

- duction of GFAP in Schwann cells [J]. *Glia*, 2009, 57 (10): 1130-1142.
- [43] Peters TL, Fang F, Weibull CE, *et al.* Severe head injury and amyotrophic lateral sclerosis [J]. *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener*, 2013, 14 (4): 267-272.
- [44] Watanabe Y, Watanabe T. Meta-analytic evaluation of the association between head injury and risk of amyotrophic lateral sclerosis [J]. *European Journal of Epidemiology*, 2017, 32 (10): 867-879.
- [45] Fernández-Trapero M, Espejo-Porras F, Rodríguez-Cueto C, *et al.* Upregulation of CB₂ receptors in reactive astrocytes in canine degenerative myelopathy, a disease model of amyotrophic lateral sclerosis [J]. *Disease Models & Mechanisms*, 2017, 10 (5): 551-558.
- [46] Benninger F, Glat MJ, Offen D, *et al.* Glial fibrillary acidic protein as a marker of astrocytic activation in the cerebrospinal fluid of patients with amyotrophic lateral sclerosis [J]. *Journal of Clinical Neuroscience*, 2016 (26): 75-78.
- [47] Mondello S, Jeromin A, Buki A, *et al.* Glial neuronal ratio: A novel index for differentiating injury type in patients with severe traumatic brain injury [J]. *Journal of Neurotrauma*, 2012, 29 (6): 1096-1104.
- [48] Hsu ET, Gangolli M, Su S, *et al.* Astrocytic degeneration in chronic traumatic encephalopathy [J]. *Acta Neuropathologica*, 2018, 136 (6): 955-972.

(收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2020-12-08)

振动性骨骼肌损伤的研究进展

李佳宣^{1,2}, 林立 (审校)^{1,2}

(1. 潍坊医学院公共卫生学院, 山东 潍坊 261053; 2. 济宁医学院职业卫生与环境医学重点实验室)

摘要: 职业性手臂振动病 (HAVD) 指作业工人长期从事手传振动作业而引起的职业性疾患, 主要包括手臂部的循环、神经及骨骼肌功能的损伤。目前, 振动对骨骼肌功能的影响越来越受到重视, 研究振动性骨骼肌损伤 (VSMI) 发病机制是防治职业性 HAVD 的重要内容。本文结合国内外相关文献, 对 VSMI 的病理改变、电生理研究、发生机制、临床诊断与防治以及研究方向等进行简要分析。

关键词: 振动性骨骼肌损伤 (VSMI); 肌肉骨骼疾患 (MSD); 手臂振动病 (HAVD); 进展

中图分类号: R994.3 文献标识码: A 文章编号: 1002-221X(2021)04-0325-04 DOI: 10.13631/j.cnki.zggyyx.2021.04.013

Research progress of vibration-induced skeletal muscle injury

LI Jia-xuan, LIN Li

(School of Public Health, Weifang Medical University, Weifang 261053, China/Key Laboratory of Occupational Health and Environmental Medicine, Jining Medical University, China)

Abstract: Occupational hand-arm vibration disease (HAVD) refers to the occupational disease caused by long-term hand-transmitted vibration operation, mainly including the injuries in functions of circulation, nerve system, skeletal muscle, etc. At present, more and more attention has been paid to the effect of vibration-induced skeletal muscle injury (VSMI), and the explore of pathogenesis of skeletal muscle impairment has become a research hotspot in the prevention and treatment of occupational HAVD. In this paper, the research progresses of VSMI were briefly reviewed and analyzed especially in pathologic changes, electrophysiological study, molecular mechanism, clinical diagnosis, treatment, prevention and research fields in future.

Keywords: vibration-induced skeletal muscle injury (VSMI); musculoskeletal disorders (MSD); hand-arm vibration disease (HAVD); progress

振动性骨骼肌损伤 (vibration-induced skeletal muscle injury, VSMI) 是指作业工人长期从事手传振动作业而引起的上肢骨骼肌损伤, 是手臂振动病 (hand-arm vibration disease, HAVD) 的重要表现之一, 主要表现为上肢特别是手部肌无力、骨骼肌萎缩, 严重者可出现手部骨骼肌挛缩, 呈现“鹰爪样”畸形, 导致手部功能的完全丧失^[1,2], 严重影响作业工人的工作和生活。本文结合国内外研究的相关文献, 对

VSMI 的研究进展进行简要概述。

1 VSMI 病理学研究

骨骼肌损伤的一般病理改变主要表现为肌纤维膜下的细胞核增生、纤维萎缩、透明化、空泡化、肌纤维纹消失和纤维群萎缩等, 电镜观察可见骨骼肌细胞肿胀、肌丝解离、Z 线改变、线粒体形状改变和数量增加、肌膜增厚、糖原颗粒空泡化等现象^[3]。有学者进一步研究了振动参数与 VSMI 改变的关系, 发现振动频率 120 Hz、振幅 0.3 mm 对骨骼肌组织有强直作用, 会产生传入冲动而致骨骼肌纤维自发的紧张性收缩, 可能导致骨骼肌组织无法适应而造成骨骼肌功能的下降^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81273042)

作者简介: 李佳宣 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 卫生毒理学。

通信作者: 林立, 教授, E-mail: linli6711@sina.com

Kostyshyn 等^[5]对大鼠进行振动负荷实验发现,在振动加速度 $>1.25 \text{ m/s}^2$ 、振动频率 $>25 \text{ Hz}$ 、振幅 2 mm 的条件下,骨骼肌纤维横向张力逐渐丧失,肌细胞进行性损伤,表现为核溶解、收缩、碎裂,肌纤维部分或完全解离成单独的细丝,并出现灶性或广泛的淋巴细胞浸润;在实验的第 56 天出现肌纤维代偿性和适应性反应,表现为病理性肌纤维肥大,肌纤维紧密排列,而肌纤维增大及骨骼肌间隙减少又导致血液灌注降低,影响骨骼肌代谢,使骨骼肌组织出现明显的炎症反应。

解霜雁等^[6]以家兔为实验对象,在 4 h 等能量频率计加权加速度有效值 17.34 m/s^2 的振动强度下连续进行振动负荷实验 45 d 后,家兔后肢骨骼肌肌纤维结构成不规则状态, H 带呈锯齿状,严重者出现肌纤维 Z 线、M 线以及肌节分界消失,明暗带模糊, T 管系扩张等;骨骼肌的亚细胞结构也发生改变,以线粒体的表现较为明显,出现线粒体灶性聚集、核周线粒体嵴缺失、嵴膜损伤、内膜变形,内质网断裂,细胞核固缩,其内充满高密度物质等;同时线粒体融合及分裂基因表达失衡并导致线粒体能量代谢异常,提示线粒体可能是骨骼肌损伤的主要靶点之一^[7,8]。

2 VSMI 电生理研究

肌电图 (EMG) 是目前最常用的检测 VSMI 的方法。Suzuki 等^[9]研究发现,接触振幅 $0.4 \sim 2.0 \text{ mm}$ 的振动刺激后,在桡侧腕伸肌 (ECR) 的 EMG-A 中产生的峰值比接触电刺激产生的峰值更高、持续时间更长。通过评估振动对骨骼肌的影响发现,振动刺激可以在短时间内引起骨骼肌疲劳而影响工人的工作效率。Fattorini 等^[10]通过测定 ECR 和尺侧腕屈肌 (FCU) 表面 EMG 发现,EMG 中位数频率 (MDFd) 的衰减趋势可被用作振动引起骨骼肌疲劳的指标;当振动频率为 33 Hz (手臂系统的共振频率) 时,短时间内接触振动即可引起骨骼肌疲劳。Mosier 等^[11]对健康人群振动作用下骨骼肌疲劳原因的研究发现,接触振动后运动神经元 (MU) 的放电速率增高,导致骨骼肌纺锤体功能下降,骨骼肌疲劳和无力。

3 VSMI 发生机制

一般认为,VSMI 可能是振动所致上肢周围神经功能紊乱的结果。振动可导致上肢运动神经损伤,造成其所支配的骨骼肌功能下降。Alvarez 等^[12]研究发现,高强度的振动会使骨骼肌痛觉过敏,并伴有腓肠肌中 IL-6 水平升高和背根神经节中 Kv1.4 表达下降。Conner 等^[13]研究显示,腓肠肌因振动作用出现骨骼肌痛觉过敏的同时,电压门控钾离子通道 Kv4.3 显著下调,后者可影响背神经节中受影响的神经功能。因此,Kv1.4 和 Kv4.3 表达下降可能是感觉神经功能紊乱影响骨骼肌功能的两个关键点,也可能是治疗 HAVD 的潜在分子靶标。

目前也有研究认为,高强度的振动可直接作用于骨骼肌,可能通过其他因素的参与导致骨骼肌损伤^[14]。

3.1 生化因子改变与 VSMI 肌酸激酶 (CK) 能催化肌酸和腺苷三磷酸 (ATP) 生成磷酸肌酸和腺苷二磷酸,CK 在体内通

常有 3 个同工酶,其中肌酸激酶 M 型 (CK-MM) 主要存在于骨骼肌中;乳酸脱氢酶 (LDH) 是一种糖酵解酶,能催化丙酮酸生成乳酸,存在于包括骨骼肌在内的许多组织中。林立等^[15]研究发现,接振组家兔 CK 与 LDH 总活力出现异常升高,其中 CK-MM 活力升高最明显;而骨骼肌组织中 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATP}$ 酶、 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{ATP}$ 酶活力降低。高强度的振动可造成与骨骼肌损伤相关生化酶的改变,并可能是 VSMI 的早期指标。

血管内皮素 (ET) 是迄今已知体内最强、最持久的缩血管物质,通过一氧化氮受体 (NOS) 合成释放的一氧化氮 (NO) 则具有舒张血管的作用。正常生理状态下,ET 与 NO 处于动态平衡状态,共同维持血管的舒缩功能。林立等^[16]研究发现,不同强度振动负荷实验组家兔骨骼肌组织中内皮素受体 (ETR) mRNA 表达增强,提示 ET 含量升高,从而打破 ET 与 NO 的动态平衡,造成血管收缩、骨骼肌组织缺血缺氧而受损。

Bodienkova 等^[17]采用酶联免疫法测定 VSMI 患者血清细胞因子 (IL-1 β 、IL-8、IL-10) 水平和热休克蛋白 (HSP70) 的含量,结果显示,IL-1 β 、IL-10 水平降低,IL-8 水平升高,HSP70 细胞外浓度降低,提示上述细胞因子及 HSP70 参与了 VSMI 的免疫炎症过程,可将其作为 VSMI 的早期敏感指标。

3.2 线粒体损伤与 VSMI 线粒体是保证骨骼肌功能的重要因素。解霜雁等^[6]研究发现,家兔在振动负荷实验后,骨骼肌线粒体一方面发生形态学改变,另一方面线粒体呼吸链酶活力明显降低,以 ATP 供能为基础的骨骼肌组织中 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATP}$ 酶、 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{ATP}$ 酶活力均降低,提示线粒体能量代谢及功能的异常可能是 VSMI 的重要机制。此外,我们新近研究发现,高强度振动会影响线粒体融合与分裂基因 mRNA 的表达,从而破坏线粒体融合/分裂的动态平衡,导致线粒体形态功能改变和供能不足,影响骨骼肌功能而致肌肉受损。有关振动所致骨骼肌线粒体融合/分裂的失衡机制及其在 VSMI 发生中的确切机制尚待进一步研究。

3.3 细胞凋亡与 VSMI Calpain 是机体内普遍存在的钙激活蛋白酶,目前研究最多的是 2 个诱导细胞发生凋亡的同工酶,即 Calpain 1 和 Calpain 2。该蛋白酶对维护正常生理功能至关重要,其含量的异常变化会导致细胞凋亡。张兆强等^[18]依据 4 h 等能量频率计加权加速度有效值将新西兰大白兔随机分组,后肢接振 45 d 后,采用实时荧光定量聚合酶链式反应 (RT-qPCR) 检测骨骼肌组织 Calpain1 mRNA 和 Calpain 2 mRNA 的表达情况。结果发现,低、中、高振动强度组 Calpain1 mRNA 的相对含量明显高于对照组。Calpain1 mRNA 表达增强,其原因可能与振动所致骨骼肌组织中 ATP 酶活力下降、细胞内 Ca^{2+} 超载,进而激活 Calpain 酶原等因素有关,Calpain mRNA 表达增强可能通过诱导骨骼肌细胞凋亡增强而影响骨骼肌系统的功能。

4 手传振动 (HTV) 与肌肉骨骼疾患 (MSD)

肌肉骨骼疾患 (musculoskeletal disorders, MSD) 是一类因接触工作场所中的危险因素所引起的肌肉、骨骼、神经及

局部血液循环系统的损伤,严重影响劳动者的健康和工作效率。

4.1 振动性 MSD 的发生概况 当前,MSD 的患病率逐年增高,长期接触振动工具是造成 MSD 的重要危险因素,其他相关危险因素包括强迫体位、用力不当等,振动性 MSD 的主要发病部位在手腕/手臂部、腰背部等^[19]。Descatha 等^[20]通过横断面研究表明,振动暴露、繁重的体力劳动以及工龄>10 年等都会增加发生 MSD 的风险。Bovenzi 等^[21]对暴露 HTV 作业工人的纵向研究发现,随着振动暴露的增加,肘部/前臂(9%~43%)和腕部/手部(17%~36%)的 MSD 发生率增高,且 HTV 暴露与肘部/前臂(*OR* 值 1.10~1.23)、腕部/手部(*OR* 值 1.34~1.38) MSD 存在显著的暴露-反应关系。Roseiro 等^[22]研究发现,持续振动和重复运动是导致 MSD 的重要危险因素,而瞬时高强度振动会导致更严重的 MSD。

4.2 振动性 MSD 的相关影响因素

4.2.1 振动参数 影响振动强弱的最重要因素,主要包括振动加速度和振动频率。许多行业作业工具的振动加速度远超标准规定,如 Hao 等^[23]对割草机手柄的测量发现,手柄的振动加速度为 11.30 m/s²,远超 5.0 m/s²的暴露极限值,极易引起肌肉疲劳,增加发生 MSD 风险^[24]。Nasaruddin 等^[25]认为,当振动工具的振动加速度>2.5 m/s²时,对骨骼肌损伤逐渐加重,与 MSD 的发生率正相关。Fan 等^[19]发现,长期暴露于低频振动更易引发 MSD,且在相同的振动时间下,共振频率产生的振动危害更为严重。Xu 等^[26]和 Kocielek 等^[27]的研究也证实,当振动频率与手臂部(7~12 Hz)、肩部(7~9 Hz)和颈部(6~7 Hz)的共振频率一致时,可增加发生 MSD 的风险。

4.2.2 其他因素 个体、环境、社会心理因素等也是振动所致 MSD 的影响因素。有研究显示^[28],长期接触振动作业工具且患 2 型糖尿病的工人更易发生 MSD。Herin 等^[29]研究发现,强迫体位和长期接触振动工具更易引发女性的手臂部和下背部疼痛,在用力不当的情况下使用振动工具则易引发男性的颈部/肩部疼痛。女性接触振动后手臂部疼痛的发生率明显高于男性,因此在评估振动所致 MSD 时应考虑性别因素。另有研究发现^[30,31],工龄>10 年、年龄>45 岁的振动作业工人中,吸烟女性更易发生 MSD。Gorbanev 等^[32]对俄罗斯北极地区矿工进行的问卷调查发现,寒冷或低温、恶劣的生产环境、高工龄及长期接触局部振动可能对发生 MSD 产生联合作用。近几年在我国南方一些亚热带地区也出现了较多 HAVD 的病例^[33],甚至在一些热带地区的国家(如马来西亚)HAVD 患者 MSD 的患病率高达 44.5%^[34]。提示寒冷环境可能只是诱发因素,高强度振动是 MSD 发病的决定因素。另外,长期从事振动作业的工人,其工作负荷和心理负担越大,MSD 的患病率越高^[35]。

5 VSMI 诊断及防治

目前 VSMI 最常用的检测方法是 EMG。骨骼肌损伤的直接表现为手部肌力降低,因此手部肌力测试也常被用于 VSMI 的诊断,包括手握强度(HGS)、手指捏合强度(FPS)和普

度钉板测验(PPT)^[36,37]。Mahbub 等^[38]认为,PPT 对评估骨骼肌灵活性受损可能更具诊断价值。目前尚无专门针对 VSMI 的治疗方法,一般通过休息、促进骨骼肌血液循环和新陈代谢等常规康复方法进行治疗和功能恢复^[39]。Dina 等^[40]研究发现,细胞因子(TNF- α)和第二信使蛋白激酶 Cepsilon 可以抑制振动(60~80 Hz)在骨骼肌中诱发的急性机械痛过敏,认为二者可以作为治疗和预防 VSMI 的靶点。减少振动作业时间、降低振动强度、纠正振动作业时的强迫体位、降低振动作业时的噪声强度等是预防 MSD 发生的基本措施^[41]。

总之,VSMI 的相关研究虽然取得了一定的成果,但是关于 VSMI 发生的分子机制、VSMI 与振动性神经损伤之间的关系、较大规模的 VSMI 职业卫生调查、不同振动作业工种 VSMI 的流行病学特征、VSMI 的生物标志物研究及其在诊断中的意义、针对 VSMI 的早期干预措施及治疗方法等相关问题,均需进一步的研究。

参考文献

- [1] Raju SG, Rogness O, Persson M, *et al.* Vibration from a riveting hammer causes severe nerve damage in the rat tail model [J]. *Muscle Nerve*, 2011, 44 (5): 795-804.
- [2] Lee TH. Endurance time, muscular activity and the hand/arm tremor for different exertion forces of holding [J]. *Int J Occup Saf Ergon*, 2016, 22 (1): 71-76.
- [3] Birchmeier T, Lisee C, Kane K, *et al.* Quadriceps muscle size following ACL injury and reconstruction: A systematic review [J]. *J Orthop Res*, 2020, 38 (3): 598-608.
- [4] Krajnak K, Riley DA, Wu J, *et al.* Frequency-dependent effects of vibration on physiological systems: Experiments with animals and other human surrogates [J]. *Ind Health*, 2012, 50 (5): 343-353.
- [5] Kostyshyn NM, Kostyshyn LP, Servetnyk MI, *et al.* The peculiarities of remodelling muscle tissue of under vibration influence [J]. *Makedon Akad Nauk Umet Odd Med Nauki*, 2019, 40 (1): 59-65.
- [6] 解霜雁,林立,邵华. 振动对家兔骨骼肌线粒体呼吸链酶及 ATP 酶活力的影响 [J]. *济宁医学院学报*, 2019, 42 (1): 15-18, 23.
- [7] Sorrentino V, Menzies KJ, Auwerx J. Repairing mitochondrial dysfunction in disease [J]. *Annu Rev Pharmacol Toxicol*, 2018, 58 (1): 353-389.
- [8] Russell AP, Foletta VC, Snow RJ, *et al.* Skeletal muscle mitochondria: A major player in exercise, health and disease [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2014, 1840 (4): 1276-1284.
- [9] Suzuki K, Ogawa K, Sato T, *et al.* Facilitation from hand muscles innervated by the ulnar nerve to the extensor carpi radialis motoneurone pool in humans: A study with an electromyogram-averaging technique [J]. *J Clin Neurophysiol*, 2012, 29 (5): 472-476.
- [10] Fattorini L, Tirabasso A, Lunghi A, *et al.* Muscular forearm activation in hand-grip tasks with superimposition of mechanical vibrations [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2016 (26): 143-148.
- [11] Mosier EM, Herda TJ, Trevino MA, *et al.* The influence of prolonged vibration on motor unit behavior [J]. *Muscle Nerve*, 2017, 55 (4): 500-507.

- [12] Alvarez P, Bogen O, Levine JD. Interleukin 6 decreases nociceptor expression of the potassium channel Kv1.4 in a rat model of hand-arm vibration syndrome [J]. *Pain*, 2019, 160 (8): 1876-1882.
- [13] Conner LB, Alvarez P, Bogen O, *et al.* Role of Kv4.3 in vibration-induced muscle pain in the rat [J]. *J Pain*, 2016, 17 (4): 444-450.
- [14] Bovenzi M, Prodi A, Mauro M. A longitudinal study of neck and upper limb musculoskeletal disorders and alternative measures of vibration exposure [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2016, 89 (6): 923-933.
- [15] 林立, 张兆强, 张春芝. 后肢接振对家兔后肢骨骼肌组织生化酶活力的影响 [J]. *济宁医学院学报*, 2016, 39 (4): 234-236.
- [16] 林立, 张兆强, 聂继池, 等. 后肢接振对家兔脑及肌肉组织内皮素受体 mRNA 水平的影响 [J]. *环境与职业医学*, 2016, 33 (8): 771-774.
- [17] Bodienkova GM, Kurchevko SI. Evaluation of cytokines and heat shock protein in vibration disease [J]. *Medical Immunology (Russia)*, 2018, 20 (6): 895-898.
- [18] 张兆强, 张春芝, 聂继池, 等. 后肢接振对家兔脑和骨骼肌组织中 Calpain mRNA 表达的影响 [J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2016, 34 (6): 443-446.
- [19] Fan RX, Liu J, Li YL, *et al.* Finite element investigation of the effects of the low-frequency vibration generated by vehicle driving on the human lumbar mechanical properties [J]. *Biomed Res Int*, 2018 (2018): 7962414.
- [20] Descatha A, Bodin J, Ha C, *et al.* Heavy manual work, exposure to vibration and Dupuytren's disease? Results of a surveillance program for musculoskeletal disorders [J]. *Occup Environ Med*, 2012, 69 (4): 296-299.
- [21] Bovenzi M, Prodi A, Mauro M. A longitudinal study of neck and upper limb musculoskeletal disorders and alternative measures of vibration exposure [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2016, 89 (6): 923-933.
- [22] Roseiro LM, Paulino MF, Neto MA, *et al.* Analysis of hand-arm vibration syndrome in drummers [J]. *Int J Ind Ergonom*, 2018 (66): 110-118.
- [23] Hao KY, Ean OL, Ripin ZM, *et al.* The design and development of suspended handles for reducing hand-arm vibration in petrol driven grass trimmer [J]. *Int J Ind Ergonom*, 2011, 41 (5): 459-470.
- [24] Kim E, Freivalds A, Takeda F, *et al.* Ergonomic evaluation of current advancements in blueberry harvesting [J]. *Agronomy-Basel*, 2018, 8 (11): 266-283.
- [25] Nasaruddin A, Tamrin SBM, Karupiah K. The prevalence of musculoskeletal disorder and the association with risk factors among auto repair mechanics in Klang Valley, Malaysia [J]. *Iran J Public Health*, 2014, 43 (suppl.3): 34-41.
- [26] Xu XS, Dong RG, Welcome DE, *et al.* Vibrations transmitted from human hands to upper arm, shoulder, back, neck, and head [J]. *Int J Ind Ergon*, 2017 (62): 1-12.
- [27] Kociolek AM, Lang AE, Trask CM, *et al.* Exploring head and neck vibration exposure from quad bike use in agriculture [J]. *Int J Ind Ergon*, 2018 (66): 63-69.
- [28] Dalbøge A, Frost P, Andersen JH, *et al.* Surgery for subacromial impingement syndrome in relation to occupational exposures, lifestyle factors and diabetes mellitus: A nationwide nested case-control study [J]. *Occup Environ Med*, 2017, 74 (10): 728-736.
- [29] Herin F, Vézina M, Thaoon I, *et al.* Predictive risk factors for chronic regional and multisite musculoskeletal pain: A 5-year prospective study in a working population [J]. *Pain*, 2014, 155 (5): 937-943.
- [30] Sukhova AV, Kryuchkova EN. Assessment of the status of bone tissue in the working vibration threatening occupations [J]. *Gig Sanit*, 2018, 97 (6): 542-546.
- [31] Banerjee S, Bandyopadhyay L, Dasgupta A, *et al.* Work related musculoskeletal morbidity among tailors: A cross sectional study in a slum of Kolkata [J]. *Kathmandu Univ Med J*, 2016, 14 (56): 305-310.
- [32] Gorbanev SA, Syurin SA. Occupational pathology in the iron mining in the kolaarctic [J]. *Gig Sanit*, 2019, 98 (6): 625-630.
- [33] 冯简青. 2001—2017 年中山市职业病发病情况分析及对策 [J]. *中国工业医学杂志*, 2019, 32 (1): 53-55.
- [34] Qamruddin AA, Husain NRN, Sidek MY, *et al.* Prevalence of hand-arm vibration syndrome among tyre shop workers in Kelantan, Malaysia [J]. *J Occup Health*, 2019, 61 (6): 498-507.
- [35] Eatough EM, Way JD, Chang CH. Understanding the link between psychosocial work stressors and work-related musculoskeletal complaints [J]. *Appl Ergon*, 2012, 43 (3): 554-563.
- [36] Gerhardsson L, Hagberg M. Work ability in vibration-exposed workers [J]. *Occup Med (Lond)*, 2014, 64 (8): 629-634.
- [37] Gerhardsson L, Gillstrom L, Hagberg M. Test-retest reliability of neurophysiological tests of hand-arm vibration syndrome in vibration exposed workers and unexposed referents [J]. *J Occup Med Toxicol*, 2014, 9 (1): 38-43.
- [38] Mahbub MH, Kurozawa Y, Ishitake T, *et al.* A systematic review of diagnostic performance of quantitative tests to assess musculoskeletal disorders in hand-arm vibration syndrome [J]. *Ind Health*, 2015, 53 (5): 391-397.
- [39] Malanga GA, Yan N, Stark J. Mechanisms and efficacy of heat and cold therapies for musculoskeletal injury [J]. *Postgrad Med*, 2015, 127 (1): 57-65.
- [40] Dina OA, Joseph EK, Levine JD, *et al.* Mechanisms mediating vibration-induced chronic musculoskeletal pain analyzed in the rat [J]. *J Pain*, 2010, 11 (4): 369-377.
- [41] 郭孟杰, 刘剑君, 么鸿雁. 参与式工效学在预防工作相关肌肉骨骼疾患中的应用 [J]. *中华流行病学杂志*, 2016, 37 (8): 1159-1163.

(收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-12)