步研究和细化振动方案。

3 振动训练改善心脑血管功能的机制研究

3.1 调节心率变异性和自主神经功能

心率变异性 (heart rate variability, HRV) 是一种无创、实用的心脏自主神经功能检测指标，反映交感神经和副交感神经对心率的调节情况，低 HRV 已被证明是心血管健康受损的重要标志，而振动训练可作为改善心脏自主神经功能及心血管健康的有效干预手段[44]。研究发现，全身振动训练可通过增强迷走神经活性和降低交感神经活性对静息 HRV 产生积极影响，提高颈动脉压力感受器的反射敏感性，升高一氧化氮 (nitric oxide, NO) 和血管紧张素 II 水平，维持自主神经系统平衡[44]。文献表明，低频 (low frequency, LF) 和高频 (high frequency, HF) 分别反映交感神经和副交感神经的活动水平，全身振动训练 (20 Hz，6 mm) 可明显增加全部窦性心博 RR 间期标准差 (SDNN)、相邻 RR 间期差值均方根 (RMSSD)，降低 LF/HF 比值，显著升高 HRV，降低心血管疾病发病风险[23]。实验表明，全身振动训练 (3~20 Hz) 可增加受试者 HF 值，交感神经活动增强的同时使副交感神经活动水平也显著升高[45]，推测振动训练可通过增强迷走神经激活水平维持机体心功能。文献报道，长期振动训练可缓解大鼠高血压；临床数据显示，电锯作业工人的射血分数和左室舒张末内径增加、心率降低、心功能增强[46]。文献表明，44 Hz 的振动可对足底产生刺激，并作

表1　振动训练对心脑血管的保护效应(临床试验)

受试对象	振动方案	振动后效应	参考文献
青年	干预周期为1 d；共振动6次； 频率30 Hz，振幅0.5 mm，时间2 min/次； 间隔休息3 min	Stroop彩色词干扰测试成绩提高，具有改善认知功能的潜力	[34]
代谢综合征患者和正常成人	干预周期为1 d； 频率50 Hz，振幅2 mm； 方案1：持续振动5 min，无间歇； 方案2：振动10 s，间歇5 s，共7.5 min； 方案3：振动10 s，间歇10 s，共10 min 每个方案间隔休息30 min	患者：持续振动SBF无明显变化，间歇振动SBF分别增加42%、31% 健康：持续振动SBF无明显变化，间歇振动SBF分别增加129%、43%；恢复阶段1.5 min内SBF增加101%、170%、48%	[25]
心血管疾病患者	干预周期为1 d；共振动2次； 频率30 Hz，振幅3 mm，时间30 s/次 间隔休息2 min	RH-PAT指数升高(1.42~2.06)，全身血管阻力指数显著降低	[21]
纤维肌痛女患者和正常女性	干预周期为1 d； 频率40 Hz，振幅4 mm	血浆TBARS、MDA降低，CAT、SOD升高，抗氧化能力提高，氧化应激水平降低	[37]
ADHD患者和正常人	干预周期为1 d； 频率30 Hz，4次振幅分别为0.44 mm、0.44 mm、0.66 mm、0.50 mm，时间2 min/次	认知功能改善，运动能力提高	[35]
65岁以上的老年人	干预周期为1 d； 频率15 Hz、20 Hz、25 Hz，振幅4 mm， 加速度0.76 m/s^2、1.12 m/s^2、1.41 m/s^2； 一次只实行一种方案；两次实验间隔时间不低于24 h	15 Hz：SBF升高126%~150%； 20 Hz：SBF升高171%~206%； 25 Hz：SBF升高300%~322%	[26]
60~75岁老年人	干预周期为1 d； 频率20 Hz，振幅6 mm，时间10 min	HR降低，时域变量(SDNN、RMSSD、pNN50)增加，HRV升高，心血管疾病风险降低	[23]
血液病患者	干预周期为4 wk；3 d/wk； 频率18~25 Hz，振幅3.5~4 mm； 振动总时长20 min/d，振动时间30~60 s/次，间隔休息30~60 s	平衡练习效果提高，神经肌肉活动效应良好	[38]
无认知障碍老年人	干预周期为5 wk；4 d/wk； 频率30 Hz，振幅0.5~1 mm，加速度0.9~1.8 g，时间4 min	运动能力提高，认知功能增强	[31]
(85.3±6.8)岁的女性痴呆患者	干预周期为6 wk；4 d/wk； 频率30 Hz，振幅1~2 mm，时间4 min；	认知功能改善，体力活动水平和日常生活能力提高	[39]
化疗性周围神经病变肿瘤患者	干预周期为6 wk；2 d/wk； 频率18~35 Hz，振幅2~4 mm，时间30 s~1 min； 振动3次，间隔休息1 min	神经传导速度和运动功能改善，化疗性周围神经病变症状减轻，生活质量提高	[40]
65岁及以上痴呆患者	干预周期为6 wk；4 d/wk； 频率30 Hz，振幅1~2 mm，时间4 min；	认知功能改善，日常生活质量提高	[16]
60~65岁成年人	干预周期为24 wk；3次/wk； 频率25 Hz，振幅4 mm，30~45 s/组×4组 组间休息2 min	动脉血管弹性改善	[24]

ADHD：注意缺陷与多动障碍，又称多动症(attention deficit and hyperactivity disorder)；CAT：过氧化氢酶(catalase)；HRV：心率变异性(heart rate variability)；HR(bpm)：心率(heart rate)；MDA：丙二醛(malondialdehyde)；RH-PAT：反应性充血外周动脉张力指数(reactive hyperemia peripheral arterial tonometry index)；Stroop实验：斯特鲁普效应(测试受试者反应及执行能力)；SBF：皮肤血流量(skin blood flow)；SOD：超氧化物歧化酶(superoxide dismutase)；TBARS：硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances)。时域变量(SDNN、RMSSD、pNN50)：SDNN表示NN间期(全部窦性心博RR间期)的标准差，正常值为141.7±29.2；RMSSD表示相邻RR间期差值均方根，正常值为39.0±15.0；pNN50表示相邻NN之差>50 ms的个数占总窦性心博个数的百分比，正常值为16.7±12.3。

表2 振动训练对心脑血管的保护效应(动物实验)

受试对象	振动参数	振动后效应	参考文献
Wistar雄性大鼠IR模型	干预周期为别为1 wk和3 wk；6 d/wk；频率10~50 Hz，振幅1~10 mm；总时长30 min/d，10 min/次，间隔休息1~2 min；训练时间段为8:30-10:00	安静组梗死面积(47±5)%，1 wk和3 wk梗死范围较小，分别为(39±5)%和(37±5)%；安静组、1 wk和3 wk的VT发生率分别为100%、100%和88%，VF发生率分别为75%、63%和50%	[41]
SD雄性大鼠MI模型	干预周期为4 wk；5 d/wk 频率25 Hz，振幅2 mm，2次/d，38 min/d，	FSTL1表达增加，促进血管新生，减轻心肌纤维化，心功能改善	[42]
SD老年雌性大鼠脑卒中模型(TMCAO)	干预周期为4 wk，5 d/wk；频率40 Hz，加速度：0.3 g；2次/d，15 min/次	神经功能缺损评分显著降低，轮转测试分数升高；梗死体积减少41%；Caspase-1、ASC和IL-1β蛋白水平分别降低88%、57%和148%；BDNF 和pTrk-B分别升高58%和59%	[30]
C57BL/6J雌性小鼠	干预周期为5 wk；频率30 Hz，时间10 min，5次/wk	平衡木实验成绩提高21.3%，运动能力提高	[31]
幼年和老年小鼠	干预周期为5 wk；频率30 Hz，加速度1.9 g，时间10 min/d	空间记忆能力提高，认知功能改善	[34]
糖尿病小鼠	干预周期为12 wk；频率45 Hz，加速度0.5 g，时间60 min/d	MDA降低30%，GSH和GSH-Px升高，抗氧化能力提高，抑制过度氧化应激	[43]

ASC：半胱氨酸天冬酶募集结构域(caspase recruitment domain)；BDNF：脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor)；Caspase-1：半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶1；FSTL1：卵泡抑素样蛋白1 (follistatin-like 1)；GSH：还原型谷胱甘肽(glutathione)；GSH-Px：谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase)；IL-1β：白细胞介素-1β (interleukin-1β)；IR：缺血再灌注(ischemia reperfusion)；MDA：丙二醛(malondialdehyde)；MI：心肌梗死(myocardial infarction)；TMCAO：短暂性脑中动脉栓塞(transient middle cerebral artery occlusion)；Trk-B：酪氨酸激酶受体B (tyrosine kinase receptor subtype B)；VT：室性心动过速(ventricular tachycardia)；VF：室颤(ventricular fibrillation)

用于皮肤和肌肉的机械感受器，从而降低心率和血压；而全身振动可通过刺激机械感受器改善心血管自主神经功能[47]。受试者在功率自行车运动恢复期内施加振动训练 (4 Hz，4 mm) 后 HRV 总功率增加 (总功率是心脏自主神经调节的一个整体指标，在迷走神经激活时增加，在交感神经激活时降低)，推测振动训练可预防高强度运动引发的心脏并发症[48]。一项闭环振动刺激系统实验表明，振动频率与心率接近可显著升高 HF 值，增强副交感神经活性及自主神经系统稳定性[49]。振动训练可改变循环系统心率、血压、血流量及血管活性物质水平。分析认为，适宜振动训练可通过调节心率变异性和心脏自主神经功能状态，对心脑血管系统产生保护效应，改善患者心功能，而且保护效应与振动训练的频率及强度等参数密切相关。在进行振动训练时，需综合考虑影响训练效应的各个因素，时刻关注患者心脑血管功能变化，以保证训练的安全性及有效性。

3.2 抑制过度氧化应激和炎症反应

大量研究表明，氧化应激水平升高、炎性因子增加、抗氧化物减少与心血管及脑部疾病的发生密切相关；适宜运动可抑制过度炎症和氧化应激，维持机体正常免疫反应[50-53]，是改善心血管及脑部疾病的关键。临床研究发现，纤维肌痛患者经振动训练 (40 Hz，4 mm) 后，血浆丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 水平降低，过氧化氢酶 (catalase, CAT)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 增加，抗氧化能力提高[37]。表明振动训练可提高患者机体抗氧化能力，抑制过度氧化应激。振动训练 (45 Hz，0.5 g，60 min/d) 可降低糖尿病 (db/db) 小鼠血糖浓度和空腹胰岛素水平，缓解糖尿病小鼠胰岛素抵抗；肝脏固醇调节元件结合蛋白1C (sterol regulatory element-binding protein 1C, SREBP-1C) 蛋白表达水平降低 35%，甘油三酯 (triglyceride, TG) 水平下降 42%，脂滴大小和数量均显著降低，减少了肝脏脂质积累，降低了心脑血管风险。谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px) 缺乏可引发内皮功能障碍，以及血管和心肌结构异常改变，从而导致心力衰竭。而全身振动训练可降低血浆丙

二醛 (malondialdehyde, MDA) 和氧化型谷胱甘肽 (oxidized GSH, GSSG) 水平，升高还原型谷胱甘肽 (glutathione, GSH) 和谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px) 水平，抑制糖尿病小鼠的过度氧化应激，保护心血管系统 [43]。持续 30 d 的振动训练 (40 Hz，2 次 /d，15 min/ 次，5 d/wk) 可减少雌性 SD 大鼠脑卒中后的脑区梗死体积，使梗死区 caspase-1、IL-1β、半胱天冬酶募集结构域 (caspase recruitment domain, ASC) 蛋白表达水平下降 50%，显著降低炎性因子激活水平，抑制脑卒中引起的过度炎症，促进受损脑区结构和功能重建，减轻脑损伤 [30]。

长期接触振动的部位发生血管收缩，引起该区域血流量减少，激活缺氧诱导相关的细胞信号，导致血管平滑肌和内皮细胞中的炎症和氧化应激以及周围血管和感觉神经系统的氧化应激 [54]。适量的 ROS 及炎症水平可对机体产生保护效应，生理条件下线粒体产生的 ROS 可增强血管舒张力、促进细胞生长，但不当的高频振动会导致线粒体产生过量 ROS，引起细胞代谢功能异常甚至凋亡。30 Hz 左右的振动训练可使机体氧化应激和炎症因子水平降低，抗氧化物酶及抗炎因子增加，抑制机体过度氧化应激和炎症反应，增强机体的抗氧化能力及免疫功能，对心脑血管系统产生保护作用，降低心血管及脑部疾病的发病率。

3.3 促进机体释放细胞因子发挥保护效应

振动训练作为一种运动方式可刺激相关器官分泌细胞因子进入循环系统，到达远隔器官，抑制过度氧化应激和炎症，改善结构及功能，对心脑血管产生保护效应，如机械性生长因子 (mechano-growth factor, MGF)、胰岛素样生长因子 1 (insulin-like growth factor 1, IGF1)、Yes 相关蛋白 1 (yes-associated protein 1, YAP1)、卵泡抑素样蛋白 1 (follistatin-like 1, FSTL1)、成纤维细胞生长因子 21 (fibroblast growth factor 21, FGF21)[55-56]。FSTL1 在健康心脏的心外膜中高表达并能延缓缺血再灌注和心梗心脏的进一步损伤；在新生大鼠心肌细胞中，FSTL1 可诱导细胞外信号调节激酶 1/2 (extracellular signal-regulated kinase 1/2, ERK1/2) 磷酸化，激活 AMP 活化蛋白激酶 (AMP-activated protein kinase, AMPK)，发挥抗炎作用，抑制心衰和 IR 患者心肌病理性肥大和细胞凋亡；FSTL1 可激活 ERK1/2 介导成纤维细胞的增殖和迁移，促进心梗心脏早期阶段的修复和重塑；FSTL1 还可通过诱导蛋白激酶 B (protein kinase B, PKB/AKT) 磷酸化促进缺血心脏心肌细胞存活和血管新生 [57-60]。本实验室研究发现，大鼠结扎冠状动脉左前降支进行心梗造模，恢复一周后进行 4 周振动训练 (25 Hz，2 mm，38 min/d；2 次 /d，5 d/wk × 4 wk) 可上调内源性 FSTL1 的蛋白和基因表达，促进内皮细胞增殖和血管新生，减少间质纤维化，改善心功能 [42]。振动训练可产生频率低于 20 Hz 的声波，通过升高 miR-29a 水平抑制转化生长因子 -β (transforming growth factor-β, TGF-β) 表达和 Smad3 的磷酸化，抑制血管紧张素 II (angiotensin, AngII) 诱导的成纤维细胞增殖和胶原合成，抑制心脏纤维化，对病理心脏产生保护作用 [61]。全身振动训练可以激活肥胖大鼠神经生长因子 β (nerve growth factor-β, NGF-β)、波形蛋白 -1 (vimentin 1, VIM1) 相关细胞信号通路，诱导神经纤维的修复和生长 [62]。大鼠经短暂性大脑中动脉闭塞手术 (transient middle cerebral artery occlusion, TMCAO) 引发缺血性脑卒中后，接受 30 d 全身振动训练 (40 Hz，15 min，2 次 /d × 5 d) 治疗，结果发现：全身振动训练显著提高脑卒中大鼠脑梗死区周围脑源性神经营养因子 (brain-derived neurotrophic factor, BDNF) 和酪氨酸激酶受体 B 亚型 (tyrosine kinase receptor subtype B, TRKB) 水平；BDNF 通过激活 TRKB 减少脑区梗死体积，引起受损神经组织结构和功能重塑，减轻脑损伤，改善脑卒中后的运动功能 [30]。分析认为，振动训练可刺激机体分泌大量的有益细胞因子，如 FSTL1、BDNF、NGF，激活相关信号转导通路对心脑血管系统发挥保护效应，抑制心肌细胞凋亡和间质纤维化，改善心肌病理性肥大和重塑，促进血管生成，改善心功能，减少脑区梗死体积，促进神经纤维修复及生长，减轻脑损伤，改善认知及运动功能。

4 振动训练在临床应用中尚存的问题

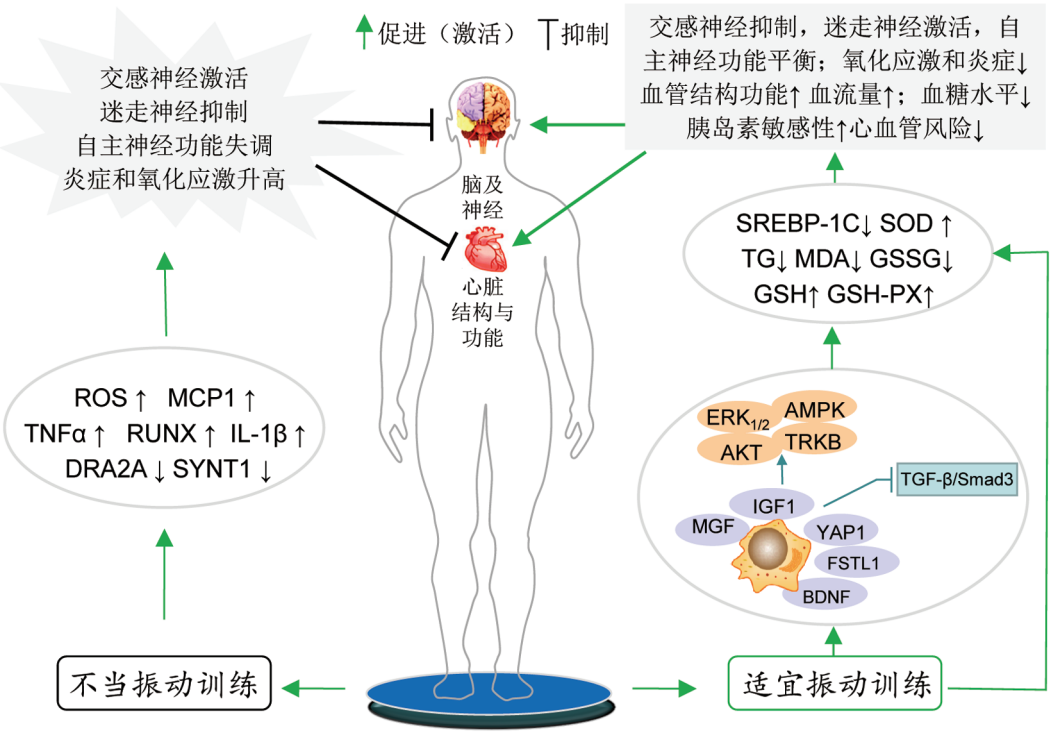
研究表明，全身振动训练可对人体和动物的机体功能产生影响。临床试验发现，频率 3~7 Hz，加速度分别为 0.56 m/s^2、0.9 m/s^2、1.25 m/s^2 的振动训练可使受试者心率及不适率升高，当加速度由 0.56 m/s^2 增加至 1.25 m/s^2，受试者心率显著升高 [63]，这说明不当的振动可对机体产生负面效应。一项针对纤维肌痛 (fibromyalgia, FM) 患者的研究发现，患者在经历一次急性全身振动后，血浆脂联素和可溶性肿瘤坏死因子受体 1 (soluble tumor necrosis factor receptor 1, sTNFR1) 水平显著降低，耗氧量和心率显著升高 [64]，推测急性振动可导致机体功能紊乱。

心血管系统会对长期振动训练的应力产生适应，8 Hz 的频率可引起心脏共振，16 Hz 以下的频率可升高心血管系统交感神经活动水平，导致自主神经和心血管系统功能紊乱 [46]。临床试验表明，持续 60 min、4~7 Hz 的低频振动训练可升高 LF/HF 比值 (LF 代表交感神经激活状态，HF 代表迷走神经激活状态)，明显降低心率变异性，激活交感神经，抑制迷走神经，这表明心功能降低 [65]。8 名肥胖青少年进行频率 35 Hz、振幅 5 mm 的全身振动训练后，收缩压、平均动脉压以及心率均升高 [66]，心血管功能失调。研究发现，当人体接受低频振动 (4~7 Hz) 15 min 后，LF/HF 显著升高，表明长时间低频振动使心率变异性下降，迷走神经调节被抑制，交感神经活动增强，从而降低了自主神经系统平衡及心血管功能 [65]。

长期高频振动可能会引起机体关节肌肉、周围神经系统、循环系统以及自主神经系统 (autonomic nervous system, Ans) 损伤，使患者产生不良反应，其安全性及有效性无法保证，但适宜振动训练可有效改善心血管及脑部疾病患者心功能及认知功能。目前研究表明，低于或高于 20~30 Hz 频率均可能引起机体不良反应。因此，需更深入探讨振动频率、振幅、时间等参数，研究适合各种病症的频率和系统训练方案，以便向不同病症和病程的患者提供适宜的振动训练方案。

5 总结与展望

综上表明，振动训练可作为心血管及脑疾病的



AKT (PKB)：蛋白激酶B (protein kinase B)；AMPK：AMP活化蛋白激酶(AMP-activated protein kinase)；BDNF：脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor)；DRA2A：α2A-肾上腺素受体(α2A-adrenoreceptor)；ERK1/2：细胞外信号调节激酶1/2 (extracellular signal-regulated kinase 1/2)；FSTL1：卵泡抑素样蛋白1 (follistatin-like 1)；GSH：还原型谷胱甘肽(glutathione)；GSH-Px：谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase)；GSSG：氧化型谷胱甘肽(oxidized GSH)；IGF1：胰岛素样生长因子1 (insulin-like growth factor 1)；IL-1β：白细胞介素-1β (interleukin 1-β)；MCP1：单核细胞趋化蛋白-1 (monocyte-chemoattractant protein-1)；MDA：丙二醛(malondialdehyde)；MGF：机械性生长因子(mechano-growth factor)；ROS：活性氧(reactive oxygen species)；RUNX：Runt相关转录因子-1 (Runt-related transcription factor-1)；SOD：超氧化物歧化酶(superoxide dismutase)；SREBP-1C：固醇调节元件结合蛋白1C (sterol regulatory element-binding protein 1C)；SYNT1：突触素-1 (synaptotagmin-1)；TG: 甘油三酯(triglyceride)；TGF-β：转化生长因子-β (transforming growth factor-β)；TNFα：肿瘤坏死因子-α (tumor necrosis factor-α)；TRKB：酪氨酸激酶受体B亚型(tyrosine kinase receptor subtype B)；YAP1：Yes相关蛋白1 (Yes-associated protein 1)。

图1 振动训练防治心血管及脑部疾病的可能机制

有效干预手段，通过调节机体细胞因子水平，激活其下游 ERK1/2、Akt、TGFβ/Smad3 等信号转导通路，缓解心脑血管系统的过度炎症与氧化应激水平，调控自主神经功能，改善心脑血管结构与功能，最终发挥对心脑血管系统的保护效应 (图 1)。

振动训练可作为针对心血管及脑部疾病防治和康复的有效手段，其应用可适当减少患者的药物使用和不良反应以及经济负担，其机制十分复杂，目前探讨其相关机制的基础研究较少，针对不同心血管及脑部疾病患者使用的运动处方尚未完全明确。在临床中使用振动训练应根据患者实际情况进行，需特别注意振动频率、时间、幅度等参数，密切关注患者相关器官功能变化情况，以保证其安全；应通过深入研究，综合考虑影响运动效应和机体功能状态的各个因素，从而保证振动训练方案及实施的系统性、规范性及有效性。开展振动训练与心血管及脑部疾病的系统研究，将对防治相关疾病的安全有效的康复训练方案的筛选及其机制研究提供依据和思路。

[参 考 文 献]

[1] Feng XJ, Li Y, Wang Y, et al. Danhong injection in cardiovascular and cerebrovascular diseases: Pharmacological actions, molecular mechanisms, and therapeutic potential. Pharmacol Res, 2019, 139: 62-75

[2] Feng XJ, Sureda A, Jafari S, et al. Berberine in cardiovascular and metabolic diseases: from mechanisms to therapeutics. Theranostics, 2019, 9: 1923-51

[3] Yusuf S, Joseph P, Rangarajan S, et al. Modifiable risk factors, cardiovascular disease, and mortality in 155722 individuals from 21 high-income, middle-income, and low income countries (PURE): a prospective cohort study. Lancet, 2020, 395: 795-808

[4] Numakawa T, Odaka H, Adachi N. Actions of brain-derived neurotrophin factor in the neurogenesis and neuronal function, and its involvement in the pathophysiology of brain diseases. Int J Mol Sci, 2018, 19: 3650

[5] Chen Z, Venkat P, Seyfried D, et al. Brain-heart interaction: cardiac complications after stroke. Circ Res, 2017, 121: 451-68

[6] Lendahl U, Nilsson P, Betsholtz C. Emerging links between cerebrovascular and neurodegenerative diseases-a special role for pericytes. EMBO Rep, 2019, 20: e48070

[7] 田振军, 李明晓, Lei X. FGF21作为运动因子在有氧运动抑制心梗心肌细胞凋亡中的作用及其机制探讨. 体育科学, 2018, 38: 35-44+67

[8] 郝美丽, 席悦, 田振军. 抗阻运动通过刺激骨骼肌FSTL1分泌抑制心梗大鼠心肌细胞凋亡及其机制探讨. 体育科学, 2020, 40: 67-78

[9] 张严焱, 刘雨佳, 柏平, 等. 有氧运动抑制高血压脑动脉平滑肌RyR-BK(Ca)通道功能耦联上调. 体育科学, 2017, 37: 55-61+80

[10] 徐召霞, 吴迎, 曾凡星, 等. PKC在有氧运动调控高血压脑动脉平滑肌细胞STOCs中的作用. 北京体育大学学报, 2018, 41: 64-9

[11] Simão AP, Mendonça VA, Avelar NCP, et al. Whole body vibration training on muscle strength and brain-derived neurotrophic factor levels in elderly woman with knee osteoarthritis: a randomized clinical trial study. Front Physiol, 2019, 10: 756

[12] Jawed Y, Jawed E, March K, et al. Whole body vibration training increases stem/progenitor cell circulation levels and may attenuate inflammation. Mil Med, 2020, 185: 404-12

[13] Celletti C, Suppa A, Bianchini E, et al. Promoting post-stroke recovery through focal or whole body vibration: criticisms and prospects from a narrative review. Neurol Sci, 2020, 41: 11-24

[14] Ritzmann R, Kramer A, Bernhardt S, et al. Whole body vibration training improving balance control and muscle endurance. PLoS One, 2014, 9: e89905

[15] Jemni M, Gu Y, Hu Q, et al. Vibration cycling did not affect energy demands compared to normal cycling during maximal graded test. Front Physiol, 2019, 10: 1083

[16] Heesterbeek M, Van der Zee EA, van Heuvelen MJG. Passive exercise to improve quality of life, activities of daily living, care burden and cognitive functioning in institutionalized older adults with dementia--a randomized controlled trial study protocol. BMC Geriatr, 2018, 18: 182

[17] Pacurari M, Waugh S, Krajnak K. Acute vibration induces peripheral nerve sensitization in a rat tail model: possible role of oxidative stress and inflammation. Neuroscience, 2019, 398: 263-72

[18] 中国心血管健康与疾病报告2019概要. 中国循环杂志, 2020, 35: 833-54

[19] 李博文, 田振军. 运动干预缺血性心脏病及其机制研究进展. 生命科学, 2020, 32: 864-77

[20] Tracy E, Rowe G, LeBlanc AJ. Cardiac tissue remodeling in healthy aging: the road to pathology. Am J Physiol Cell Physiol, 2020, 319: C166-82

[21] Aoyama A, Yamaoka-Tojo M, Obara S, et al. Acute effects of whole-body vibration training on endothelial function and cardiovascular response in elderly patients with cardiovascular disease. Int Heart J, 2019, 60: 854-61

[22] 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. 中国康复理论与实践, 2019, 25: 430-3

[23] Licurci MD, de Almeida Fagundes A, Arisawa EA. Acute effects of whole body vibration on heart rate variability in elderly people. J Bodyw Mov Ther, 2018, 22: 618-21

[24] 陈金鳌, 张林, 陈琉, 等. 振动训练对低龄老年人动脉血管弹性的影响. 体育学刊, 2015, 22: 120-6

[25] Ren W, Pu F, Luan H, et al. Effects of local vibration with different intermittent durations on skin blood flow responses in diabetic people. Front Bioeng Biotechnol, 2019, 7: 310

[26] Mahbub MH, Hase R, Yamaguchi N, et al. Acute effects of whole-body vibration on peripheral blood flow, vibrotactile perception and balance in older adults. Int J Environ Res Public Health, 2020, 17: 1069
[27] 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. 中国康复理论与实践, 2015, 21: 163-7
[28] Gerhardt F, Dumitrescu D, Gärtner C, et al. Oscillatory whole-body vibration improves exercise capacity and physical performance in pulmonary arterial hypertension: a randomised clinical study. Heart, 2017, 103: 592-8
[29] Kim KH, Lee HB. The effects of whole body vibration exercise intervention on electroencephalogram activation and cognitive function in women with senile dementia. J Exerc Rehabil, 2018, 14: 586-91
[30] Raval AP, Schatz M, Bhattacharya P, et al. Whole body vibration therapy after ischemia reduces brain damage in reproductively senescent female rats. Int J Mol Sci, 2018, 19: 2749
[31] Boerema AS, Heesterbeek M, Boersma SA, et al. Beneficial effects of whole body vibration on brain functions in mice and humans. Dose Response, 2018, 16: 1559325818811756
[32] Fereydounnia S, Shadmehr A. Efficacy of whole body vibration on neurocognitive parameters in women with and without lumbar hyper lordosis. J Bodyw Mov Ther, 2020, 24: 182-9
[33] Dubayle D, Vanden-Bossche A, Beraneck M, et al. Effects of centrifugation and whole-body vibrations on blood-brain barrier permeability in mice. NPJ Microgravity, 2020, 6: 1
[34] Regterschot GRH, Van Heuvelen MJG, Zeinstra EB, et al. Whole body vibration improves cognition in healthy young adults. PLoS One, 2014, 9: e100506
[35] Fuermaier ABM, Tucha L, Koerts J, et al. Good vibrations--effects of whole body vibration on attention in healthy individuals and individuals with ADHD. PLoS One, 2014, 9: e90747
[36] Karssemeijer EGA, Aaronson JA, Bossers WJ, et al. Positive effects of combined cognitive and physical exercise training on cognitive function in older adults with mild cognitive impairment or dementia: a meta-analysis. Ageing Res Rev, 2017, 40: 75-83
[37] Santos JM, Mendonça VA, Ribeiro VGC, et al. Does whole body vibration exercise improve oxidative stress markers in women with fibromyalgia? Braz J Med Biol Res, 2019, 52: e8688
[38] Pahl A, Wehrle A, Kneis S, et al. Feasibility of whole body vibration during intensive chemotherapy in patients with hematological malignancies a randomized controlled pilot study. BMC Cancer, 2018, 18: 920
[39] Heesterbeek M, van der Zee EA, van Heuvelen MJG. Feasibility of three novel forms of passive exercise in a multisensory environment in vulnerable institutionalized older adults with dementia. J Alzheimers Dis, 2019, 70: 681-90
[40] Streckmann F, Lehmann HC, Balke M, et al. Sensorimotor training and whole-body vibration training have the potential to reduce motor and sensory symptoms of chemotherapy-induced peripheral neuropathy-a randomized controlled pilot trial. Support Care Cancer, 2019, 27: 2471-8
[41] Shekarforoush S, Naghii MR. Whole body vibration training increases myocardial salvage against acute ischemia in adult male rats. Arq Bras Cardiol, 2019, 112: 32-7
[42] 席悦, 蔡梦昕, 田振军. 不同运动方式上调FSTL1蛋白表达诱导心梗心脏血管新生. 体育科学, 2016, 36: 32-9
[43] Liu Y, Zhai M, Guo F, et al. Whole body vibration improves insulin resistance in db/db mice: amelioration of lipid accumulation and oxidative stress. Appl Biochem Biotechnol, 2016, 179: 819-29
[44] Wong A, Figueroa A. Effects of whole body vibration on heart rate variability: acute responses and training adaptations. Clin Physiol Funct Imaging, 2019, 39: 115-21
[45] Jalilian H, Zamanian Z, Gorjizadeh O, et al. Autonomic nervous system responses to whole-body vibration and mental workload: a pilot study. Int J Occup Environ Med, 2019, 10: 174-84
[46] Matoba T. Human response to vibration stress in Japanese workers: lessons from our 35-year studies a narrative review. Ind Health, 2015, 53: 522-32
[47] Coupé M, Yuan M, Demiot C, et al. Low-magnitude whole body vibration with resistive exercise as a countermeasure against cardiovascular deconditioning after 60 days of head-down bed rest. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 2011, 301: R1748-54
[48] Sañudo B, César Castillo M, Tejero S, et al. Cardiac autonomic response during recovery from a maximal exercise using whole body vibration. Complement Ther Med, 2013, 21: 294-9
[49] Choi SH, Yoon H, Jin HW, et al. Effect of closed-loop vibration stimulation on heart rhythm during naps. Sensors (Basel), 2019, 19: 4136
[50] 唐东辉, 刘润芝, 李娟, 等. 8周游泳运动干预对肥胖小鼠血管内皮功能的改善及其炎症机制. 中国体育科技, 2016, 52: 86-91
[51] 杜杰. 有氧运动通过抑制肝脏IKKβ/NF-κB信号通路改善胰岛素抵抗小鼠炎症反应. 中国体育科技, 2017, 53: 101-7
[52] 王世强, 常芸, 李丹, 等. 运动性心肌纤维化的发生特征、可能机制和消退逆转. 体育科学, 2018, 38: 81-91
[53] 李俊. 有氧运动对2型糖尿病大鼠血管炎症及SIRT1/NF-κB信号通路的影响. 北京体育大学学报, 2018, 41: 57-63
[54] Krajnak K. Frequency-dependent changes in mitochondrial number and generation of reactive oxygen species in a rat model of vibration-induced injury. J Toxicol Environ Health Part A, 2020, 83: 20-35
[55] Usuki F, Fujimura M, Nakamura A, et al. Local vibration stimuli induce mechanical stress-induced factors and facilitate recovery from immobilization-induced oxidative myofiber atrophy in rats. Front Physiol, 2019, 10: 759
[56] 于凤至, 孙朋, 刘淑卉. 运动因子在心血管功能中的调控作用及相关机制研究进展. 中国体育科技, 2020, 56:

48-58
[57] Wei K, Serpooshan V, Hurtado C, et al. Epicardial FSTL1 reconstitution regenerates the adult mammalian heart. Nature, 2015, 525: 479-85
[58] Chiba A, Watanabe-Takano H, Miyazaki T, et al. Cardiomyokines from the heart. Cell Mol Life Sci, 2018, 75: 1349-62
[59] Maruyama S, Nakamura K, Papanicolaou KN, et al. Follistatin-like 1 promotes cardiac fibroblast activation and protects the heart from rupture. EMBO Mol Med, 2016, 8: 949-66
[60] Rooij EV. Cardiac repair after myocardial infarction. N Engl J Med, 2016, 374: 85-7
[61] Jin W, Deng QQ, Chen BY, et al. Inhibitory effects of low decibel infrasound on the cardiac fibroblasts and the involved mechanism. Noise Health, 2017, 19: 149-53
[62] Kiedrowski M, Waugh S, Miller R, et al. The effects of repetitive vibration on sensorineural function: biomarkers of sensorineural injury in an animal model of metabolic syndrome. Brain Res, 2015, 1627: 216-24
[63] Monazzam MR, Shoja E, Zakerian SA, et al. Combined effect of whole-body vibration and ambient lighting on human discomfort, heart rate, and reaction time. Int Arch Occup Environ Health, 2018, 91: 537-45
[64] Ribeiro VGC, Mendonça VA, Souza ALC, et al. Inflammatory biomarkers responses after acute whole body vibration in fibromyalgia. Braz J Med Biol Res, 2018, 51: e6775
[65] Zhang N, Fard M, Bhuiyan MHU, et al. The effects of physical vibration on heart rate variability as a measure of drowsiness. Ergonomics, 2018, 61: 1259-72
[66] Sousa-Gonçalves CR, Tringali G, Tamini S, et al. Acute effects of whole body vibration alone or in combination with maximal voluntary contractions on cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in obese male adolescents. Dose Response, 2019, 17: 1559325819890492