

手传振动对神经系统影响的研究进展

卜千^{1,2}, 李静芸¹, 陈娜¹, 贾乐乐¹, 龙鼎新², 张忠彬¹

1. 国家卫生健康委职业安全卫生研究中心/国家卫生健康委粉尘危害工程防护重点实验室, 北京 102308

2. 南华大学衡阳医学院公共卫生学院, 湖南 衡阳 421001

摘要:

手传振动是工作场所最为常见的物理性有害因素之一, 其导致的手臂振动综合征缺乏有效的措施, 严重影响作业人员的身心健康。神经系统作为手传振动所致健康损害的重要靶点, 近年关于手传振动对神经系统功能影响的研究在若干方面均取得了一定进展。本文基于国内外相关文献, 分别从周围神经、自主神经以及中枢神经系统三个方面介绍了手传振动引起的神经系统功能损伤; 在此基础上从振动频率、环境温度以及个体因素探讨振动性神经损伤的影响因素, 并对振动性神经损伤相关的研究前景进行了展望。

关键词: 手传振动; 振动性神经损伤; 手臂振动综合征

Advances on nervous system impairment induced by hand-transmitted vibration BU Qian^{1,2}, LI Jingyun¹, CHEN Na¹, JIA Lele¹, LONG Dingxin², ZHANG Zhongbin¹ (1. National Center for Occupational Safety and Health, NHC/NHC Key Laboratory for Engineering Control of Dust Hazard, Beijing 102308, China; 2. School of Public Health, Hengyang Medical School, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract:

Hand-transmitted vibration is one of the most common physical harmful factors in the workplace, and the hand-arm vibration syndrome caused by it lacks effective treatment, and seriously affects the physical and mental health of the involved workers. As an important target for hand-transmitted vibration, the nervous system has attracted increasing attention from scholars, and much progress has been made in recent years in studying the effects of hand-transmitted vibration on nervous system function. Based on related literature at home and abroad, this paper introduced the hand-transmitted vibration-associated damage in peripheral, autonomic, and central nervous systems, and then explored the associated influence factors, like vibration frequency, environment temperature, and individual factors. The potential directions for further research were also proposed.

Keywords: hand-transmitted vibration; vibration-induced nervous impairment; hand-arm vibration syndrome

长时间和高强度接触手传振动导致的周围循环、神经系统功能障碍以及骨-关节肌肉的损伤, 统称为手臂振动综合征(hand-arm vibration syndrome, HAVS)^[1]。其中, 由长期接触手传振动引起的以指端感觉减退和周围神经为主的功能障碍, 称为振动性神经损伤(vibration-induced nervous impairment, VNI), 是HAVS的重要组成部分, 也是导致腕管综合征发生的重要因素之一^[2]。VNI作为接振作业工人早期且多见的健康损害, 其症状和体征对于早期识别、评价及防控手传振动危害十分重要。为了更好地保护手传振动作业工人, 了解VNI及相关影响因素具有重要意义。本文就手传振动对神经系统的影响及相关因素进行综述。

1 手传振动对神经系统的影响

神经系统的异常是手传振动健康损害的早期且多发的临床表现, 一般首先表现出周围神经系统功能的改变, 主要是末梢神经系统功能出现障碍; 也可



DOI 10.11836/JEOM22081

组稿专家

张忠彬(国家卫生健康委职业安全卫生研究中心), E-mail: zzb_sd@163.com

基金项目

国家重点研发计划项目(2016YFC0801700); 国家卫生健康委职业安全卫生研究中心自管课题项目(2021-QN-05)

作者简介

卜千(1996—), 女, 硕士生;
E-mail: bqkeneth@163.com

通信作者

张忠彬, E-mail: zzb_sd@163.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2022-03-09

录用日期 2022-09-16

文章编号 2095-9982(2022)11-1237-05

中图分类号 R135

文献标志码 A

引用

卜千, 李静芸, 陈娜, 等. 手传振动对神经系统影响的研究进展 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(11): 1237-1241.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM22081

Funding

This study was funded.

Correspondence to

ZHANG Zhongbin, E-mail: zzb_sd@163.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2022-03-09

Accepted 2022-09-16

To cite

BU Qian, LI Jingyun, CHEN Na, et al. Advances on nervous system impairment induced by hand-transmitted vibration[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(11): 1237-1241.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM22081

出现自主神经功能紊乱; 中枢神经系统功能障碍出现较晚^[3]。

1.1 周围神经系统

Hirata 等^[4]对一组 HAVS 患者进行感觉神经传导检查, 发现病例组的神经传导速度降低, 与对照组相比具有统计学意义, 且暴露于低温环境下的接振作业工人传导速度明显降低, 表明环境因素可影响周围神经系统功能。此外, 有学者发现, 周围循环障碍或腕管内压力升高引起的挤压性损伤均与周围神经系统功能障碍有关^[5-6]; 但 Sandén 等^[7]的研究结果与此相反, 通过一项为期 20 年的队列研究发现接振组工人的正中神经与尺神经的感觉和运动传导功能与对照组相比差异没有统计学意义, 手臂振动暴露与大有髓纤维远端神经病之间没有暴露-反应关系。

手传振动对末梢神经系统的影响, 表现为多发性的末梢神经功能损伤, 如痛觉、振动觉等感觉障碍^[8]。劳动者长期接触手传振动后, 多有手麻、手痛等手部症状以及肢体末端麻木或感觉异常, 构成了 HAVS 的不同临床类型, Brammer 教授^[2]以此提出了 HAVS 感觉障碍的分期, 对于早期识别、评价并控制手传振动职业危害具有重要意义。手传振动对末梢神经系统影响主要有以下表现。

1.1.1 手部症状 国内外临床流行病学调查发现, 手麻、手痛、手胀等手部症状, 是接振工人最多见、最早期的症状, 也是 VNI 的主要表现之一, 其检出率远高于周围血管痉挛障碍, 对于亚临床研究以及早期识别诊断 HAVS 具有重要意义^[9]。Wei 等^[10]对亚热带环境中手持磨削工具的接振作业工人调查发现, 手麻、手痛、手冷、手指变白的患病率分别为 27.5%、4.5%、5.9%和 15.4%; 而手麻、手痛等手部症状往往与感觉障碍同时存在, 其发生为仅有手麻症状的 4 倍^[11]。此外, 对于停止接振后手部症状能否逆转也是一直研究的问题。Aarhus 等^[12]的一项为期 22 年的随访研究表明, HAVS 引起的手部麻木和手指刺痛具有不可逆性, 持续的接振预示着手指疼痛增加。

1.1.2 痛觉 手传振动可导致劳动者指端痛觉迟钝、减退甚至消失, 痛觉阈值升高^[13]。张丹英等^[14]通过感觉神经定量检查的方法, 对某金矿从事手传振动作业的凿岩工进行指端感觉检查, 结果表明接振组工人痛觉异常率高达 56.7%, 且接振组工人双手食指、中指和无名指的痛觉阈值均高于对照组 ($P < 0.05$); 此外, 同一接振组不同部位的痛觉阈值不同, 一般而言, 手指 > 手背 > 手腕, 表明手和腕部等不同部位对痛觉的敏感

性不同。因此, 对从事手传振动作业工人进行痛觉检查时, 选取手指部位比较适宜。还有学者研究发现, 手传振动引起的痛觉障碍与接振时间相关, 表现为接振时间越长, 痛觉阈值越高^[15]。此外, 痛觉的敏感性还受性别等因素的影响, 如女性可能对痛觉反应更为敏感, 这可能与女性中枢敏化作用更强有关^[16]。

1.1.3 振动觉 一般来说, 振动觉的变化主要是通过振动觉阈值(vibrotactile perception threshold, VPT)的测定来进行评价, 而临床上常用定量感觉测试(quantitative sensory test, QST)的方法测定 VPT。Rolke 等^[17]对 HAVS 患者进行定量神经感觉测试, 发现接振工人 VPT 的异常率高达 84%, 而且相较于神经传导等传统的电生理学方法, QST 在 HAVS 的早期诊断中更为敏感。Gerhardsson 等^[18]对 142 名从事手传振动作业的工人研究发现, 尽管接振组工人振动暴露时间相当短, 但是 VPT 仍有升高的趋势; 进一步研究发现, VPT 的升高主要受振动频率的影响, 提示末梢神经损伤在接振早期即可出现, 可作为 VIN 早期诊断的暴露指标之一。

张丹英等^[14]对北方某金矿从事手传振动作业的凿岩工进行职业健康检查、手指 VPT 测试及手指痛觉阈值测试, 发现接振组工人右手食指、中指和无名指的 VPT 均高于对照组 ($P < 0.05$), 但是左手 VPT 增高不明显, 表明凿岩工工作方式右手用力, 右手接振强度明显高于左手, 提示振动觉测试结果还受优势手的影响。梁志明等^[19]对 48 名从事手传振动作业凿岩工的研究表明, 接振组工人的小指指端 VPT 明显高于食指 ($P < 0.01$), 提示 VPT 的改变受手指部位影响。Ahn 等^[20]的研究还发现 VPT 的改变与年龄密切相关, 相比于其他年龄组, 30 岁年龄组的人群对 125 Hz 的 VPT 更敏感。此外, 握力的大小也与 VPT 的改变相关^[21]。

1.1.4 两点分辨觉与深度觉 两点分辨觉与深度觉主要是对指端感觉功能进行检查。郁增舜等^[22]对 1028 名从事手传振动作业的工人研究发现, 即使是工龄很短的年轻工人, 在接触一定剂量的振动后, 指端触觉功能已出现一定程度的损伤(深度觉及两点分辨觉的异常率分别为 36.7%和 34.7%), 表明指端感觉功能检查能够客观地反映早期手传振动带来的危害。王林^[23]也对局部接振工人进行了指端感觉的检查及评价, 结果表明两点分辨觉及深度觉阈值呈现“振动性白指组 > 接振组 > 对照组”的特征。Burstrom 等^[24]进一步探讨接振的形式对指端感觉功能的影响, 研究表明, 相较于持续性接振, 间歇性接触手传振动更能引起指端感觉功能的损伤。此外, 当手传振动危害较为严重时, 两

点分辨觉与深度觉的异常较振动觉更为常见。

1.1.5 温度觉 温度觉阈值(temperature perception thresholds, TPTs)主要反映的是无髓神经纤维、温度感受器以及较小的有髓神经纤维的功能。Gerhardsson 等^[25]对从事手传振动作业的工人进行横断面调查,结果表明接振组工人对寒冷和温暖的敏感性降低,与对照组相比,振动暴露的工人表现出较高的热感知阈值。Ye 等^[26]测定一组男性 HAVS 患者的食指和小指的 TPTs,结果表明自诉有手部症状如麻木或刺痛感患者的热觉阈值升高,冷觉阈值降低。有学者指出,对冷、热两种 TPTs 的检查,优于对冷觉或热觉等单一的温度觉检查,对 TPTs 测试的敏感性大于痛觉阈值测试的敏感性^[27]。因此,检查由手传振动引起的小的神经纤维损伤时,可以用 TPTs 测试代替痛阈值测试。

1.2 自主神经系统

心率变异性测定常被作为定量评价自主神经功能的指标之一,以心电图中的 R-R 间期标准差下降与心率功率图中低、高频段的比值升高为主要表现。林立等^[28]对某金矿从事手传振动作业的工人进行心率变异性分析,结果表明随接振时间的延长,交感神经功能呈现早期亢进、中晚期下降的变化趋势,而迷走神经功能的下降随接振时间/强度的增加变化更为明显。Harada 等^[29]的研究也得到了类似的结果,表明自主神经功能的变化对于 HAVS 的临床分期有着重要的作用,早期自主神经功能兴奋性增高并逐渐达到峰值,而在 HAVS 的中晚期表现为自主神经功能低下。手传振动导致自主神经功能紊乱的同时常并发周围血管收缩功能失调,反射性引起手指皮温下降以及动脉血压升高,提示自主神经功能紊乱与周围血管痉挛障碍的发生具有一致性,在临床上表现为高血压、头痛、头昏等神经衰弱综合征^[30]。

1.3 中枢神经系统

手传振动对中枢神经系统的影响并不多见,主要表现为原发性或继发性的中枢神经系统功能紊乱,条件反射抑制,条件反射潜伏期及运动时间延长,大脑皮质功能减弱等^[31]。曾晓立等^[32]通过对长期接振工人进行脑干听觉诱发电位(brainstem auditory evoked potential, BAEP)测试,并结合振动负荷试验,结果表明手传振动对脑干听觉各部分通路均有损害作用,而且导致中枢神经系统对刺激的反应性下降。但是 Lundborg 等^[33]通过对 6 名长期使用手持式振动工具的工人进行研究,结果发现接振组与对照组颅脑的磁共振图像没有明显差异,表明手传振动尚不足以引起大脑

皮质器质性改变。因此,手传振动对中枢神经系统的改变仅仅是功能性损害还是器质性损伤,还有待今后的研究进一步阐明。

2 VNI 的影响因素

手传振动对神经系统的影响主要取决于振动的强度、频率及接振时间,并与机体的反应性有关^[34]。然而,实际的生产环境中,手传振动往往不是独立存在,常常与噪声、低温、不良的工效学因素等其他职业有害因素并存,产生联合作用从而加重手传振动对神经系统的损伤。

2.1 振动频率

既往研究表明,振动诱导的损伤或障碍与频率相关,此外,如果暴露的频率接近共振频率则会导致更严重的损伤^[35-36]。Ahn 等^[20]测试 3 个不同频率(31.3、125 和 250 Hz)作业下从事手传振动作业工人 VPT 的变化情况,结果发现频率在 125 Hz 的手传振动作业工人,VPT 升高达到了峰值,与 Burström 等^[37]的研究结果相一致。Krajnak 等^[36]建立大鼠尾部接振模型,研究在 62.5、125 和 250 Hz 下振动诱导的损伤情况,发现相较于 62.5 Hz,暴露于 125 Hz 频率下的振动对感音神经功能障碍产生更大影响。上述研究提示外周神经对振动的敏感性在振动频率为 125~250 Hz 最高。

2.2 环境温度

低温是常见的物理性有害因素之一,低温本身能够引起周围神经脱髓鞘、神经纤维损伤等,最终导致神经系统兴奋性降低以及运动神经、感觉神经的传导减慢^[38]。此外,低温与手传振动具有联合作用,能够促进和加重手传振动的危害。Govindaraju 等^[39]建立大鼠尾部接振模型,将一组大鼠分别暴露于室温及低于 15 °C 环境下,以测定低温是否能够加重振动对神经系统的损伤,结果表明两种温度处理下的大鼠都出现了神经功能损伤,表现为神经内膜水肿,但是暴露于低温环境下的大鼠神经损伤更为严重。陈磊等^[40]进一步研究发现,低温与振动能够引起轴突退化,导致神经内膜水肿、轴索变性。然而,近年来亚热带地区如广东等温暖地区出现群发性 HAVS 事件^[10],提示环境温度仅仅是 HAVS 诱发因素,而决定因素还是接振的强度及时间。

2.3 个体因素

据报道,吸烟能够加重手传振动作业工人与末梢感觉神经相关的症状,对 HAVS 的发生有着明显的促进作用,其机制可能与吸烟能够引起周围血管收缩并

对神经的直接刺激作用有关^[41]。此外,随着年龄的增加,接振工人中出现腕管综合征及指端麻木等末梢感觉障碍者呈明显增多的趋势,可能与老年人神经功能出现退化或者机体累积接振量增加有关^[42]。也有报道称,女性对振动及低温等因素敏感性较高,考虑到从事手传振动作业工人多为男性,这种性别差异还需要进一步扩大人群进行研究^[43]。

3 展望

手传振动广泛存在于工业生产的多个环节,对劳动者的身心健康带来了严重的危害,用人单位应积极组织接振工人开展振动相关职业健康检查,维护劳动者的健康权益。目前手传振动对神经系统影响的职业流行病学调查多为横断面调查或病例对照研究,与噪声、低温、不良的工效学因素等其他职业性有害因素联合作用的研究较少。因此,在今后的研究中,可以考虑开展队列研究,扩大样本含量并加强与其他有害因素联合作用的研究,从而为 HAVS 的防治提供科学依据,保障劳动者的职业健康。

参考文献

- [1] 金泰虞. 职业卫生与职业医学[M]. 6版. 北京: 人民卫生出版社, 2007: 290-296.
- JIN T Y. Occupational health and occupational medicine[M]. 6th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2007: 290-296.
- [2] BRAMMER AJ, PYYKKO I. Vibration-induced neuropathy. Detection by nerve conduction measurements[J]. *Scand J Work Environ Health*, 1987, 13(4): 317-322.
- [3] NILSSON T. Neurological diagnosis: aspects of bedside and electrodiagnostic examinations in relation to hand-arm vibration syndrome[J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2002, 75(1/2): 55-67.
- [4] HIRATA M, SAKAKIBARA H, TOIBANA N. Medial plantar nerve conduction velocities among patients with vibration syndrome due to rock-drill work[J]. *Ind Health*, 2004, 42(1): 24-28.
- [5] 林立, 聂继池, 张春之, 等. 局部振动对周围神经与血管机能影响的研究[J]. 中国职业医学, 2000, 27(4): 9-10.
- LIN L, NIE J C, ZHANG C Z, et al. Effect of hand-arm vibration on the functions of periphery vasculars and periphery nerves[J]. *Chin Occup Med*, 2000, 27(4): 9-10.
- [6] 林立, 张春之, 聂继池, 等. 手臂振动致作业工人腕管综合征的调查[J]. 化工劳动保护, 2000, 21(7): 250-252.
- LIN L, ZHANG C Z, NIE J C, et al. Investigation of carpal tunnel syndrome caused in hand-arm vibration workers[J]. *Chem Ind Occup Saf Health*, 2000, 21(7): 250-252.
- [7] SANDÉN H, JONSSON A, WALLIN B G, et al. Nerve conduction in relation to vibration exposure-a non-positive cohort study[J]. *J Occup Med Toxicol*, 2010, 5: 21.
- [8] JUNTUNEN J, TASKINEN H. Pathogenic and clinical aspects of Polyneuropathies, with reference to the hand-arm vibration syndrome[J]. *Scand J Work Environ Health*, 1987, 13(4): 363-366.
- [9] BOVENZI M. Exposure-response relationship in the hand-arm vibration syndrome: an overview of current epidemiology research[J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 1998, 71(8): 509-519.
- [10] WEI N, LIN H, CHEN T, et al. The hand-arm vibration syndrome associated with the grinding of handheld workpieces in a subtropical environment[J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2021, 94(4): 773-781.
- [11] BARREGARD L, EHRENSTRÖM L, MARCUS K. Hand-arm vibration syndrome in Swedish car mechanics[J]. *Occup Environ Med*, 2003, 60(4): 287-294.
- [12] AARHUS L, VEIERSTED K B, NORDBY K C, et al. Neurosensory component of hand-arm vibration syndrome: a 22-year follow-up study[J]. *Occup Med*, 2019, 69(3): 215-218.
- [13] MCGEOCH K L, GILMOUR W H. Cross sectional study of a workforce exposed to hand-arm vibration: with objective tests and the Stockholm workshop scales[J]. *Occup Environ Med*, 2000, 57(1): 35-42.
- [14] 张丹英, 陈贵平, 罗巧, 等. 某金矿凿岩工指端感觉检查分析[J]. 中国职业医学, 2016, 43(3): 296-300.
- ZHANG D Y, CHEN G P, LUO Q, et al. Analysis on finger sensory examination among drill workers in a gold mine[J]. *China Occup Med*, 2016, 43(3): 296-300.
- [15] 王林. 振动与振动病防治[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 74-75.
- WANG L. Prevention and treatment of vibration and vibration disease[M]. Beijing: Science Press, 2013: 74-75.
- [16] PIERETTI S, DI GIANNUARIO A, DI GIOVANNANDREA R, et al. Gender differences in pain and its relief[J]. *Ann Ist Super Sanita*, 2016, 52(2): 184-189.
- [17] ROLKE R, ROLKE S, VOGT T, et al. Hand-arm vibration syndrome: clinical characteristics, conventional electrophysiology and quantitative sensory testing[J]. *Clin Neurophysiol*, 2013, 124(8): 1680-1688.
- [18] GERHARDSSON L, BURSTROM L, HAGBERG M, et al. Quantitative neurosensory findings, symptoms and signs in young vibration exposed workers[J]. *J Occup Med Toxicol*, 2013, 8(1): 8.
- [19] 梁志明, 肖斌, 严茂胜, 等. 矿山凿岩工人2种频率指端振动觉阈值分析[J]. 中国职业医学, 2019, 46(4): 407-411.
- LIANG Z M, XIAO B, YAN M S, et al. Investigation and analysis on fingertip vibrotactile perception threshold at two frequencies in mine drilling workers[J]. *China Occup Med*, 2019, 46(4): 407-411.
- [20] AHN R, YOO C I, LEE H, et al. Normative data for neuromuscular assessment of the hand-arm vibration syndrome and its retrospective applications in Korean male workers[J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2013, 86(7): 837-844.
- [21] SAKAKIBARA H, HIRATA M, TOIBANA N. Impaired manual dexterity and neuromuscular dysfunction in patients with hand-arm vibration syndrome[J]. *Ind Health*, 2005, 43(3): 542-547.
- [22] 郁增舜, 赵笏, 乔玲, 等. 深度觉和两点分辨觉仪在振动病调查中的应用[J]. 铁道劳动卫生通讯, 1984(4): 25-27.
- YU Z S, ZHAO H, QIAO L, et al. Application of depth perception and two-point discrimination in the investigation of vibration disease[J]. *Railway Occup Saf Health Environ Prot*, 1984(4): 25-27.
- [23] 王林. 局部振动作业工人末梢神经机能(指端感觉)的检查及其评价[J]. 济宁医学报, 1982, 5(2): 17-26.
- WANG L. Examination and evaluation of peripheral nerve function (fingertip sensation) in workers exposed to local vibration[J]. *J Jining Med Coll*, 1982, 5(2): 17-26.
- [24] BURSTRÖM L, HAGBERG M, LUNDSTRÖM R, et al. Influence of vibration exposure on tactile and thermal perception thresholds[J]. *Occup Med*, 2009, 59(3): 174-179.

- [25] GERHARDSSON L, HAGBERG M. Work ability in vibration-exposed workers [J]. *Occup Med*, 2014, 64(8): 629-634.
- [26] YE Y, GRIFFIN MJ. Assessment of thermotactile and vibrotactile thresholds for detecting sensorineural components of the hand-arm vibration syndrome (HAVS) [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2018, 91(1): 35-45.
- [27] ROLKE R, MAGERL W, CAMPBELL KA, et al. Quantitative sensory testing: a comprehensive protocol for clinical trials [J]. *Eur J Pain*, 2006, 10(1): 77.
- [28] 林立, 张春之, 聂继池, 等. 手臂振动对心率变异性及外周循环功能影响的研究 [J]. *劳动医学*, 2000, 17(1): 4-6.
LIN L, ZHANG CZ, NIE JC, et al. The effects of hand-arm vibration on the heart rate variability and peripheral circulation in drilling workers in gold mine [J]. *J Labour Med*, 2000, 17(1): 4-6.
- [29] HARADA N, KONDO H, KIMURA K. Assessment of autonomic nervous function in patients with vibration syndrome using heart rate variation and plasma cyclic nucleotides [J]. *Br J Ind Med*, 1990, 47(4): 263-268.
- [30] SAKAKIBARA H, YAMADA S, et al. Vibration syndrome and autonomic nervous system [J]. *Cent Eur J Public Health*, 1995, 3 Suppl: 11-14.
- [31] MATOBA T, KUWAHARA H. Treatments for hand-arm vibration disease in Japan [J]. *Kurume Med J*, 1990, 37: S123-S126.
- [32] 曾晓立, 聂继池, 张春之, 等. 手传振动对体感诱发电位的影响及其临床意义 [J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2000, 18(3): 172-173.
ZENG XL, NIE JC, ZHANG CZ, et al. Effects of hand-transmitted vibration on somatosensory evoked potentials and its clinical significance [J]. *Chin J Ind Hyg Occup Dis*, 2000, 18(3): 172-173.
- [33] LUNDBORG G, ROSÉN B, KNUTSSON L, et al. Hand-arm-vibration syndrome (HAVS): is there a central nervous component? An fMRI study [J]. *J Hand Surg*, 2002, 27(6): 514-519.
- [34] SU TA, HOE VC W. Reliability of a Malay-translated questionnaire for use in a hand-arm vibration syndrome study in Malaysia [J]. *Singapore Med J*, 2008, 49(12): 1038-1045.
- [35] DONG RG, WELCOME DE, MCDOWELL TW, et al. A proposed theory on biodynamic frequency weighting for hand-transmitted vibration exposure [J]. *Ind Health*, 2012, 50(5): 412-424.
- [36] KRAJNAK K, MILLER GR, WAUGH S, et al. Characterization of frequency-dependent responses of the vascular system to repetitive vibration [J]. *J Occup Environ Med*, 2010, 52(6): 584-594.
- [37] BURSTRÖM L, LUNDSTRÖM R, HAGBERG M, et al. Vibrotactile perception and effects of short-term exposure to hand-arm vibration [J]. *Ann Occup Hyg*, 2009, 53(5): 539-547.
- [38] SUTINEN P, TOPPILA E, STARCK J, et al. Hand-arm vibration syndrome with use of anti-vibration chain saws: 19-year follow-up study of forestry workers [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2006, 79(8): 665-671.
- [39] GOVINDARAJU SR, CURRY BD, BAIN JL W, et al. Effects of temperature on vibration-induced damage in nerves and arteries [J]. *Muscle Nerve*, 2006, 33(3): 415-423.
- [40] 陈磊, 林立, 张春之, 等. 低温对家兔振动性神经功能的损伤 [J]. *环境与职业医学*, 2009, 26(3): 252-254, 258.
CHEN L, LIN L, ZHANG CZ, et al. Effects of low temperature sensitivity on vibration-induced nervous impairment in rabbits [J]. *J Environ Occup Med*, 2009, 26(3): 252-254, 258.
- [41] CHERNIACK M, CLIVE J, SEIDNER A. Vibration exposure, smoking, and vascular dysfunction [J]. *Occup Environ Med*, 2000, 57(5): 341-347.
- [42] 刘丽霞, 周盛年, 张晓, 等. 年龄老化对缺血性脑卒中发生发展和恢复的影响 [J]. *中国老年学杂志*, 2012, 32(2): 417-420.
- [43] AKESSON L, LUNDBORG G, HORSTMANN V, et al. Neuropathy in female dental personnel exposed to high frequency vibrations [J]. *Occup Environ Med*, 1995, 52(2): 116-123.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 丁瑾瑜)