

## · 综 述 ·

## 局部振动在脊髓损伤康复中的应用与研究进展\*

陈华德, 农飞玉, 梁翠娟, 郑继青 综述, 龙耀斌<sup>△</sup> 审校

(广西医科大学第二附属医院康复医学科, 广西南宁 530007)

**[摘要]** 局部振动(FMV)是一种利用振动设备施加于人体产生重复振动刺激的新型非侵入式物理治疗手段,近年来在神经、运动系统疾病的临床康复中逐步得到应用,并取得了一定疗效。该文根据近年来国内外相关研究,对 FMV 在脊髓损伤康复中的研究应用与进展进行综述。

**[关键词]** 局部振动; 脊髓损伤; 康复; 综述

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-5519.2024.05.029

**中图法分类号:**R493

**文章编号:**1009-5519(2024)05-0854-06

**文献标识码:**A

**Application and research progress of local vibration in rehabilitation of spinal cord injury\***CHEN Huade, NONG Feiyu, LIANG Cuijuan, ZHENG Jiqing, LONG Yaobing<sup>△</sup>

(Department of Rehabilitation Medicine, the Second Affiliated Hospital of Guangxi Medical University, Nanning, Guangxi 530007, China)

**[Abstract]** Local vibration (FMV) is a new type of non-invasive physical therapy that uses vibration equipment to exert repeated vibration stimulation on the human body. In recent years, FMV has been gradually applied in the clinical rehabilitation of neurological and motor system diseases, and has achieved certain curative effect. This article reviews the research application and progress of FMV in the rehabilitation of spinal cord injury based on relevant research at home and abroad in recent years.

**[Key words]** Local vibration; Spinal cord injury; Rehabilitation; Review

脊髓损伤(SCI)是指由创伤或非创伤等原因导致脊髓功能、结构的损伤,使损伤平面以下的感觉、运动、自主神经功能发生障碍的一种疾病<sup>[1]</sup>。全球疾病负担(GBD)研究数据显示,2019年,全世界SCI年新发病例90万例,流行病例2060万例,残疾病例620万例;以男性多见;坠落伤是SCI的首要原因,交通事故伤排在其后;颈椎SCI占创伤性SCI的50%以上;SCI在各个国家及地区的流行病学特征因经济水平等方面差异而不同,发达国家发病率要高于发展中国家<sup>[2]</sup>。以中国武汉地区为例,创伤性SCI患者的平均年龄为(39.4±14.3)岁,男女比例约为3:1,主要原因是交通事故(38.4%),其次是低处坠落(24.0%)、高处坠落(13.2%),67.2%有尿路感染、肺部感染等并发症和其他损伤,农民和工人是最易患创伤性SCI的职业<sup>[3]</sup>。除非完全性SCI还会导致中央束综合征、半切综合征、马尾综合征等特殊表现外,SCI易导致脊髓休克、四肢瘫或截瘫、感觉障碍、体温失调、痉挛、二便障碍、性功能障碍等<sup>[4]</sup>。有研究表明,SCI主要分2个阶段:第1阶段包括神经实质的破坏、轴突网络的破坏、出血和神经胶质膜的中断,神经组织内生化和机械和生理变化的发生激活了与继发性损伤相关的一

连串事件,但在早期SCI时,仍有少数脊髓节段保留部分轴突连接,从而反映了不完全和部分损伤状态;第2阶段为原发性损伤触发继发性损伤,其对脊髓组织产生进一步的化学和机械性损伤,由于细胞内的高钙蓄积而导致神经元兴奋性毒性,并增加活性氧浓度和谷氨酸水平,从而损害了基础核酸、磷脂和蛋白质,并导致神经功能障碍<sup>[5]</sup>。脊髓是低层次的中枢神经部分,极少能在损伤后实现自我修复<sup>[6]</sup>。因此,SCI会导致损伤身体功能永久性丧失或减退,此外,还可造成肺部感染、深静脉血栓等严重并发症,给患者带来巨大的身体创伤及负面的心理、精神影响,给家庭和社会带来巨大负担<sup>[7]</sup>。所以,SCI后的康复治疗极为重要,目前已有多种物理、作业、辅具、心理等措施应用于SCI的康复,任何具有临床获益和安全性的无创神经调控技术等干预措施都具有恢复SCI后功能障碍的优势。近年来,局部振动(FMV)作为一种无创且相对新型的物理治疗手段,在SCI中逐渐得到广泛应用,并取得了一定的疗效,现将其应用于SCI后临床康复治疗的进展情况综述如下。

**1 FMV 的概念及机制**

振动普遍存在于自然界中,是物质的一种运动形

\* 基金项目:广西自然科学基金面上项目(2022GXNSFAA035511);广西壮族自治区医疗卫生重点学科建设项目(桂卫科教发[2022]4号)。

<sup>△</sup> 通信作者, E-mail: long232316@163.com。

式,其描述了系统状态的参量在其基准值上下交替变化的过程,周围环境、人体自身的各个器官及系统均处在不停地振动之中<sup>[8]</sup>。人体因自身的生物学结构和生物特性,可被视为一个机械系统。振动治疗(VT)是通过机械设备产生一定频率及振幅、相位角,具有高精度、重复性等特征的正弦振动波,对机体特定部位进行刺激而产生效应的治疗方法,根据其作用方式的不同,在康复领域分为全身振动(WBV)和FMV<sup>[9]</sup>。此外,VT按振动能量来源可分为机械振动、磁致振动、电致振动;按作用方向可分为垂直振动、横向振动及侧向振动;依据振动模式还可分为同步振动、交替振动<sup>[10]</sup>。FMV是使用振动治疗仪直接对特定躯干、器官、肌肉或其肌腱进行振动刺激输入来达到治疗作用的一种无创性物理治疗手段,而对人体其他部位无振动或振动极弱<sup>[11]</sup>。国外有学者将FMV治疗根据振动频率分为低频振动(30~50 Hz)、中频振动(80~120 Hz)、高频振动(120~300 Hz)三级,且不同频率级别的振动疗效侧重点有所不同,低频振动对肌肉松弛和迟发性肌肉酸痛具有治疗效果;中频振动可改善本体感觉,减少锥体束痉挛和疼痛,并导致肌肉松弛;高频振动有助于增强慢肌纤维和快肌纤维<sup>[12]</sup>。在机制方面,FMV主要作用于脊髓和皮质水平<sup>[13]</sup>。在脊髓水平,FMV使受振部位产生张力性振动反射(TVR)、激活Ia传入纤维、改变皮质脊髓通路<sup>[13-14]</sup>;在皮质水平,FMV能兴奋躯体感觉和运动中枢,促使中枢结构和功能重组<sup>[13,15]</sup>。MURILLO等<sup>[16]</sup>认为,FMV施加于股直肌(RF)通过对 $\alpha$ 运动神经元的突触前抑制和激活后抑制机制,使得来自股直肌的传入纤维抑制同侧和对侧肢体的单突触反射,从而起到缓解痉挛的作用。

## 2 FMV在SCI康复中的研究应用

### 2.1 促进SCI后肢体功能恢复

FMV在SCI的康复中最常用于改善肢体功能障碍。SCI后1年内H反射成对脉冲抑制逐渐消失,此过程反映了正常皮质抑制丧失后节段性中间神经元的重组,同时伴随着痉挛的发展与变化,YEN等<sup>[17]</sup>观察5例慢性SCI患者坐轮椅时接受了每周2次的单下肢振动训练(30 Hz, 0.6 g, 1 g=9.81 m/s<sup>2</sup>),研究发现长期振动训练可以启动慢性完全性SCI患者H反射成对脉冲抑制的恢复,从而缓解肢体痉挛。MURILLO等<sup>[16]</sup>对SCI患者股直肌进行FMV(50 Hz, 10 min),发现所有患者的改良Ashworth痉挛评分(MAS)和阵挛持续时间显著减少,活动度增加,患者比目鱼肌的T波振幅和Hmax/Mmax比值均降低( $P<0.05$ ),证明了无论是完全性还是不完全性SCI,下肢肌肉的长时间振动均可使肢体痉挛程度减轻,从而增加SCI患者痉挛肢体的主被动活动。VOJINOVIC等<sup>[18]</sup>进行了一项试验,先对SCI患者痉挛上肢的腕屈、伸肌施加15 min的FMV,再要求患者使用该手腕进行机器人辅助游戏,

结果显示,患者腕部痉挛程度在短期内下降,腕关节MAS降低、主动关节活动度(AROM)增加。DEFOREST等<sup>[19]</sup>在患者跟腱使用20、40、80 Hz和120 Hz的FMV研究中发现,在慢性SCI患者中,肌腱振动可能通过相互抑制机制抑制拮抗肌而不是激动肌的晚期痉挛样活动,因此,作者认为拮抗肌肌腱的靶向振动可能有助于缓解SCI后的痉挛。SCI使连接脊髓上中枢和脊髓中枢的通路中断,从而破坏了脊髓运动性中枢模式生成器(CPG)的激活,导致行走功能的损害或丧失,FIELD-FOTE等<sup>[20]</sup>对运动不完全和运动完全性SCI患者的股四头肌、腓绳肌、阔筋膜张肌进行FMV时,通过收集和分析运动学和肌电数据,发现均可激发出下肢步态行为,证明了FMV可能作为SCI患者运动训练的辅助手段。BARTHÉLÉMY等<sup>[21]</sup>依据美国脊椎损伤协会(ASIA)残损分级标准,对评定为D级(不完全运动损伤)的1例62岁SCI男性患者进行研究,以站立姿势完成9次局部步态振动训练后,患者步行速度(0.26 m/s vs. 0.35 m/s)和距离(23 m vs. 37 m)均有提升(34.6% vs. 60.9%)。由此可见,改善SCI患者的步行能力,下肢FMV可以作为辅助治疗手段。近年来,FMV技术得到不断扩展应用,BACKUS等<sup>[22]</sup>将拮抗肌的FMV与重复运动结合起来,即在振动辅助感觉增强运动治疗下,使用特定装置进行检测及相关量表进行评估,结果显示,掌指屈伸和腕部屈伸有显著改善,手和腕的主动运动得分均有改善,证明拮抗肌的FMV联合重复运动可能使SCI后不完全性四肢瘫痪患者的损伤和功能得到改善,但有必要再行进一步研究。近年来,SCI后下半身截瘫患者的上肢功能训练逐渐受到重视,如KULICH等<sup>[23]</sup>尝试单次上肢振动训练对SCI患者的初步可行性及急性生理效应展开研究,发现无论是振动训练还是等张阻力训练,均会产生急性生理效应,显示上肢FMV可能有益处,有利于患者提高轮椅操控能力和独立生活能力,虽然目前相关内容较少,但大样本量、长时间的高质量临床研究可以在未来开展。

### 2.2 改善SCI后骨质疏松

SCI会导致瘫痪,进而造成低骨量和骨骼结构的退化,发生神经源性失用性骨质疏松症,是SCI后的一种严重且独特的并发症,显著增加股骨远端和胫骨近端骨折的风险,给SCI的康复带来巨大打击,造成严重医疗后果。这种骨量丢失是由急性SCI后恢复阶段骨吸收增加和骨形成几乎缺失,以及一种更传统的高转换骨量减少所驱动的,骨量减少慢性出现,可能受到持续的神经损伤和肌肉骨骼卸载的影响<sup>[24]</sup>。长期随访数据表明,多达50%的SCI患者在受伤后的某个时间点易发生低骨量或骨质疏松性骨折<sup>[25]</sup>。目前,VT被认为是一种相对新型的SCI性骨质疏松疗法。VT应用于SCI后骨质疏松的研究多以WBV为主,且无论是以SCI患者或实



验动物作为研究对象,均取得了一定疗效,当然 FMV 的研究应用也取得了不错疗效。早在 2001 年, RUBIN 等<sup>[26]</sup>使用振动仪对成年绵羊的后肢以振动方向垂直于地面(30 Hz, 0.3 g, 20 分钟/次, 5 次/周)的振动方案进行了为期 1 年的低强度高频振动,经治疗 1 年后,观察组股骨近端骨松质、骨小梁的密度与对照组相比显著增加(增加了 34.2%),这种治疗方式产生的应变水平比破坏骨组织的应变水平低 3 个数量级,由此证明这种促进合成代谢的非侵入性 FMV 刺激可能有治疗骨质疏松等骨骼疾病的潜力。在 7 例 SCI 患者中,对足部施加的 FMV 刺激可传递至中轴骨骼,表明这种治疗有可能调节骨代谢<sup>[27]</sup>。DUDLEY-JAVOROSKI 等<sup>[28]</sup>使 SCI 患者在轮椅上坐下时接受下肢单侧 FMV(30 Hz, 0.6 g, 20 min, 每周 3 次),12 个月并没有产生胫骨远端或股骨远端骨密度或小梁微结构的适应性,且骨密度和骨小梁网络长度在几个远端股骨亚区持续下降,说明该剂量参数的振动治疗不是一种有效的抗骨质疏松干预方式,但其他剂量的振动治疗可能仍然有用。目前应用 FMV 防治 SCI 后骨质疏松的研究相对较少,确切的有效证据仍不足,有待进一步对更大样本量的 SCI 患者、更长时间、不同振动参数的疗效进行研究。

**2.3 改善 SCI 后二便功能** SCI 后肠道失去中枢神经支配,从而造成感觉及运动功能障碍的综合征,称为 SCI 后神经源性肠功能障碍(NBD),是 SCI 的重要并发症之一,常导致神经调节紊乱、胃肠道激素紊乱、肠道菌群失调等,NBD 主要表现为排便困难、便秘、大便失禁、腹胀、腹痛等,长期严重便秘或失禁严重影响患者的生活质量及心理健康<sup>[29-30]</sup>。临床上,SCI 后便秘多采用改善便秘症状的常规治疗方法,但有时效果并不理想。有研究证实,VT 作用于消化系统,能增强胃肠蠕动及改善消化机能,可作为消化不良、便秘等症状的辅助治疗手段。此外,有学者对 42 例完全或不完全 SCI 患者的研究发现,腹部 FMV 联合综合干预能帮助恢复 SCI 患者直肠功能,改善便秘及生活质量<sup>[31]</sup>。鄢茵等<sup>[32]</sup>在常规治疗手段基础上,应用多频振动治疗仪对 SCI 后便秘患者腹部进行 FMV,治疗 1 个月后,发现观察组的患者满意度评分、总有效率、Wexner 便秘评分 3 项指标均优于对照组,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。金娟等<sup>[33]</sup>将 SCI 已过脊髓休克期的 NBD 患者 55 例随机分成观察组 26 例和对照组 29 例,在 2 组均给予神经源性肠道护理的基础上,观察组患者予腹部定时定向多频振动治疗(20~30 Hz),对照组患者则予腹部人工手法按摩,根据布里斯托大便分型(BSS)比较治疗前后 2 组的大便分型,结果显示观察组大便分型较对照组理想,差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),表明腹部 FMV 可改善 SCI 后 NBD 患者的排便,值得在临床中推广应用。神经源性膀胱(NB)是由调节和控制排尿生理活动的中枢或周围神

经系统受到损害而产生的膀胱功能障碍,也是 SCI 的一种重要并发症<sup>[34]</sup>。LAESSØE 等<sup>[35]</sup>对 14 例 C<sub>4</sub>~T<sub>7</sub> 节段、ASIA 为 B 或 C 级及以上的 SCI 男性患者进行相关研究,发现经过 4 周的阴茎振动刺激(PVS)治疗后,膀胱容量从基线的中位数 190 mL(17~700 mL)显著增加到 293 mL(30~700 mL),差异有统计学意义( $P = 0.03$ ),并且在充盈期有膀胱内压下降的趋势,证明了阴茎振动治疗与膀胱容量的增加相关,此发现可能对 SCI 男性患者的尿失禁管理有指导性意义。BIERING-SØRENSEN 等<sup>[36]</sup>在阴茎振动刺激对 SCI 个体男性生育潜能、痉挛和神经源性逼尿肌过度活动影响的研究中,使用 PVS 治疗 4 周后,发现改良 Ashworth 评分降低和膀胱容量明显增加,证明 PVS 能显著减少痉挛发生,并且抑制了神经源性逼尿肌在 SCI 后的过度活动。高李侠等<sup>[37]</sup>在给予 SCI 后 NB 患者膀胱功能训练及间歇导尿的基础上,观察组患者予盆底肌振动治疗,8 周后,相对于对照组,观察组患者膀胱容量及膀胱顺应性得到明显改善,逼尿肌压力、膀胱压、残余尿量显著减少,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ ),证明膀胱功能训练联合盆底肌 FMV 对 NB 的康复疗效确切。盆底肌 FMV 操作简便、经济实惠,同样值得在 SCI 后 NB 的康复中推广应用。FMV 在改善 SCI 后 NBD 的研究中涉及不同 ASIA 残损分级的患者,且取得一定疗效,在改善 SCI 后 NB 方面对 ASIA 为 B 级及以上的患者较为有效,但各自最佳适应证的相关研究尚缺乏,仍需要更多的且从不同严重程度的角度进行对照研究来探讨。

**2.4 促进 SCI 后性功能恢复** 近年来,SCI 后性功能障碍备受关注。生殖器 FMV 治疗作为新型的治疗方法尚未报道出现任何不良反应,且对性功能、满意度、性相关痛苦和生殖器感觉均有改善,是一种安全、耐受性好且有效的性功能恢复辅助治疗手段<sup>[38]</sup>。关于生殖器 FMV,以往研究总结出 2 种机制:一是突然施加振动使与性唤醒相关的血流量增加<sup>[39]</sup>;二是持续振动使与性高潮相关的高交感神经兴奋性增强,增加组织灌注,有助于降低肌肉张力和增加放松<sup>[40]</sup>。SCI 后性功能障碍以青壮年男性多发,约 90% 的 SCI 男性出现射精功能障碍,严重影响其自尊心、生活质量和家庭幸福指数,随着社会的进步和文明的发展,使用辅助生殖技术从 SCI 患者身上获取精子,帮助其获得生物学父亲身份是合理的。正常的射精有赖于完整的脊髓反射,T<sub>10</sub>~L<sub>2</sub> 脊髓节段必须完整才能驱动射精,而 S<sub>2</sub>~S<sub>4</sub> 脊髓节段完整才能使精液排出体外,这些节段以上的 SCI 将阻碍射精及排精<sup>[41]</sup>。早在 1996 年,NEHRA 等<sup>[42]</sup>通过回顾性研究,推荐 PVS 治疗作为 T<sub>10</sub> 以上 SCI 患者成功射精和致孕的首选方案。BIERING-SØRENSEN 等<sup>[36]</sup>为了研究 PVS 对 SCI 男性生育潜能、痉挛和神经源性逼尿肌过度活动的影

响,发现在使用 PVS 治疗时,80%以上的男性可获得射精,证明了阴茎 FMV 对 SCI 男性生育能力的重要性。CALABRÒ 等<sup>[43]</sup>对 10 例 ASIA 为 C 级或 D 级的创伤性 SCI 男性盆底肌进行 15 次 FMV(30 分钟/次,3 次/周),治疗后发现所有患者 MAS 和国际勃起功能指数得到改善,提睾肌和球海绵体反射性较好,阴部神经体感诱发电位和球海绵体电生理反射的振幅显著增加,证明了盆底肌 FMV 可改善不完全性 SCI 男性的勃起功能障碍,是一种有前景的治疗手段,但需要样本量更大、周期更长的随机临床试验来验证。2022 年,有学者通过研究发现 PVS 可使高达 86%的 T<sub>10</sub> 水平及以上损伤的 SCI 患者产生射精,在大约 75%的射精精液中,有超过 500 万个活动精子,夫妻妊娠概率提高,且推荐阴茎 FMV 作为帮助 SCI 男性患者成为生物学父亲的首选方案<sup>[41]</sup>。随着 PVS 的有效性和需求量的增加,促使男性阴茎振动设备得到不断更新换代。Ferticare 2.0 是一款重新设计的阴茎振动设备,IBRAHIM 等<sup>[44]</sup>将其应用于 15 例 SCI 男性患者,成功使 13 例患者完成射精,并未发生不良事件,且此设备成为受试患者的推荐品,说明使用该产品对 SCI 后性功能障碍的男性患者阴茎进行 FMV 来诱导射精是安全和有效的,正在逐渐取代 Ferticare 1.0 设备。值得强调的是,在过去几年中,女性 SCI 患者的百分比有所增加,约 88%的女性患者出现性功能障碍<sup>[45-46]</sup>。帮助女性患者在 SCI 后重新建立性活动,提高她们的生活质量是非常必要的。2005 年 SIPSKI 等<sup>[47]</sup>在研究振动刺激对 SCI 女性性反应的影响中发现,阴蒂振动刺激和阴蒂手工刺激均能显著提高 2 组受试者的性唤醒水平,与阴蒂手工刺激相比,阴蒂振动刺激导致阴道脉冲振幅增加,然而,这些差异在统计学上并不显著,疗效仍需进一步研究。此外,研究证明低频生殖器 FMV 具有充血效应,可以使 SCI 女性患者放松,从而更易达到性高潮<sup>[39]</sup>。2022 年, DÍAZ-RUIZ 等<sup>[46]</sup>对不完全性 SCI 女性患者的一项随机临床试验也表明女性生殖器振动治疗可使性功能和生活质量改善,对 SCI 女性患者的性教育和性健康有一定意义。就 SCI 严重程度而言,FMV 在改善性功能方面更适合脊髓休克期已结束且 ASIA 为 B 级及以上的患者,疗效最大化的 ASIA 分级尚未确认,未来的研究需要对比 FMV 对不同 ASIA 分级的 SCI 患者性功能的疗效来探讨其最佳适应证。当前,FMV 在 SCI 后性功能障碍的研究仍有所欠缺,未来的研究方向也值得被关注。

### 3 小 结

SCI 是一种破坏性极强及危及生命的神经系统疾病,SCI 患者普遍存在肢体、肠道、膀胱和性功能障碍,还可能会引起一系列诸如尿路感染、肺炎、深静脉血栓、自主神经反射亢进、异位骨化等并发症,严重影响患者的健康和生活质量,同时带来巨大的经济负担。

随着全球人口的增长和社会经济的高速发展,据统计,SCI 发病率和负担在过去 30 年中呈上升趋势,此外,人口老龄化日益加重,还需要关注老年人摔倒致 SCI 的问题。神经科学研究的发展,以及包括细胞移植、外科神经刺激和药物管理、物理治疗等在内的各项干预措施的日益普及,使得 SCI 及其相关并发症的康复疗效得到提升。然而,目前 SCI 的完全康复在国际上仍旧是一大难题,更多、更高效的治疗手段还有待探索。FMV 作为一种非侵入性物理治疗手段,具有便捷、依从性高、安全等优点,近年来广泛应用于 SCI 患者的康复中,如其在促进 SCI 后肢体功能、性功能、二便功能的恢复中取得了一定疗效,并可用于防治骨质疏松,可视为一种辅助性治疗手段,但部分研究因振动参数的不同使疗效存在一定的差异和争议。因人体不同肌肉的固有频率及患者个体耐受性的不同,对不同肢体、器官或肌肉施加 FMV 会得到不同的结果,现有研究中 FMV 的振动参数也不尽相同,缺乏统一量化标准,且 FMV 对不同严重程度 SCI 患者康复疗效的对照性研究仍欠缺。期待未来数量更多且更多样化的 SCI 样本通过个体化、统一规范化 FMV 的科学研究来确证 FMV 的疗效,并从不同 ASIA 分级的维度探索 FMV 的最佳适应证,提高其在 SCI 康复领域的应用价值。

### 参考文献

- [1] CHANG J, QIAN Z, WANG B, et al. Transplantation of A2 type astrocytes promotes neural repair and remyelination after spinal cord injury[J]. *Cell Commun Signal*, 2023, 21(1): 37.
- [2] DING W, HU S, WANG P, et al. Spinal cord injury: The global incidence, prevalence, and disability from the global burden of disease study 2019[J]. *Spine*, 2022, 47(21): 1532-1540.
- [3] KHADOUR F A, KHADOUR Y A, MENG L, et al. Epidemiological features of traumatic spinal cord injury in Wuhan, China[J]. *J Orthopaed Surg Res*, 2023, 18(1): 1-9.
- [4] 黄晓琳, 燕铁斌. 康复医学[M]. 6 版. 北京: 人民卫生出版社, 2018: 159.
- [5] ANJUM A, YAZID M D, FAUZI DAUD M, et al. Spinal cord injury: Pathophysiology, multi-molecular interactions, and underlying recovery mechanisms[J]. *Int J Molecul Sci*, 2020, 21(20): 7533.
- [6] HOLMES D. Spinal-cord injury: Spurring regrowth[J]. *Nature*, 2017, 552(7684): S49.
- [7] FEIGIN V L, VOS T, ALAHDAB F, et al. Burden of neurological disorders across the US

- from 1990-2017: A global burden of disease study[J]. *JAMA neurol*, 2021, 78(2):165-176.
- [8] 安云,尹露,严隽陶. 基于人体组织固有频率特征探讨局部机械振动疗法的优化参数[J]. *中华中医药杂志*, 2021, 36(12):7096-7098.
- [9] MOGGIO L, DE SIRE A, MAROTTA N, et al. Vibration therapy role in neurological diseases rehabilitation: An umbrella review of systematic reviews[J]. *Disabil Rehabil*, 2022, 44(20):5741-5749.
- [10] 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.
- [11] WANG H, CHANDRASHEKHAR R, RIPPE-TOE J, et al. Focal muscle vibration for stroke rehabilitation: A review of vibration parameters and protocols[J]. *Appl Sci*, 2020, 10(22):8270.
- [12] TAHIR S, BAIG M O, RATHORE F A, et al. The emerging role of focal muscle vibration in rehabilitation of neurological disorders [J]. *JPMA*, 2022, 72(10):2126-2128.
- [13] FILIPPI G M, RODIO A, FATTORINI L, et al. Plastic changes induced by muscle focal vibration: A possible mechanism for long-term motor improvements [J]. *Front Neurosci*, 2023, 17:231.
- [14] NARDONE R, GOLASZEWSKI S, CHRISTOVA M, et al. Effects of focal muscle vibration on corticospinal excitability[J]. *J Neurol Sci*, 2017, 375:486-487.
- [15] PFENNINGER C, GROSBOILLOT N, DIGONET G, et al. Effects of prolonged local vibration superimposed to muscle contraction on motoneuronal and cortical excitability[J]. *Front Physiol*, 2023, 14:11.
- [16] MURILLO N, KUMRU H, VIDAL-SAMSO J, et al. Decrease of spasticity with muscle vibration in patients with spinal cord injury[J]. *Clin Neurophysiol*, 2011, 122(6):1183-1189.
- [17] YEN C L, MCHENRY C L, PETRIE M A, et al. Vibration training after chronic spinal cord injury: Evidence for persistent segmental plasticity[J]. *Neurosci Lett*, 2017, 647:129-132.
- [18] VOJINOVIC T J, LINLEY E, ZIVANOVIC A, et al. Effects of focal vibration and robotic assistive therapy on upper limb spasticity in incomplete spinal cord injury[C]//2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). IEEE, 2019:542-547.
- [19] DEFOREST B A, BOHORQUEZ J, PEREZ M A. Vibration attenuates spasm-like activity in humans with spinal cord injury [J]. *J Physiol*, 2020, 598(13):2703-2717.
- [20] FIELD-FOTE E, NESS L L, IONNO M. Vibration elicits involuntary, step-like behavior in individuals with spinal cord injury[J]. *Neurorehabil Neural repair*, 2012, 26(7):861-869.
- [21] BARTHÉLÉMY A, GAGNON D H, DUCLOS C. Gait-like vibration training improves gait abilities: A case report of a 62-year-old person with a chronic incomplete spinal cord injury[J]. *Spinal Cord Series Cases*, 2016, 2(1):1-4.
- [22] BACKUS D, CORDO P, GILLOTT A, et al. Assisted movement with proprioceptive stimulation reduces impairment and restores function in incomplete spinal cord injury[J]. *Arch Physical Med Rehabil*, 2014, 95(8):1447-1453.
- [23] KULICH H R, BASS S R, PIVA S R, et al. Preliminary feasibility and acute physiological effects of a single session of upper limb vibration training for persons with spinal cord injury [J]. *J Spinal Cord Med*, 2022; 1-11.
- [24] SUTOR T W, KURA J, MATTINGLY A J, et al. The effects of exercise and activity-based physical therapy on bone after spinal cord injury[J]. *Int J Molecul Sci*, 2022, 23(2):608.
- [25] LINCOLN S, MORSE L R, TROY K, et al. MicroRNA-148a-3p is a candidate mediator of increased bone marrow adiposity and bone loss following spinal cord injury[J]. *Front Endocrinol*, 2022, 13:910934.
- [26] RUBIN C, TURNER A S, BAIN S, et al. Low mechanical signals strengthen long bones[J]. *Nature*, 2001, 412(6847):603-604.
- [27] ASSELIN P, SPUNGEN A M, MUIR J W, et al. Transmission of low-intensity vibration through the axial skeleton of persons with spinal cord injury as a potential intervention for preservation of bone quantity and quality[J]. *J Spinal Cord Med*, 2011, 34(1):52-59.
- [28] DUDLEY-JAVOROSKI S, PETRIE M A, MCHENRY C L, et al. Bone architecture adaptations after spinal cord injury: Impact of long-term vibration of a constrained lower limb[J]. *Osteoporos Int*, 2016, 27:1149-1160.
- [29] TAMBURELLA F, PRINCI A A, PIERMARIA J, et al. Neurogenic bowel dysfunction changes after osteopathic care in individuals with



- spinal cord injuries: A preliminary randomized controlled trial[C]//Healthcare. MDPI, 2022, 10(2):210.
- [30] 刘红芳,龙彩雪,黎声芳,等.老年脊髓损伤患者发生严重神经源性肠道功能障碍的危险因素及风险模型构建[J].中国老年学杂志,2022,42(23):5746-5748.
- [31] 王成秀,周建瑞,袁野,等.综合干预联合振动疗法对脊髓损伤患者便秘的影响[J].齐鲁护理杂志,2015,21(13):73-75.
- [32] 鄢茵,管细红,郑茶凤.多频振动治疗仪对脊髓损伤后便秘的疗效探讨[J].江西医药,2018,53(12):1438-1440.
- [33] 金娟,周莉,李娜,等.腹部定时定向多频振动按摩在脊髓损伤后神经源性肠功能障碍中的应用[J].中国现代医药杂志,2020,22(12):37-40.
- [34] PEREZ N E, GODBOLE N P, AMIN K, et al. Neurogenic bladder physiology, pathogenesis, and management after spinal cord injury[J]. J Personal Med, 2022, 12(6):968.
- [35] LAESSØE L, SØNKSEN J, BAGI P, et al. Effects of ejaculation by penile vibratory stimulation on bladder capacity in men with spinal cord lesions [J]. J Urol, 2003, 169(6):2216-2219.
- [36] BIERING-SØENSEN F, LAESØE L, SØKSEN J, et al. The effect of penile vibratory stimulation on male fertility potential, spasticity and neurogenic detrusor overactivity in spinal cord lesioned individuals[J]. Acta Neurochir Suppl, 2005, 93:159-163.
- [37] 高李侠,胡庆奎,彭金良.简易盆底振动治疗神经源性膀胱[J].中国康复,2012,27(6):457-458.
- [38] GUESS M K, CONNELL K A, CHUDNOFF S, et al. The effects of a genital vibratory stimulation device on sexual function and genital sensation[J]. Urogynecology, 2017, 23(4):256-262.
- [39] DEWITTE M, REISMAN Y. Clinical use and implications of sexual devices and sexually explicit media[J]. Nature Rev Urol, 2021, 18(6):359-377.
- [40] PIOTROWSKA A, CZERWINSKA-LEDWIG O, STEFANSKA M, et al. Changes in skin microcirculation resulting from vibration therapy in women with cellulite[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(6):3385.
- [41] IBRAHIM E, BRACKETT N L, LYNNE C M. Penile vibratory stimulation for semen retrieval in men with spinal cord injury: Patient perspectives[J]. Res Rep Urol, 2022, 74:149-157.
- [42] NEHRA A, WERNER M A, BASTUBA M, et al. Vibratory stimulation and rectal probe electroejaculation as therapy for patients with spinal cord injury: Semen parameters and pregnancy rates[J]. J Urol, 1996, 155(2):554-559.
- [43] CALABRÒ R S, NARO A, PULLIA M, et al. Improving sexual function by using focal vibrations in men with spinal cord injury: Encouraging findings from a feasibility study[J]. J Clin Med, 2019, 8(5):658.
- [44] IBRAHIM E, JENSEN C F S, SUNARA I, et al. Evaluation of a re-engineered device for penile vibratory stimulation in men with spinal cord injury[J]. Spinal Cord, 2021, 59(2):151-158.
- [45] SLOCUM C, HALLORAN M, UNSER C. A primary care provider's guide to clinical needs of women with spinal cord injury[J]. Topics Spinal Cord Inj Rehabil, 2020, 26(3):166-171.
- [46] DÍAZ-RUIZ M C, ROMERO-GALISTEO R P, ARRANZ-MARTÍN B, et al. Vibration or transcutaneous tibial nerve stimulation as a treatment for sexual dysfunction in women with spinal cord injury: Study protocol for a randomized clinical trial[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(3):1478.
- [47] SIPSKI M L, ALEXANDER C J, GOMEZ-MARIN O, et al. Effects of vibratory stimulation on sexual response in women with spinal cord injury[J]. J Rehabil Res Dev, 2005, 42(5):609-616.

(收稿日期:2023-06-18 修回日期:2023-10-29)