

• 综 述 •

不同全身振动参数对脑瘫儿童运动功能影响的研究进展

郭红杰¹, 常万鹏², 刘帅², 黄艳²

1. 山东中医药大学康复医学院, 山东 济南 250301; 2. 山东大学附属儿童医院康复科

摘要: 全身振动(WBV)训练作为一种无创康复手段,可通过调节振动类型、频率、振幅及持续时间等参数改善脑瘫(CP)患儿运动功能。但参数较多且作用机制复杂,不同参数和训练体位的疗效各异,因而,WBV 的最佳振动方案尚未达成共识。为此,本文从多个振动参数维度出发,深入分析不同振动参数方案在 CP 患儿治疗中的实际效应,以期为临床实践提供更加精准、科学的指导。

关键词: 全身振动; 脑性瘫痪; 振动参数

中图分类号:R179 文献标识码:A 文章编号:1008-6579(2025)12-1353-05 doi:10.11852/zgetbjzz2025-0054

Research progress on the effects of different whole-body vibration parameters on motor function of children with cerebral palsy

GUO Hongjie¹, CHANG Wanpeng², LIU Shuai², HUANG Yan²

1. School of Rehabilitation Medicine, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan, Shandong 250301, China;

2. Department of Rehabilitation, Children's Hospital of Shandong University

Corresponding author: HUANG Yan, E-mail: jnhuangyan@163.com

Abstract: As a non-invasive rehabilitation method, whole-body vibration (WBV) training can improve the motor function of children with cerebral palsy (CP) by adjusting the parameters of vibration type, frequency, amplitude and duration. However, there are many parameters and the mechanism of action is complex, and different parameters and training postures produce different effects. Therefore, the optimal vibration scheme of WBV has not yet reached a consensus. This paper analyzes the actual effects of different vibration parameter schemes in the treatment of children with CP from multiple vibration parameter dimensions, so as to provide more accurate and scientific guidance for clinical practice.

Keywords: whole-body vibration; cerebral palsy; vibration parameters

脑性瘫痪(cerebral palsy, CP)简称脑瘫,是一组持续存在的中枢性运动和姿势发育障碍、活动受限症候群。脑瘫的运动障碍常伴有感觉、知觉、认知、交流和行为障碍以及癫痫和继发性肌肉、骨骼等问题^[1],是儿童身体残疾最常见的原因之一。全身振动(whole-body vibration, WBV)训练作为一种新兴的神经肌肉康复训练方式被广泛应用于医学领域^[2],并显著改善了 CP 患儿的运动功能^[3-5]。尽管 WBV 在 CP 儿童中的研究日益增多,但现有研究中的振动参数各不相同,这阻碍了结果的解释和最佳振动方案的制定。本文就各振动参数对 CP 患儿运动功能的影响进行系统探讨,以期为临床实践提供更科学的依据。

1 全身振动训练定义及机制

1.1 定义 全身振动训练是一种新型的训练方法,通过振动平台让足部、上肢或臀部接触振动源,进而经由上、下肢或躯干传递至全身,从而激活并锻炼骨骼肌,同时诱发其它身体效应。通过振动刺激神经肌肉系统及相关受体,将机械信号转化为电信号,激发机体的生物效应,从而达到改善人体功能的治疗效果^[6]。

1.2 机制 振动刺激通过引起 Ia 传入运动神经元突触前抑制,降低单突触反射兴奋性。同时,通过交互抑制和脊髓抑制机制,减少拮抗肌间的活动^[7]。振动作用于肌腹或肌腱时,引起肌梭放电并通过 Ia 传入神经发送到脊髓,从而激活 α 运动神经元,导致

基金项目:山东省儿童健康与疾病临床医学研究中心(SDPRC011);济南市医疗卫生行业高层次人才工程(202412)

作者简介:郭红杰(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向为儿童康复。

通信作者:黄艳, E-mail: jnhuangyan@163.com

肌肉收缩^[8]。因此, WBV 可有效缓解受试者的痉挛情况, 增强肌力。此外, WBV 还能促进骨组织形成^[9], 增加骨骼肌微血管灌注^[10], 并有效调节内分泌系统, 增加生长激素分泌^[11], 促进葡萄糖代谢和肌肉氧合^[12]。因此, WBV 不仅改善神经肌肉功能, 还能增加骨密度、改善循环和代谢功能。

2 全身振动训练参数

WBV 方案是根据振动类型、频率、振幅和持续时间等参数综合设定的, 不同参数及其组合会产生不同的治疗效果。作为一种被动训练模式, WBV 可以通过改变频率和振幅以操纵大范围的训练选项^[13], 还可以通过振动类型、膝关节角度和振动持续时间来进一步调整振动方案。此外, 是否穿鞋亦成为调节振动对身体作用效果的另一关键因素。

2.1 振动类型 根据振动训练平台振动方式的不同, 振动可以分为垂直振动(vertical VT, vVT)和侧向交替振动(side-alternating VT, sVT)。vVT 只产生垂直方向运动, 而 sVT 产生垂直方向和水平方向的运动, 这是由于 sVT 装置类似跷跷板, 一侧上移时另一侧下移^[14]。相较于 vVT, sVT 允许更高的振幅设置^[15], 因为受试者站在振动装置上的对称中心位置并保持对称姿势, 因而设备对身体不产生加速度, 从而显著降低了向上半身传递的振动。正如 Spain 等^[16]的研究显示, 侧面交替的 Galileo900 显示出比 PowerplatePro5 的垂直振动更大的输入加速度衰减, 使得传递到脊柱和头部的振动更少。此外, 在进行 sVT 时, 受试者可以通过移动脚在平台上的位置来调整振幅, 越接近平台中线, 振幅越小。这与 vVT 不同, 其振幅与脚的位置无关。

sVT 对活动能力、身体成分、肌肉功能和生活质量具有积极影响^[17]。Faes 等^[18]的研究表明, 单次 sVT 可以提高肌肉骨骼健康、灵活性、身体平衡和认知能力。此外, sVT 类似于人类步行的运动模式, 能够激活本体感受性脊髓回路, 从而引起下肢和躯干的节律性肌肉收缩^[19]。

2.2 振动频率 频率作为 WBV 的核心参数, 其与振动能量水平呈正比关系, 并显著影响振动的传递效果^[20]。多项研究证实了 WBV 的频率依赖性效应, 如 Yoon 等^[21]研究发现随着振动频率从 0Hz 增加到 30Hz, 腓肠肌肌电活动逐渐增强。Kumru 等^[22]揭示了脊髓兴奋性与局灶性振动的变化依赖于振动刺激频率, 即 50Hz 和 150Hz 对 H 反射和 T 波的抑制作用大于 250Hz。

适宜的振动频率可导致神经元发放频率加快,

促进神经肌肉适应性变化, 从而改善机体代谢水平与运动能力。然而, 频率过高(>50Hz)易引起肌肉收缩疲劳, 频率过低易引发靶组织谐振损伤^[23]。在儿科康复领域, WBV 频率的选择具有针对性: 5~12Hz 主要用于本体感觉和平衡训练; 12~20Hz 侧重于改善肌肉功能, 实现肌肉放松; 而 20Hz 以上用于增加肌肉力量^[24]。Tekin 等^[25]揭示了在 15Hz WBV 治疗后 CP 患儿痉挛和运动表现即刻有所改善。Ali 等^[26]研究表明 30Hz WBV 治疗可以增加 CP 患儿腹部肌肉厚度。有研究表明, 20Hz 是脑瘫儿童通常推荐的频率, 因为其对头部的振动传递率较低, 且在振动训练期间展示出了更好的协调性和姿势稳定性^[27]。此外, 也有报道称, 25Hz 是脑瘫儿童侧面交替振动训练长期研究中经常使用的最高频率, 且已证明无严重的副作用^[28]。

2.3 振动幅度 振幅是振动点相对于平均位置的最大位移。人体能够有效减弱振动从小腿向臀部和头部的传递幅度^[29]。这种衰减现象主要归因于身体各部位对振动的阻尼作用, 以及振动源与身体各部分间距离的增加。Beerse 等^[30]的研究证实了这一点, 研究显示, 从脚踝到膝盖的阻尼最大, 垂直加速度从脚踝到头部逐渐减小, 高振幅振动期间加速度更大, 但高振幅的加速度传递低于低振幅的加速度传递, 膝关节的加速度传递随频率的增加而降低。头部的加速度则保持在较低水平, 且几乎不受频率和振幅变化的影响。

高振幅 WBV 往往会引起更大的肌肉激活反应, Liu 等^[31]研究表明, 将振幅从 2mm 增加至 4mm 可显著改善股内侧肌和股外侧肌的激活程度。此外, 低振幅同样能产生与高振幅相似的神神经肌肉反应, 不仅增强肌肉力量, 还有助于减少痉挛^[26]。Liang 等^[15]研究结果显示, 无论是低振幅还是高振幅, 单次 WBV 均能有效减轻脑瘫儿童的痉挛症状, 改善其站立姿势和步态模式。这一结果表明, 对于那些无法耐受较高振幅 WBV 的 CP 儿童而言, 仍可通过接受相对较低振幅的 WBV 治疗, 获得类似的神神经肌肉功能改善效果。

2.4 膝关节角度 长期暴露于传递到头部的振动可能会对身体产生不利影响, 而姿势的变化会显著影响振动的传递路径, 适当的屈膝动作可有效减少传递到头部的振动^[32]。为了同时满足最大化肌肉活动与最小化头部振动传递的双重标准, 需要了解膝关节角度对振动传递的影响。

涂美等^[33]的研究指出, 与迈步和后伸位相比, 屈膝位(0°~30°)在提高患侧伸肌力量方面更具优

势。Ritzmann 等^[34]发现,膝关节屈曲角度从 10°增加至 60°时,膝伸肌的肌电图 (electromyogram, EMG) 活动逐步增加且 60°时最高;而跖屈肌在 10°时 EMG 反应最高。因此,为了实现特定肌肉的高 EMG 激活,需根据目标肌肉群的特点,适当调整膝关节角度。相较于双腿站立,单腿站立时下肢肌肉的激活程度显著提高。但对于 CP 患儿而言,在振动平台上进行单腿站立极具挑战性,且易引发头部不适,故需谨慎采用。

静态和动态下蹲是 WBV 训练的常见姿势,在振动平台上进行静态或动态下蹲时,膝关节角度起着关键作用。Liu 等^[31]的研究表明,动态下蹲(屈膝 10°~45°)相较于静态下蹲(屈膝 45°)更能显著提高股直肌激活程度。动态下蹲是一种结合向心和离心收缩的肌肉收缩形式,而静态下蹲属于等长收缩形式。因此,在 WBV 时进行动态下蹲更有利于下肢肌肉力量训练。此外,振动也可通过姿势调整将刺激传递到上肢。Tsukahara 等^[35]研究表明,采取膝盖和肘部直接接触的蹲姿,能将振动从下肢传导到上肢,同时减少向背部和头部的传递。

2.5 振动时间 除振动频率、振幅和膝关节角度外,振动时间也是影响振动训练效果的重要因素。目前学界对最佳振动时长尚未达成共识。针对 CP 儿童的研究多采用间歇性方案,如 9min(3 次 3min 振动,间隔休息 3min)或 10min(10 次 1min 振动,间隔休息 1min)^[36]。Adaikina 等^[36]进一步探索了 15min WBV 方案(5 次 3min 振动,间隔 3min)在 CP 儿童和青少年中的安全性和可接受性,结果表明该方案安全且耐受性良好,对移动能力和骨骼健康有潜在益处。但更长的训练时长能否带来更显著的健康改善,目前仍不明确。研究表明,振动时间存在收益递减点。Stewart 等^[37]报告称,持续振动 2min 后等长峰值扭矩增加 3.8%,而在 4min 和 6min 时扭矩减少,这提示长时振动可能增加疲劳和受伤风险。因此,间歇性方案可能优于连续性振动方案。

关于振动训练周期,Adaikina 等^[17]发现与 12 周振动训练相比,20 周的振动训练在改善步行灵活性、粗大运动功能和肌肉功能方面更显著。另有报道称,20 周的干预周期被视为促进肌肉和骨量变化的最短最佳期^[19,38]。此外,每周的训练频率亦会对人体产生不同的训练适应性。连续 5 次/周的 WBV 训练相较于非连续的 3 次/周的 WBV 训练,更能显著促进神经肌肉性能提升和身体成分的改善^[39]。

2.6 穿鞋情况 在振动平台上进行训练时,鞋子的选择同样不容忽视。受试者可能会选择光脚、穿袜

子或穿鞋,这主要取决于受试者的病种、锻炼情况、年龄和运动方案。光脚为皮肤和神经肌肉感受器提供了必要的振动刺激,低频振动训练可以光脚,但在高频振动下,光脚可能会引起脚底不适甚至产生水泡。

研究表明,鞋子会降低垂直方向的振幅,但会增加冠状方向的振幅。作为一种策略,穿鞋能够减少踝关节的垂直振动,而光脚会降低踝关节的冠状加速度。与穿鞋相比,光脚训练时踝关节内外侧稳定性得到了增强^[40]。Marin 等^[41]的研究结果显示,在 4mm 振幅下,穿鞋时腓肠肌内侧肌束肌电图活动高于股外侧肌,而光脚时股外侧肌活动最大。这一现象可能与穿鞋略增加了鞋跟高度,进而改变足底屈曲角度有关。

3 全身振动训练的安全性

虽然 WBV 训练对 CP 患儿的康复具有显著益处,且相关不良反应的报道较少,但其潜在风险仍不容忽视。WBV 训练可能引发瘙痒和红斑,但 Mueller 等^[42]的研究称其与皮肤温度升高有关,且通常为良性反应。此外,WBV 训练还可能引发眼部并发症。Maggiano 等^[43]报道了一名 59 岁男性在完成一次 WBV 训练(25~50Hz,振动 60s,间隔 30min,重复 3 次)后,出现了颞部视网膜撕裂、视网膜前出血和轻度玻璃体出血。这提示了高强度振动训练可能会增加易感人群视网膜损伤的风险。

WBV 训练的安全性 with 参数设置密切相关,高频、高振幅及长时连续振动可能诱发关节或软组织微损伤,姿势不当可能进一步加剧风险。因此,实施 WBV 训练时,应根据患儿的训练目标及安全性个性化设置参数。建议频率为 5~25Hz,振幅从 1mm 逐步增加至可耐受最大值,避免长时间连续振动以防出现瘙痒、红斑等不良反应,适当屈膝以减少头部振动,并根据训练肌群进一步考虑是否穿鞋。对于功能较低的患儿,采用低频、低振幅、静态姿势训练,而功能较高的患儿,可设置高频、高振幅、动态运动训练。

WBV 训练作为神经肌肉康复领域的有效干预方式,引起了一系列理想的即时与长期效应,其临床效应是由振动参数决定的,单一参数的分析难以全面解释 WBV 训练的临床效果,各参数间的交互作用对训练疗效与安全性具有显著影响。研究表明,高频高振幅组合更利于增强肌力^[44],但要同时结合短时间歇训练以防肌肉疲劳。高频低振幅的组合振动更能促进骨形成^[45]。膝关节屈曲不仅能显著减

低头部振动传递,还能强化频率、振幅和持续时间对肌肉激活的效应。此外,振动训练周期越长,患儿运动功能的改善越显著。然而,现有研究多局限于单参数分析,缺乏多参数组合效应的纵向研究。因此,未来需要探究各参数间的交互作用,为脑瘫患儿功能改善提供更优的个性化振动方案。

参考文献

- [1] 中国康复医学会儿童康复专业委员会, 中国残疾人康复协会小儿脑性瘫痪康复专业委员会, 中国医师协会康复医师分会儿童康复专业委员会, 等. 中国脑性瘫痪康复指南(2022)第一章:概论[J]. 中华实用儿科临床杂志, 2022, 37(12): 887-892.
Pediatric Rehabilitation Committee of China Association Rehabilitation Medicine, Pediatric Cerebral Palsy Rehabilitation Committee of China Association of Rehabilitation of Disabled Persons, Pediatric Rehabilitation Committee of Rehabilitation Physician Branch of Chinese Medical Doctor Association, et al. Chinese guidelines for rehabilitation of cerebral palsy (2022), Chapter 1: Introduction[J]. Chin J Appl Clin Pediatrics, 2022, 37(12): 887-892. (in Chinese)
- [2] 杨晓华, 李古强. 振动疗法在脑卒中康复的应用[J]. 中国康复, 2021, 36(5): 313-316.
Yang XH, Li GQ. Application of vibration therapy in stroke rehabilitation[J]. Chin J Rehabil, 2021, 36(5): 313-316. (in Chinese)
- [3] Wen J, Leng L, Hu M, et al. Effects of whole-body vibration training on cognitive function: A systematic review[J]. Front Hum Neurosci, 2023, 17: 854515.
- [4] Cai X, Qian G, Cai S, et al. The effect of whole-body vibration on lower extremity function in children with cerebral palsy: A Meta-analysis [J]. PLoS One, 2023, 18(3): e0282604.
- [5] Hussein HM, Aldhahi MI, Alshammari HZM, et al. Effect of whole-body vibration on muscle tone, function, and quality of life in children with spastic cerebral palsy: A systematic review with Meta-analysis [J]. J Disabil Res, 2024, 3(1): 20230056.
- [6] Xie J, Wang J, Xu G, et al. Clinical efficacy of vibration stimulation therapy to relieve acute exercise fatigue [J]. Technol Health Care, 2023, 31(Suppl 1): 235-246.
- [7] Krause A, Gollhofer A, Lee K, et al. Acute whole-body vibration reduces post-activation depression in the triceps surae muscle[J]. Hum Mov Sci, 2020, 72: 102655.
- [8] Hegazy RG, Abdel-Aziem AA. Effect of whole-body vibration exercise on hamstrings-to-quadriceps ratio, walking performance, and postural control in children with hemiparetic cerebral palsy: A randomized controlled trial[J]. J Manipulative Physiol Ther, 2022, 45(9): 660-670.
- [9] Swolin-Eide D, Magnusson P. Does whole-body vibration treatment make children's bones stronger? [J]. Curr Osteoporosis Rep, 2020, 18(5): 471-479.
- [10] Betik AC, Parker L, Kaur G, et al. Whole-body vibration stimulates microvascular blood flow in skeletal muscle[J]. Med Sci Sports Exerc, 2021, 53(2): 375-383.
- [11] Di Giminiani R, Rucci N, Capuano L, et al. Individualized whole-body vibration: Neuromuscular, biochemical, muscle damage and inflammatory acute responses[J]. Dose Response, 2020, 18(2): 1559325820931262.
- [12] Aa S, Am B, Cc D, et al. The effects of whole-body vibration amplitude on glucose metabolism, inflammation, and skeletal muscle oxygenation [J]. Physiol Rep, 2022, 10(5): e15208.
- [13] Ruhde L, Hulla R. An overview of the effects of whole-body vibration on individuals with cerebral palsy[J]. J Pediatr Rehabil Med, 2022, 15(1): 193-210.
- [14] 韩琳秀, 郭津. 全身振动训练在脑瘫儿童下肢康复训练中的应用进展 [J]. 中国儿童保健杂志, 2021, 29(12): 1321-1324.
Han LX, Guo J. Application progress of whole-body vibration training in lower limb rehabilitation training for children with cerebral palsy [J]. Chin J Child Health Care, 2021, 29(12): 1321-1324. (in Chinese)
- [15] Liang V, Henderson G, Wu J. Neuromuscular response to a single session of whole-body vibration in children with cerebral palsy: A pilot study[J]. Clin Biomech (Bristol), 2020, 80: 105170.
- [16] Spain L, Yang L, Wilkinson JM, et al. Transmission of whole body vibration - Comparison of three vibration platforms in healthy subjects[J]. Bone, 2021, 144: 115802.
- [17] Adaikina A, Derraik JGB, Hofman PL, et al. Vibration therapy in young children with mild to moderate cerebral palsy: Does frequency and treatment duration matter? A randomised-controlled study[J]. BMC Pediatr, 2023, 23(1): 4.
- [18] Faes Y, Rolli Salathé C, Herlig ML, et al. Beyond physiology: Acute effects of side-alternating whole-body vibration on well-being, flexibility, balance, and cognition using a light and portable platform A randomized controlled trial [J]. Front Sports Act Living, 2023, 5: 1090119.
- [19] Gusso S, Munns CF, Colle P, et al. Effects of whole-body vibration training on physical function, bone and muscle mass in adolescents and young adults with cerebral palsy [J]. Sci Rep, 2016, 6: 22518.
- [20] Munera M, Bertucci W, Duc S, et al. Transmission of whole body vibration to the lower body in static and dynamic half-squat exercises[J]. Sports Biomech, 2016, 15(4): 409-428.
- [21] Yoon JY, Kang SR, Kim HS, et al. Effects of low-frequency whole-body vibration on muscle activation, fatigue, and oxygen consumption in healthy young adults: A single-group repeated-measures controlled trial[J]. J Sport Rehabil, 2022, 31(8): 984-992.
- [22] Kumru H, Albu S, Oguz S, et al. Effects of different vibration frequencies on spinal cord reflex circuits and thermalalgesic perception[J]. J Musculoskelet Neuronal Interact, 2021, 21(4): 533-541.

- [23] 张秋, 虞记华, 李卫平, 等. 不同频率下全身振动疗法对不随意运动型脑瘫患儿下肢粗大运动及步行功能的影响[J]. 实用医学杂志, 2024, 40(3): 353-359.
Zhang Q, Yu JH, Li WP, et al. Effects on different frequencies of whole body vibration on gross motor function and walking function in children with dyskinetic cerebral palsy[J]. J Pract Med, 2024, 40(3): 353-359. (in Chinese)
- [24] Rittweger J. Manual of vibration exercise and vibration therapy[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 249.
- [25] Tekin F, Kavlak E. Short and long-term effects of whole-body vibration on spasticity and motor performance in children with hemiparetic cerebral palsy[J]. Percept Mot Skills, 2021, 128(3): 1107-1129.
- [26] Ali MS, Abd El-Aziz HG. Effect of whole-body vibration on abdominal thickness and sitting ability in children with spastic diplegia[J]. J Taibah Univ Med Sci, 2021, 16(3): 379-386.
- [27] Pin TW, Butler PB, Purves S. Use of whole body vibration therapy in individuals with moderate severity of cerebral palsy- a feasibility study[J]. BMC Neurol, 2019, 19(1): 80.
- [28] Ritzmann R, Stark C, Krause A. Vibration therapy in patients with cerebral palsy: A systematic review[J]. Neuro-psychiatr Dis Treat, 2018, 14: 1607-1625.
- [29] Sonza A, Völkel N, Zaro MA, et al. A whole body vibration perception map and associated acceleration loads at the lower leg, hip and head[J]. Med Eng Phys, 2015, 37(7): 642-649.
- [30] Beerse M, Lelko M, Wu J. Acute effect of whole-body vibration on acceleration transmission and jumping performance in children[J]. Clin Biomech (Bristol), 2021, 81: 105235.
- [31] 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]. Sci Rep, 2023, 13(1): 14432.
- [32] Lr C, Ww Y, Pl C, et al. Managing vibration training safety by using knee flexion angle and rating perceived exertion[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(4): 1158.
- [33] 涂美, 王剑雄, 张驰, 等. 不同下肢体位振动对脑卒中患者下肢肌力及运动功能的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(2): 166-171, 192.
Tu M, Wang JX, Zhang C, et al. A study on different lower limb position vibrations on lower limb muscle strength and motor function in patients with stroke[J]. Chin J Rehabil Med, 2021, 36(2): 166-171, 192. (in Chinese)
- [34] Ritzmann R, Gollhofer A, Kramer A. The influence of vibration type, frequency, body position and additional load on the neuromuscular activity during whole body vibration[J]. Eur J Appl Physiol, 2013, 113(1): 1-11.
- [35] Tsukahara Y, Iwamoto J, Iwashita K, et al. What is the most effective posture to conduct vibration from the lower to the upper extremities during whole-body vibration exercise? [J]. Open Access J Sports Med, 2016, 7: 5-10.
- [36] Adaikina A, Derraik JGB, McMillan J, et al. Feasibility study on a longer side-alternating vibration therapy protocol (15 min per session) in children and adolescents with mild cerebral palsy[J]. Front Pediatr, 2023, 11: 1231068.
- [37] Stewart JA, Cochrane DJ, Morton RH. Differential effects of whole body vibration durations on knee extensor strength[J]. J Sci Med Sport, 2009, 12(1): 50-53.
- [38] Adaikina A, Hofman PL, Gusso S. The effect of side-alternating vibration therapy on mobility and health outcomes in young children with mild to moderate cerebral palsy: Design and rationale for the randomized controlled study[J]. BMC Pediatr, 2020, 20(1): 508.
- [39] Karatrantou K, Bilios P, Bogdanis GC, et al. Effects of whole-body vibration training frequency on neuromuscular performance: A randomized controlled study[J]. Biol Sport, 2019, 36(3): 273-282.
- [40] Saade N. Whole-body vibration transmission barefoot and with shoes in athletes and sedentary individuals[D]. Montreal: Concordia University, 2013.
- [41] Marin PJ, Bunker D, Rhea MR, et al. Neuromuscular activity during whole-body vibration of different amplitudes and footwear conditions: Implications for prescription of vibratory stimulation[J]. J Strength Cond Res, 2009, 23(8): 2311-2316.
- [42] Mueller S, Fischer M, Herger S, et al. Good vibrations: Itch induction by whole body vibration exercise without the need of a pruritogen[J]. Exp Dermatol, 2019, 28(12): 1390-1396.
- [43] Maggiano J, Yu MCM, Chen S, et al. Retinal tear formation after whole-body vibration training exercise[J]. BMC Ophthalmol, 2020, 20(1): 37.
- [44] Celik E, Findikoglu G, Ozdemir Kart S, et al. The adaptations in muscle architecture following whole body vibration training[J]. J Musculoskelet Neuronal Interact, 2022, 22(2): 193-202.
- [45] Steppe L, Liedert A, Ignatius A, et al. Influence of low-magnitude high-frequency vibration on bone cells and bone regeneration[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2020, 8: 595139.

收稿日期: 2025-01-20 修回日期: 2025-04-28 本文编辑: 李少闻