

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2019.08.005

· 专题 ·

全身振动训练治疗慢性踝关节不稳的研究进展

耿治中^{1a}, 汪冕², 陈建^{1b}, 李丹阳^{1c}, 裴子文^{1a}

1. 武汉体育学院, a. 研究生院; b. 健康科学学院; c. 体能中心, 湖北武汉市 430079; 2. 香港理工大学护理学院, 香港

通讯作者: 裴子文, E-mail: 165529510@qq.com

基金项目: 1. 武汉体育学院研究生教育创新基金项目(No. 201726); 2. 武汉体育学院青年教师科研基金项目(No. 2016001)

摘要

全身振动训练(WBVT)作为一种新兴的运动治疗手段, 通过向机体传递振动刺激影响神经肌肉活动, 从而达到改善肌肉骨骼功能和运动表现的目的。本文通过系统回顾相关文献, 对 WBVT 治疗慢性踝关节不稳的临床疗效、作用机制以及参数设置进行综述, 以期为该技术临床应用提供理论依据。

关键词 慢性踝关节不稳; 全身振动训练; 综述

Advances in Whole Body Vibration Training for Chronic Ankle Instability (review)

GENG Zhi-zhong^{1a}, WANG Mian², CHEN Jian^{1b}, LI Dan-yang^{1c}, PEI Zi-wen^{1a}

1. a. Graduate Department; b. School of Health Science; c. Strength and Conditioning Center, Wuhan Sports University, Wuhan, Hubei 430079, China; 2. Department of Nursing, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

Correspondence to PEI Zi-wen, E-mail: 165529510@qq.com

Supported by Postgraduate Education Innovation Fund Project of Wuhan Sports University (No. 201726) and Research Fund Project for Young Teachers of Wuhan Sports University (No. 2016001)

Abstract

Whole body vibration training (WBVT) is a new kind of therapeutic exercise, which can improve musculoskeletal function and motor performance by transferring vibration stimulation to the body to affect neuromuscular activity. In this paper, the clinical efficacy, mechanism and parameter setting of WBVT in the treatment of chronic ankle instability were introduced through a systematic review of relevant literatures, so as to provide theoretical basis for the clinical application of this technique.

Key words: chronic ankle instability; whole body vibration training; review

[中图分类号] R684.7 [文献标识码] A [文章编号] 1006-9771(2019)08-0903-05

[本文著录格式] 耿治中, 汪冕, 陈建, 等. 全身振动训练治疗慢性踝关节不稳的研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(8): 903-907.

CITED AS: GENG Zhi-zhong, WANG Mian, CHEN Jian, et al. Advances in Whole Body Vibration Training for Chronic Ankle Instability (review) [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2019, 25(8): 903-907.

踝关节外侧扭伤(lateral ankle sprain, LAS)是最常见的运动损伤之一, 在所有运动损伤中占约 10%~30%^[1]。在英国, 踝关节扭伤占有急诊病例的 3%~5%, 给卫生部门带来沉重的负担^[2]。LAS 如果处理不当会引发慢性踝关节不稳(chronic ankle instability, CAI), 以踝关节的不稳以及 LAS 的重复出现为主要症状^[3-4]。CAI 患者存在各种运动学、动力学及电生理学表现

异常, 这会对患者运动功能乃至生活质量造成不良影响^[5]。CAI 发生机制仍存在不同观点, 国际踝关节协会声明认为, CAI 主要是由于外周感觉运动障碍所致^[6]; 中枢运动控制机制异常也可能是造成 CAI 的原因之一^[7]。CAI 治疗一般首先推荐保守治疗, 包括运动治疗、理疗及护具的使用等, 其中运动治疗在 CAI 治疗中占有重要的地位^[8]。

作者简介: 耿治中(1994-), 男, 汉族, 山东泰安市人, 硕士研究生, 主要研究方向: 运动损伤的康复。

全身振动训练(whole body vibration training, WBVT)作为一种新兴的运动治疗手段逐渐受到关注,其对CAI患者肌肉功能、神经肌肉控制、姿势稳定性等方面存在一定疗效,但是不同研究中治疗参数设置不一致,造成疗效也有所差异。本文通过回顾国内外研究现状,以期进一步明确WBVT对CAI的治疗效果,为此技术的临床应用提供理论依据。

1 WBVT概述

WBVT是在振动治疗过程中,将不同振幅和频率的振动刺激从振动平台通过足底传递到全身,使其释放的冲击性振动刺激通过肢体传递到邻近肌群上,进而增加主动肌的激活程度并提高高阈值运动单位的生物学活性,引起参与运动单位肌群以高频率放电,达到神经肌肉系统兴奋性提高的训练效果^[9]。近年来,其在康复医学领域应用广泛,有研究证实其有助于改善肌肉骨骼系统疾病(慢性腰痛^[10],膝骨关节炎^[11])和神经系统疾病(脑卒中^[12]、脊髓损伤^[13])功能障碍,预防和缓解骨质疏松^[14],在竞技体育领域常用于提升运动员运动表现^[15-16]。尽管WBVT疗效显著,但目前对其作用机制还了解甚少。

作为一种外源性刺激,振动刺激可以通过激活骨髓基质细胞的Wnt信号通路,促进骨髓基质细胞向成骨细胞分化,进而促进成骨,使骨量增加^[17]。对肌肉功能的影响主要是通过影响神经肌肉的兴奋性,使肌肉在实际的运动中能够募集到更多的运动单位,从而增强肌肉收缩力量^[18]。振动刺激对大脑皮质运动区域也有调节作用,从而对运动控制造成影响^[19]。但是相关研究较少,影响机制还有待进一步明确。

2 WBVT对CAI的疗效

2.1 肌肉力量

踝关节周围肌群包括腓骨肌、胫骨前肌、腓肠肌和比目鱼肌。这些肌肉协同收缩在主动维持踝关节稳定中起着至关重要的作用^[20]。在CAI患者中普遍存在踝关节周围肌群力量不足和肌肉体积减少的现象,其中腓骨肌肌力减退,造成踝关节外侧动态稳定性缺失,是诱发踝关节重复扭伤的主要原因。

振动力量训练作为一种新兴的力量训练方法,与传统的抗阻力训练相比,在提高肌肉快速力量、最大力量等方面有着明显的效果^[21]。

Aminianfar等^[22]开展随机对照试验探索WBVT对CAI患者踝周肌群肌力的影响,实验中共30例女性患者进行为期6周的干预(振动频率25 Hz,振幅4 mm,每次30 min),结果显示干预后,WBVT组踝关节内翻、外翻峰力矩均明显高于对照组,表明6周WBVT可以改善FAI患者踝关节内外翻肌力。

徐珊珊^[23]开展类似研究,对照组进行常规功能训练(力量训练和平衡训练),实验组进行常规训练同时进行振动频率40 Hz、振幅4 mm的WBVT,结果发现8周WBVT训练后CAI患者内外翻相对峰力矩较对照组显著提升。

Tseng等^[24]观察24周的WBVT(振动频率25 Hz,振幅5 mm)对健康老年人下肢肌肉的影响,结果显示干预后下肢肌肉肌力显著增强,且受试者平衡能力也显著提升。贺慨等^[21]研究

WBVT(振动频率20~55 Hz,振幅2~6 mm)对踝关节肌力变化的影响,结果显示干预后踝关节屈肌群爆发力和肌肉耐力均显著提升。

分析肌力增强的原因主要是振动刺激作为一种外源性刺激,能促使中枢神经系统发出调节性指令,使潜在的运动单位进一步激活,这就使肌肉在实际的运动中能够募集到更多的运动单位,从而增大肌肉的收缩力量^[25]。而踝关节屈肌耐力的增长除了与更多的肌纤维被募集之外,还可能与中枢神经系统功能的改善有关。在振动刺激的作用下,运动中枢的兴奋与抑制过程更加集中,肌肉的收缩与放松更加协调;使肌肉活动的机械效率得以提高,节省能量消耗,进而保障了长时间的肌肉活动的能量供应,使肌肉耐力增强^[21]。踝关节周围肌群肌肉爆发力增强,利于CAI患者在应对干扰时肌肉快速收缩稳定关节,而肌肉耐力的提升,为长时间维持关节动态稳定提供了保障。

尽管多数研究结果显示WBVT对肌肉功能积极影响,但是汤晨曦^[26]研究却发现,8周WBVT(振动频率30~36 Hz,振幅2 mm)对CAI患者踝关节内翻、外翻、跖屈和背伸相对峰力矩均无显著影响。可能是由于振动参数设置的差异所致。目前尚未有直接证据证实长期WBVT对CAI患者踝关节周围肌群肌肉爆发力和肌肉耐力有积极影响,还有待进一步研究。

2.2 肌肉激活

慢性踝关节患者在神经肌肉控制上存在缺陷,踝关节肌肉激活和反应时与健康人群存在差异,由于这些缺陷的存在,导致患者在动态活动过程中反复扭伤踝关节^[27]。

目前研究多采用表面肌电图监测肌肉激活表现。Jeong等^[28]探索WBVT对肌肉激活的影响,研究者将30例CAI足球运动员随机分为WBVT组和神经肌肉训练组,WBVT组进行振动频率5~25 Hz、振幅3~6 mm的振动训练,结果发现经过6周干预后,WBVT组胫骨前肌、腓肠肌和腓骨长肌均方根值(root mean square, RMS)均较神经肌肉训练组提高明显。Roelants等^[29]研究也发现,振动频率35 Hz的WBVT可以增加腿部肌肉激活程度。分析认为,WBVT通过肌肉肌梭反射性募集和激活不活跃的运动单位,增加运动单位之间的同步性,从而增加肌肉激活程度。振动训练时,机械振动直接作用于肌肉,这刺激了肌肉肌梭上的运动末梢,增加了Ia传入神经元的活性,从而使高尔基肌腱器官(Golgi tendon organs, GTOs)的兴奋阈值降低^[30]。这有利于运动单位的募集和肌肉的激活。从而改善肌肉功能。

还有学者探索WBVT对CAI患者肌肉激活时间的影响。Sierra-Guzmán等^[31]将50例CAI患者随机分为WBVT组(振动频率30~40 Hz,振幅2~4 mm)、平衡训练组和对照组,WBVT组进行振动台上BOSU球平衡训练6周,平衡训练组仅进行BOSU球上平衡训练,对照组不进行任何干预,结果发现WBVT组患侧腓骨长肌及胫骨前肌的肌肉激活时间明显缩短,而其余两组均未发生显著改变。提示WBVT有助于提升患者快速激活踝周肌群肌肉的能力,这有利于患者在应对干扰时快速收缩

肌肉,从而稳定踝关节,防止扭伤。

2.3 姿势稳定性

CAI 患者常由于本体感觉缺失或神经肌肉控制缺陷导致姿势稳定性下降^[32]。这也是 CAI 患者动态活动时容易重复扭伤踝关节的原因之一。

近期的多数研究结果都显示,长期 WBVT 利于 CAI 患者姿势稳定性的提升。Sierra-Guzmán 等^[33]研究发现,CAI 患者在进行 6 周 WBVT (振动频率 30~40 Hz, 振幅为 2~4 mm)后, WBVT 结合 BOSU 组患者星形移动平衡测试(Star Excursion Balance Test, SEBT)和 Biodex 平衡系统(Biodex Balance System, BBS)测试结果均有显著改善,而 BOSU 球训练组仅 SEBT 得分显著提升。提示 WBVT 和 BOSU 球训练改善 CAI 患者姿势稳定性的机制并不一样,且疗效存在叠加效应。Cardinale 等^[34]认为, WBVT 可以增强肌梭 α 和 γ 运动神经元的敏感性和兴奋性。这些适应性改变可以减少踝关节稳定肌激活时间和运动单元兴奋阈值。

Cloak 等^[35]进行类似研究也有同样的发现,其研究结果显示 WBVT (振动频率 30~40 Hz)有助于提升单腿站立平衡成绩、SEBT 得分和单腿三级跳距离(Single-Leg Triple Hop for Distance, SLTHD),这表明干预后 CAI 患者静态和动态姿势稳定性均得到改善,且运动表现也显著提升。SLTHD 的增加可能是由于训练后下肢肌力增加所致。最近一篇 Meta 分析结果显示,长期进行 WBVT 可以显著提升老年人姿势稳定性^[36]。

也有学者探索 WBVT 对 CAI 患者姿势稳定性的即刻效果,结果发现 WBVT 对姿势稳定性并无即刻疗效。分析认为研究中样本量较少,且干预时间较短,是造成即刻效应不显著的原因之一。由于目前相关研究较少, WBVT 的即刻疗效还有待进一步研究加以证实。

2.4 其他

近年来,也有学者关注 WBVT 对 CAI 患者本体感觉的影响。然而,从目前的研究结果来看, WBVT 对 CAI 患者本体感觉并没有即刻疗效。Otzet 等^[37]比较 CAI 患者和健康人群在接受 WBVT (振动频率 35 Hz, 振幅 4 mm)后关节位置觉变化,结果发现 CAI 组和健康组关节位置觉干预前后均无显著性差异。Pollock 等^[38]和 Hannah 等^[39]进行类似研究也得到同样的结论。然而 Trans 等^[40]却发现,进行 8 周 WBVT (振动频率 25~30 Hz)可以显著提高膝关节本体感觉。分析即刻疗效不显著的原因可能是由于振动治疗时间较短,不足以引起踝关节本体感受器发生适应性改变。目前尚未有研究探索长期 WBVT 对 CAI 患者本体感觉的影响。

还有学者发现, WBVT 可以改善 CAI 患者踝关节背屈活动范围。Jin 等^[41]观察为期 4 周的不同振动频率(10 Hz、20 Hz 和 25 Hz) WBVT 对 CAI 患者踝关节活动度的影响,结果显示患者踝背屈活动度明显改善,且发现不同频率的治疗方案疗效有所差异。疗效机制可能是 WBVT 所产生的机械刺激可以在进行踝关节背屈活动时增加距骨向后滑动范围,以恢复正常的关节

生理运动。也有研究表明 WBVT 可以使关节周围肌肉温度升高^[42],同时疼痛阈值提高^[43-44],这些改变也可能与关节活动度改善有关。

3 WBVT 参数设置

尽管不少研究表明 WBVT 对 CAI 患者的肌肉力量、肌肉激活及姿势稳定性等有一定的积极促进作用,但各研究中所采用的振动参数设置还不统一,其中频率多集中在 25~40 Hz, 振幅 2~4 mm。

振动刺激可以通过多种方式(包括改变振幅、频率和持续时间)发生变化,从而产生不同的效果^[45]。当 WBVT 振动频率小于 20 Hz 时容易发生共振现象,对人体有害^[46];随着 WBVT 的频率增高,可募集运动单位的潜伏期缩短,更容易引起肌肉收缩^[47]。一般来说,当频率大于 20 Hz 时就可以诱发肌肉等张收缩^[48]。Pollock 等^[49]在研究 WBVT 对腿部肌肉影响时,发现使用较高的频率和振幅可以增加肌肉活动,并减少产生不良影响的可能性。当然,过高的频率和振幅也不利于患者的康复。Munera 等^[50]指出,由于共振信号的放大,踝关节疾病患者应避免过高频率(共振峰值为 44 Hz)的 WBVT。还有系统评价指出^[51],使用频率在 12~45 Hz 之间,振幅在 1.7~5 mm 之间的振动刺激,更利于腿部肌肉功能提升。

此外,治疗方案还应该不断对振动刺激参数进行调整,以避免神经肌肉系统的适应性^[52]。诸多研究中 WBVT 频率以及振幅的设置均采用逐级递增(振动频率每 2 周增加 5 Hz; 振幅第 1 周 2 mm,此后逐渐增加到 4 mm)的方式,从而进一步提升训练效果。频率和振幅的适当变化将更有效地改善肌肉活动。

4 小结

WBVT 作为一种非侵入性运动治疗手段,在运动医学和康复领域均得到广泛应用。本研究对其在治疗慢性踝关节不稳方面的应用现状进行综述,证实长期 WBVT 可以增强 CAI 患者的踝关节周围肌肉力量,改善肌肉激活缺陷,提高患者姿势稳定性。关于 WBVT 的即刻效应尚缺乏证据支持,且现阶段其疗效机制还不明确。WBVT 对踝关节本体感觉以及关节活动度的影响少有文章报道,确切疗效有待进一步研究。对 CAI 患者的振动刺激方案基本明确,但也应遵循因人而异、循序渐进的治疗原则加以应用。

目前少有研究比较 WBVT 与其他治疗手段疗效差异。多数研究证实,在传统功能训练的基础上联合 WBVT,可进一步提升临床疗效。现阶段研究中还存在着样本量不足、缺乏随机对照的问题,可能会对研究结果造成偏倚。因而,今后应进一步开展高质量研究以明确 WBVT 治疗 CAI 的即刻疗效和长期随访疗效,并积极探索其治疗机制,为其临床应用提供更多理论依据。

【参考文献】

- [1] Kobayashi T, Gamada K. Lateral ankle sprain and chronic ankle instability: a critical review [J]. Foot Ankle Spec, 2014, 7

- (4): 298-326.
- [2] Doherty C, Delahunt E, Caulfield B, et al. The Incidence and prevalence of ankle sprain injury: a systematic review and meta-analysis of prospective epidemiological studies [J]. Sports Med, 2014, 44(1): 123-140.
- [3] Doherty C, Bleakley C, Hertel J, et al. Dynamic balance deficits in individuals with chronic ankle instability compared to ankle sprain copers 1 year after a first-time lateral ankle sprain injury [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2016, 24(4): 1086-1095.
- [4] Doherty C, Bleakley C J, Hertel J, et al. Locomotive biomechanics in persons with chronic ankle instability and lateral ankle sprain copers [J]. J Sci Med Sport, 2016, 19(7): 524-530.
- [5] Valderrabano V, Hintermann B, Horisberger M, et al. Ligamentous posttraumatic ankle osteoarthritis [J]. Am J Sports Med, 2006, 34(4): 612-620.
- [6] Gribble P A, Bleakley C M, Caulfield B M, et al. Evidence review for the 2016 International Ankle Consortium consensus statement on the prevalence, impact and long-term consequences of lateral ankle sprains [J]. Br J Sports Med, 2016, 50(24): 1496-1505.
- [7] Hass C J, Bishop M D, Doidge D, et al. Chronic ankle instability alters central organization of movement [J]. Am J Sports Med, 2010, 38(4): 829-834.
- [8] 汤宇. 慢性踝关节不稳定治疗新进展[J]. 中国康复理论与实践, 2008, 14(5): 449-451.
- [9] Huang M, Liao L R, Pang M Y. Effects of whole body vibration on muscle spasticity for people with central nervous system disorders: a systematic review [J]. Clin Rehabil, 2017, 31(1): 23-33.
- [10] 王雪强, 胡浩宇, 郑依莉, 等. 全身振动训练治疗腰痛的研究进展 [J]. 中国康复医学杂志, 2018, 33(9): 1113-1117.
- [11] 王朴, 季侨丹, 刘遛, 等. 全身振动治疗对膝骨性关节炎作用效果的研究进展 [J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(3): 362-366.
- [12] 李哲, 赵玉敏, 郭钢花, 等. 全身振动训练对脑卒中患者躯干肌痉挛的影响 [J]. 中国康复医学杂志, 2015, 30(8): 798-800.
- [13] Alizadeh-Meghbrazi M, Masani K, Zariffa J, et al. Effect of whole-body vibration on lower-limb EMG activity in subjects with and without spinal cord injury [J]. J Spinal Cord Med, 2014, 37(5): 525-536.
- [14] Dionello C F, Sá-Caputo D, Pereira H V, et al. Effects of whole body vibration exercises on bone mineral density of women with postmenopausal osteoporosis without medications: Novel findings and literature review [J]. J Musculoskeletal Neuronal Interact, 2016, 16(3): 193-203.
- [15] Choi S J, Shin W S, Oh B K, et al. Effect of training with whole body vibration on the sitting balance of stroke patients [J]. J Phys Ther Sci, 2014, 26(9): 1411-1414.
- [16] Cochrane D J. The potential neural mechanisms of acute indirect vibration [J]. J Sports Sci Med, 2011, 10(1): 19-30.
- [17] 王雨晗, 卜淑敏, 汪建红. 全身振动对去卵巢骨质疏松大鼠骨髓细胞 p-GSK3 β 蛋白表达的调节作用 [J]. 生理学报, 2013, 65(2): 165-170.
- [18] Marín P J, García-Gutiérrez M T, Da Silva-Grigoletto M E, et al. The addition of synchronous whole-body vibration to battling rope exercise increases skeletal muscle activity [J]. J Musculoskeletal Neuronal Interact, 2015, 15(3): 240-248.
- [19] Naito E, Kinomura S, Geyer S, et al. Fast reaction to different sensory modalities activates common fields in the motor areas, but the anterior cingulate cortex is involved in the speed of reaction [J]. J Neurophysiol, 2000, 83(3): 1701-1709.
- [20] Kaminski T W, Hartsell H D. Factors contributing to chronic ankle instability: a strength perspective [J]. J Athl Train, 2002, 37(4): 394-405.
- [21] 贺慨, 尹军. 全身振动力量训练对踝关节肌力变化的影响 [J]. 首都体育学院学报, 2011, 23(5): 469-473.
- [22] Aminianfar A, Hedayati R, Bagheri P, et al. Effects of whole body vibration on concentric torque of ankle invertor and evertor muscles in people with functional ankle instability [J]. Koo-mesh, 2016, 18(2): 286-294.
- [23] 徐珊珊. 机械振动结合短时间小强度康复训练对功能性踝关节不稳的影响 [D]. 武汉: 武汉体育学院, 2018.
- [24] Tseng S Y, Lai C L, Chang K L, et al. Influence of whole-body vibration training without visual feedback on balance and lower-extremity muscle strength of the elderly: a randomized controlled trial [J]. Medicine, 2016, 95(5): e2709.
- [25] 彭春政, 危小焰. 振动刺激与肌肉力量 [J]. 中国运动医学杂志, 2004, 23(6): 708-710.
- [26] 汤晨曦. 同振幅递进频率全身振动训练对功能性踝关节不稳的影响 [D]. 成都: 成都体育学院, 2017.
- [27] 裴子文, 孟宪梅, 杨建强, 等. 慢性踝关节不稳患者下肢肌肉激活特征研究现状 [J]. 中国康复理论与实践, 2018, 24(6): 678-681.
- [28] Jeong Y S, Kim J H. Effects of whole body vibration exercise on lower extremity muscle activity and balance ability in football player with chronic ankle instability [J]. J Kor Phys Ther, 2017, 29(6): 293-298.
- [29] Roelants M, Verschueren S M, Delecluse C, et al. Whole-body-vibration-induced increase in leg muscle activity during different squat exercises [J]. J Strength Cond Res, 2006, 20(1): 124-129.

- [30] Burke D, Hagbarth K E, Löfstedt L, et al. The responses of human muscle spindle endings to vibration during isometric contraction [J]. *J Physiol*, 1976, 261(3): 695-711.
- [31] Sierra-Guzmán R, Jiménez J F, Ramírez C, et al. Effects of synchronous whole body vibration training on a soft, unstable surface in athletes with chronic ankle instability [J]. *Int J Sports Med*, 2017, 38(6): 447-455.
- [32] Arnold B L, De La Motte S, Linens S, et al. Ankle instability is associated with balance impairments: a meta-analysis [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2009, 41(5): 1048-1062.
- [33] Sierra-Guzmán R, Jiménez J F, Ramírez C, et al. Whole-body-vibration training and balance in recreational athletes with chronic ankle instability [J]. *J Athl Train*, 2018, 53(4): 355-363.
- [34] Cardinale M, Bosco C. The use of vibration as an exercise intervention [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2003, 31(1): 3-7.
- [35] Cloak R, Nevill A, Day S. Six-week combined vibration and wobble board training on balance and stability in footballers with functional ankle instability [J]. *Clin J Sport Med*, 2013, 23(5): 384-391.
- [36] Rogan S, Taeymans J, Radlinger L, et al. Effects of whole-body vibration on postural control in elderly: an update of a systematic review and meta-analysis [J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2017, 73: 95-112.
- [37] Otzel D M, Hass C J, Wikstrom E A, et al. Motoneuron function does not change following whole-body vibration in individuals with chronic ankle instability [J]. *J Sport Rehabil*, 2019-02-14: 1-9. doi: 10.1123/jsr.2017-0364. [Epub ahead of print].
- [38] Pollock R D, Provan S, Martin F C, et al. The effects of whole body vibration on balance, joint position sense and cutaneous sensation [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2011, 111(12): 3069-3077.
- [39] Hannah R, Minshull C, Folland J P. Whole-body vibration does not influence knee joint neuromuscular function or proprioception [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2013, 23(1): 96-104.
- [40] Trans T, Aaboe J, Henriksen M, et al. Effect of whole body vibration exercise on muscle strength and proprioception in females with knee osteoarthritis [J]. *Knee*, 2009, 16(4): 256-261.
- [41] Jin Y S, Choi Y H, Shim J K, et al. Effect of whole body vibration stimulation according to various frequencies on ankle instability, ankle range of motion and balance ability in adult with chronic ankle instability [J]. *Korean Soc Phys Med*, 2018, 13(1): 63-72.
- [42] Sands W A, McNeal J R, Stone M H, et al. Flexibility enhancement with vibration: acute and long-term [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2006, 38(4): 720-725.
- [43] Ribot-Ciscar E, Rossi-Durand C, Roll J P. Muscle spindle activity following muscle tendon vibration in man [J]. *Neurosci Lett*, 1998, 258(3): 147-150.
- [44] Kerschman-Schindl K, Grampp S, Henk C, et al. Whole-body vibration exercise leads to alterations in muscle blood volume [J]. *Clin Physiol*, 2001, 21(3): 377-382.
- [45] Torvinen S, Kannus P, Sievänen H, et al. Effect of 8-month vertical whole body vibration on bone, muscle performance, and body balance: a randomized controlled study [J]. *J Bone Miner Res*, 2003, 18(5): 876-884.
- [46] Cardinale M, Wakeling J. Whole body vibration exercise: are vibrations good for you? [J]. *Br J Sports Med*, 2005, 39(9): 585-589.
- [47] Karacan I, Cidem M, Cidem M, et al. Whole-body vibration induces distinct reflex patterns in human soleus muscle [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2017, 34: 93-101.
- [48] Baumbach S F, Fasser M, Polzer H, et al. Study protocol: the effect of whole body vibration on acute unilateral unstable lateral ankle sprain: a biphasic randomized controlled trial [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2013, 14(1): 22-30.
- [49] Pollock R D, Woledge R C, Mills K R, et al. Muscle activity and acceleration during whole body vibration: effect of frequency and amplitude [J]. *Clin Biomech*, 2010, 25(8): 840-846.
- [50] 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.
- [51] Rehn B, Lidström J, Skoglund J, et al. Effects on leg muscular performance from whole-body vibration exercise: a systematic review [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2007, 17(1): 2-11.
- [52] Torvinen S, Kannu P, Sievänen H, et al. Effect of a vibration exposure on muscular performance and body balance. Randomized cross-over study [J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2002, 22(2): 145-152.

(收稿日期:2019-02-01 修回日期:2019-04-23)