

可穿戴式神经肌肉电刺激预防 下肢深静脉血栓的研究进展

殷稚飞¹, 马雨¹, 宋洁¹, 刘文涛², 邹俊³, 沈滢^{1*}

¹ 南京医科大学第一附属医院, 江苏 南京 210029;

² 南京医科大学基础医学院, 江苏 南京 210029;

³ 苏州大学附属第一医院, 江苏 苏州 215006

* 通信作者: 沈滢, E-mail: shenyings@njmu.edu.cn

收稿日期: 2024-02-19; 接受日期: 2024-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2009700); 江苏省医学重点学科(XK201110)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.05013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摘要 深静脉血栓(DVT)是造成全球性医疗保健、社会和经济问题的常见疾病,其临床危害与社会影响不容忽视。当前防治体系存在显著不足,传统抗凝药物存在出血风险,间歇气压治疗依从性差,且多数患者出院后缺乏长期居家治疗的延续。这种临床需求与防治手段间的巨大落差,亟待创新性解决方案的出现。神经肌肉电刺激(NMES)是一种有效预防下肢DVT的非侵入性治疗方法,其通过刺激下肢肌肉群产生“肌肉泵”效应,有助于增加下肢的血液循环、减少静脉瘀滞、改善下肢静脉的神经供应、降低发生DVT的风险。然而,常规NMES存在便携性差、适用场合局限、电极导致皮肤过敏等缺点。随着可穿戴式设备的迅速发展,尤其与新型生物材料结合的NMES在降低DVT风险、远程居家应用方面更具优势。虽然NMES预防DVT的最佳干预窗口期尚未达成国际共识,但是可穿戴式NMES设备的突破性进展为临床提供了兼具早期干预可行性与长期治疗持续性的创新解决方案。本文从可穿戴式NMES预防下肢DVT的作用机制、应用前景和介入时机等方面进行综述,以期该项技术的临床推广提供参考。

关键词 下肢深静脉血栓;神经肌肉电刺激;肌肉泵;可穿戴式;远程居家

静脉血栓栓塞症包括深静脉血栓(deep venous thrombosis, DVT)形成和肺栓塞2种主要表现形式,是造成全球性医疗保健、社会和经济问题的常见疾病。随着日间手术、快速康复和早期出院的趋势增加,而患者出院后重视度不高,多数DVT在离院后发生^[1]。有效预防DVT对于住院、出院患者,尤其是外科、创伤和重症监护病房的高风险患者至关重要。《深静脉血栓形成的诊断和治疗指南(第三版)》^[2]中明确指出,在完成DVT的早期治疗后,患者仍需维持长期的抗凝治疗以防止DVT复发。现有的长期干预措施包括药物方法(如肝素、华法林等)或机械方法(包括渐进式弹力袜、间歇气压治疗),均有助于促进静脉内血液流动、降低血液凝固风险^[3]。

尽管临床治疗方案以药物预防为首选,但是其造成出血的风险较高,部分患者(如出血倾向者、孕妇及哺乳期妇女、肝肾功能不全者等)存在药物使用禁忌,且长期服药尚缺乏统一规范。此外,对于单纯性DVT患者和并发症风险较低的DVT患者,美国血液学会《2020年静脉血栓栓塞管理指南》^[4]建议为其提供居家治疗以替代住院治疗。因此,寻求一种无创、便携、依从性好的非药物干预措施非常关键。然而,常用非药物治疗方法存在多种局限性,如弹力袜和间歇气压治疗可造成患者穿戴不适、束缚感重、皮肤瘙痒、出汗和腓神经麻痹等不良反应,并且间歇气压治疗还制约了患者日常活动的移动性,严重降低了患者使用的依从性^[5]。

引用格式: 殷稚飞, 马雨, 宋洁, 等. 可穿戴式神经肌肉电刺激预防下肢深静脉血栓的研究进展[J]. 康复学报, 2025, 35(5): 536-542.

YIN Z F, MA Y, SONG J, et al. Research development on wearable neuromuscular electrical stimulation for preventing deep vein thrombosis in lower extremity [J]. Rehabil Med, 2025, 35(5): 536-542.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2025.05013

©《康复学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 4.0 协议

© Rehabilitation Medicine, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

神经肌肉电刺激(neuromuscular electrical stimulation, NMES)是一种预防DVT的新型机械方法,属于物理因子治疗范畴。其通过体表电极将低频脉冲电流通过皮肤传递到运动神经或靶向肌群,以诱导非自主性肌肉收缩^[6]。然而,常规NMES治疗因仪器设备笨重不可移动、需要固定导线连接电极片等限制,患者只能在特定的医疗机构接受治疗,往往因时间消耗大、交通成本高等因素而严重影响患者配合度和疗效。为了最大限度地简化NMES治疗程序、提高患者依从性,近年来依据国际指南的远程居家治疗的建议及智能化可穿戴设备迅速发展的背景,可穿戴式NMES设备在预防DVT的应用得到进一步关注和推广。已有研究报道,新型可穿戴式NMES设备能应用于长途飞行人群,诱发下肢的肌肉泵效应以促进静脉、动脉和微血管循环,对预防DVT有积极作用^[7]。该类型的NMES设备由电池持续供电、体积小、无线便携,可有效增加下肢的血液循环且对下肢的日常活动影响较小^[8]。本文拟就可穿戴式NMES预防下肢DVT的作用机制、研究进展和应用前景进行综述,以期为后续的临床应用和研究提供思路与参考。

1 NMES预防DVT的作用机制

血管内皮损伤、血液高凝状态和循环淤滞是DVT的三大病理生理学机制^[9]。NMES降低DVT风险的核心机制是通过非侵入性的体表电流引起下肢肌肉收缩、肌肉泵激活、静脉容积和血流速度增加,从而促进静脉排空及减少静脉瓣周围的血流淤滞^[10]。

1.1 NMES可改善下肢血流动力学,减少静脉瘀滞

NMES通过刺激下肢肌肉群(如胫前肌、腓骨长肌、比目鱼肌等)产生节律性收缩舒张活动,形成“肌肉泵”效应,从而有效挤压下肢血管、增加静脉血流量、促进淋巴回流^[6]。有研究证实,对健康受试者的腓神经采用低频1 Hz的NMES可使腓骨、胫后静脉和腓肠肌静脉的峰值血流速度显著增加^[11]。尽管静脉血流速度作为预防DVT发病率的评价指标在学术界仍存在争议(如测量标准化、个体差异等问题),但现有循证医学证据已明确证实其与临床获益之间的相关性。

1.2 NMES可改善组织代谢,降低血液高凝状态

长期卧床和制动可导致骨骼肌中的巨噬细胞含量增加和细胞极化,导致下肢肌肉质量的快速损失和胰岛素代谢功能障碍(特别是胰岛素抵抗)。

胰岛素抵抗可导致纤溶状态失衡,出现纤维蛋白原和纤溶酶原激活剂抑制剂-1水平显著提高,血液呈高凝状态。血液高凝状态影响正常纤溶过程的启动,容易形成DVT^[12]。有研究显示,卧床3 d的骨质疏松性椎体骨折患者发生DVT的风险可高达43.4%^[13]。REIDY等^[14]研究证实,NMES引起肌肉收缩可诱导促炎性巨噬细胞反应,改变骨骼肌巨噬细胞含量,维持肌肉质量,改善胰岛素抵抗,但该研究亦指出,此效应通过非自主性肌肉收缩产生,因此需要至少6周才能起效。

1.3 NMES可改善下肢静脉的神经供应

有研究指出,神经损伤增加的DVT程度超过了活动减退相关静脉瘀滞的预期程度,NMES可通过神经源性途径抑制血栓形成^[15]。血管周围神经在钙离子流入后释放递质,通过扩散或间隙连接到达相邻的神经、内皮和平滑肌细胞。NMES可促进血管直径的周期性变化,调节局部组织灌注、血压和其他基本功能,并影响远隔血管平滑肌细胞,引起整个血管壁振荡^[16]。

2 常规NMES在预防DVT中的应用与局限性

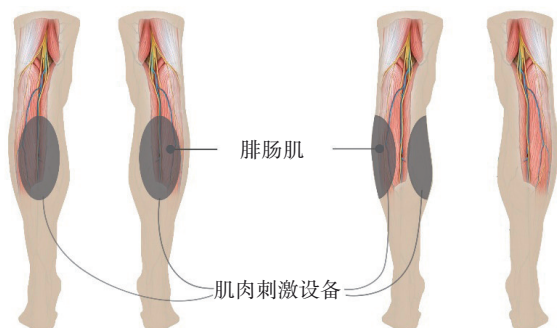
2.1 常规NMES在预防DVT中的应用

常规NMES多采用双通道或四通道的标准脉冲电刺激设备,具有主机、导线和电极片等装置,波形以双向不对称方波为主^[17]。此干预措施有助于下肢动脉和微循环通量增加,已被证明在血流动力学反应方面不劣于弹力袜^[18]。但使用NMES时需首先排除已经形成DVT的患者,建议先行下肢动/静脉彩色多普勒超声检查。常规NMES在预防DVT中的应用见表1、图1。

上述研究均证实,常规NMES可促进下肢静脉肌肉泵的激活和动脉血流的改善。根据NMES特性,刺激神经比刺激肌肉运动点的电流强度阈值低、患者舒适度佳。因此,目前预防下肢DVT的靶点优先选择腓总神经,其次为小腿肌群运动点(如比目鱼肌)^[20]。亦有报道采用股四头肌作为靶点,结果发现患者股静脉的血流平均流速可增加2.8倍,明显优于弹力袜和间歇气压治疗的疗效^[25]。此外,面积小的电极片电流密度大,对于浅表神经和薄脂肪层更具舒适性和选择性;而在相同电流强度下,面积较大的电极片可降低电流密度,更适合直接刺激肌肉,提高患者的舒适度和耐受度^[26]。

表1 常规NMES在预防DVT中的应用研究
Table 1 Application research of conventional NMES in Preventing DVT

研究者	研究时间	研究对象	样本量	研究方案		研究周期	研究结论
				试验组	对照组		
杨金州 ^[19]	2020年	髋关节置换术患者	86	NMES+康复训练	常规预防措施	1次/d, 20 min/次	联合治疗可有效改善下肢深静脉血液流速, 降低DVT发生率
RAVIKU-MAR等 ^[20]	2021年	下肢静脉曲张患者	76	B组 C组	A组(无NMES)	6周, 7 d/周, B组: 1次/d, 30 min/次; C组: 2次/d, 30 min/次	NMES可增加血流参数; 可改善患者6周时的生活质量和临床严重程度
聂晓奇等 ^[21]	2020年	自发性脑出血患者	76	常规治疗+NMES	常规治疗	1周, 7 d/周, 3次/d, 2 h/次	NMES可显著降低下肢DVT发生率
王洁等 ^[22]	2021年	全脑血管造影术后患者	982	常规护理+NMES	常规护理	3 d, 6次	NMES可显著降低下肢DVT发生率, NMES后不同时间点舒适度评分均显著高于对照组
DAS等 ^[23]	2021年	慢性下肢静脉溃疡患者	14	1 Hz NMES腓总神经		1次, 30 min/次	NMES可显著增加患者坐位、卧位下的动脉峰值流速与静脉峰值流速
BULL等 ^[24]	2023年	慢性下肢静脉溃疡患者	60	标准护理+NMES	标准护理	4周, 7 d/周, 12 h/d	NMES可促进伤口愈合速度, VAS疼痛评分降低幅度更大



注: 电极位点为腓肠肌。

Note: electrode site on gastrocnemius muscle.

图1 常规NMES设备治疗DVT示意图

Figure 1 Schematic diagram of conventional NMES device for DVT treatment

2.2 常规NMES预防DVT的局限性

常规NMES在预防DVT时仍需要突破诸多瓶颈问题。比如, 需要设计更具便携性、易于操作且安全性高的设备, 以方便患者独自居家治疗, 这不仅可以减少治疗对日常生活的干扰, 还有利于减少患者到医疗机构的消耗成本, 从而提高治疗的依从性。特别是以下肢肌肉泵激活为主要目的时, NMES设备应该携带方便、可自行充电且操作简单, 同时治疗过程中不影响患者的下肢活动^[27]。此外,

常规NMES设备大多采用自粘式凝胶电极, 虽有利于和皮肤的接触与固定, 但长期使用会因干燥而降低凝胶电阻率, 导致导电性能降低; 同时, 凝胶电极重复使用时无法有效清洗或适当消毒, 可能会引起患者的皮肤过敏反应, 甚至造成感染风险^[28]。因此, 需要研发具备导电性能佳、生物相容性好、可自生电特质的电极片材料, 以便与NMES设备结合后更充分发挥其在预防下肢DVT长周期管理方面的优势。

3 可穿戴式NMES在预防DVT中的技术迭代与应用革新

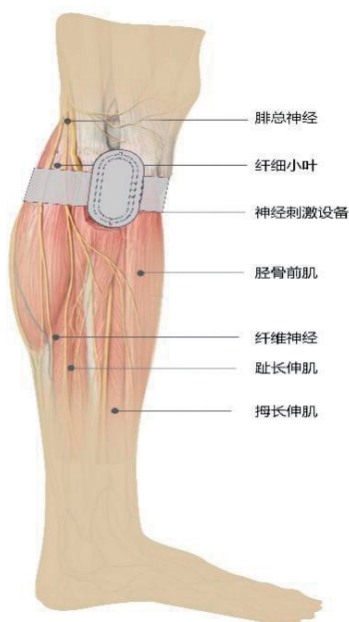
3.1 可穿戴式NMES在预防DVT中的应用

为了克服上述常规NMES设备的局限性, 便携一体式设备或者与柔性材质结合的可穿戴设备已逐渐成为一种替代技术, 在降低DVT风险、远程居家应用方面更具优势^[29]。最新的可穿戴式NMES (GekoTM, 英国) 将发电器和控制器集成于一次性可黏性电极片上, 并采用可持续锂电池(可治疗24 h)^[30]。该装置轻便小巧(重量为18 g), 具有更高的灵活性和可调节性, 有利于患者的个性化治疗方案实施^[31]。可穿戴式NMES在预防DVT中的应用见表2、图2。

表2 可穿戴式NMES在预防DVT中的应用研究

Table 2 Application research of wearable NMES in preventing DVT

研究者	研究时间	研究对象	样本量	可穿戴NMES设备	研究内容	研究时间	研究结论
ZHAO等 ^[32]	2022年	全髋关节置换术后患者	60	Geko设备	可穿戴NMES用于促进恢复全髋关节置换手术后的可行性	5 d, 24 h/d	NMES在术后疼痛、小腿肿胀和平均住院时间方面表现出有益的总体趋势
CALBIYIK和YIMAZ ^[33]	2022年	全髋关节置换术后患者	64	Geko设备	NMES组接受低分子肝素+NMES治疗;非NMES组接受低分子肝素+加压绷带	6 d, 24 h/d	虽然2组腿部水肿相似,但是NMES组股静脉峰值流速显著增加
SUND-STRÖM等 ^[29]	2023年	健康人	10	置于袜子内层的针织集成横向纺织电极	纺织电极与标准凝胶电极对静脉峰值流速和不适程度影响	2次, 3个周期/次, 8 s/次	纺织电极增加了腓静脉中静脉峰值流速;但由于需要更高的电流,舒适度较低
JUTHBERG等 ^[34]	2023年	健康人	11	置于袜子内层的针织集成横向纺织电极	不同参数对NMES的体感舒适度、电流强度和能量消耗的影响	20次, 8.5 s/次	频率为1 Hz和脉宽为150、200、400 μs的NMES可以在踝跖屈时产生最佳舒适度/能耗比
FLODIN等 ^[25]	2023年	健康人	15	集成在裤子内层的纺织电极	不同的NMES双相脉冲波模式的静脉峰值流速	11次, 共138.5 s	NMES使后股静脉的峰值流速较基线显著增加了2~3倍



注:电极位点为腓总神经。

Note: electrode site on common peroneal nerve.

图2 可穿戴式NMES设备治疗DVT示意图

Figure 2 Schematic diagram of wearable NMES device for DVT treatment

有研究对比了一体式NMES设备、常规NMES设备和间歇气压治疗设备对DVT的影响^[35],将一体式NMES设备贴附于小腿腓总神经出口处的皮肤,

诱发踝背屈动作,激活下肢肌肉泵,刺激电流的频率为1 Hz,电流强度最大可达27 mA,脉宽可在70、100、140、200、280、400和560 μs等7种设置中选择,结果显示,2种NMES方式对下肢静脉血流时间、平均流速的影响均优于间歇气压治疗,而间歇气压治疗对峰值流速的影响更大;阈值强度的一体式NMES使静脉流量增加了14%,而间歇气压治疗则使静脉流量减少了4%;一体式NMES设备具有最佳的患者舒适度(89%),其次是常规NMES设备(84%),间歇气压治疗设备最低(66%)。相较于常规NMES和间歇气压治疗设备,一体式NMES的舒适性、依从性、移动性和便携性是患者认为的主要优势,且未影响正常活动与跌倒风险。

3.2 新型生物材料与可穿戴式NMES的协同创新

与新型生物材料结合的可穿戴式NMES电极日益受到关注,特别是以天然生物聚合物为主要材料的导电水凝胶结合了生物聚合物的生物相容性和生物降解性,以及导电水凝胶的电活性特性,已初步实现了包括生理信号传感、健康监测、神经接口、透皮给药、神经电刺激和人机交互等广泛功能^[36]。此外,利用导电织物开发的纺织电极是目前较多研究的新型材料。有研究定量评估了纺织电极对健康受试者的皮肤阻抗、刺激阈值和刺激舒适度,并

与湿纺织电极和导电凝胶电极进行了比较,结果发现基于柔性材质(纺织电极)的可穿戴式NMES设备可降低引起肌肉收缩的最小电流强度,有利于规避皮肤电击伤的风险,其安全性和舒适性明显优于湿纺织电极和导电凝胶电极;与常规的自黏式凝胶电极相比,纺织电极具有良好的通风性、柔韧性和可折叠性,及长效使用的皮肤低敏性;纺织电极还具有与衣物集成并方便清洁的优点^[37]。常规凝胶电极的NMES证实,频率为36 Hz时受试者的体感舒适度最佳且不易产生肌肉疲劳。但JUTHBERG等^[34]采用置于袜内的针织集成横向纺织电极(尺寸为2 cm×2.5 cm)对11例健康受试者的小腿肌群施加NMES,该研究结果显示,频率为1 Hz的可穿戴式NMES可以在踝跖屈时产生最佳舒适度/能耗比,比36 Hz明显耗能减少(0.6 mJ vs. 14.9 mJ)。这一方面是基于纺织电极的高舒适度和低能耗优势,另一方面也是基于可穿戴式NMES设备所需电池容量小。但如果仅以电流舒适度为衡量指标而不考虑电池容量时,则建议设置频率为36 Hz。这是常规NMES与便携式NMES在参数上的主要区别之一。

4 NMES预防DVT的介入时机

目前,关于不同疾病的NMES预防DVT的最佳介入时机有待研究并规范,但总体原则是早期预防、早期诊断及早期干预,实施愈早,预后愈佳,可提前至术中并在术后延续。在髋关节或膝关节大型手术后,由于患者的血浆处于高凝状态,再加上疼痛刺激和卧床制动,因此下肢DVT发生风险高。GOYAL等^[38]观察了200例髋关节周围手术的患者,其中对照组100例仅行术后下肢等长收缩或动态活动,试验组100例在对照组的基础上于手术过程中给予NMES干预,1周后试验组发生DVT 2例、对照组发生DVT 6例。IZUMI等^[39]也在踝关节置换手术中采用NMES作用于患者下肢腓总神经,结果显示与对照组对比,电刺激组患者在术后即刻的D-二聚体和可溶性纤维蛋白单体复合物水平显著降低,各组在NENS中的水平均显著降低,减轻了下肢静脉瘀滞和血液高凝状态。但目前早期介入NMES的研究多集中在外科手术患者,有关其他疾病的介入时机研究鲜见,有待进一步关注。而便携式、可穿戴式NMES则在长期应用中更具有优势。LOBASTOV等^[40]证实,对完成6个月标准抗凝疗程的患者进行便携式NMES治疗12个月无DVT复发(0/30,0%),

显著优于对照组(7/30,23.3%)。虽然NMES预防DVT的最佳介入时机尚未明确,但是当患者需要使用机械措施预防DVT时(如骨科术后形成DVT的风险高),NMES可能是更佳的选择且应尽早实施。

4 小结与展望

可穿戴式NMES设备有助于预防DVT,不仅轻便灵活,且刺激器可以按不同的序贯顺序设置频率和脉宽,为制定个体化方案提供可能性。特别是与新型材质结合的可穿戴式设备,可显著提高患者的舒适性、安全性和依从性,有利于快速实现与肢体主动运动相结合的康复方案,有助于尽早实现日常生活的完全独立,减少对医疗专业人员的依赖,特别是在长周期远程居家治疗策略中的应用更具前景。但现有证据的质量较低,临床研究纳入的受试者人群、诊断标准、治疗参数等异质性较大,未来需要开展更严谨的高质量随机对照试验进行验证。因皮下组织黏度产生阻力,用标准体表刺激方式激活深层组织结构的作用有限,且NMES诱导的非自主性肌肉收缩可能不如自主肌肉收缩有效。理想的传输设置(频率、能量等),特别是居家治疗设备的参数仍然未知。另外,优化电极尺寸和材质、电极放置靶点对提高肌肉收缩的舒适度和强度也至关重要。

参考文献

- [1] NEEMAN E, LIU V, MISHRA P, et al. Trends and risk factors for venous thromboembolism among hospitalized medical patients [J]. *JAMA Netw Open*, 2022, 5(11): e2240373.
- [2] 中华医学会外科学分会血管外科学组. 深静脉血栓形成的诊断和治疗指南(第三版)[J]. *中华普通外科杂志*, 2017, 32(9): 807-812.
Vascular Surgery Group, Surgery Branch, Chinese Medical Association. Guidelines for diagnosis and treatment of deep venous thrombosis (third edition) [J]. *Chin J Gen Surg*, 2017, 32(9): 807-812.
- [3] PRAXITELOUS P, EDMAN G, ACKERMANN P W. Hemodynamics and tolerability of lower-limb intermittent pneumatic compression devices and neuromuscular stimulation [J]. *Transl Sports Med*, 2018, 1(4): 143-150.
- [4] ORTEL T L, NEUMANN I, AGENO W, et al. American Society of Hematology 2020 guidelines for management of venous thromboembolism: treatment of deep vein thrombosis and pulmonary embolism [J]. *Blood Adv*, 2020, 4(19): 4693-4738.
- [5] DELANOIS R, SODHI N, ACUNA A, et al. Use of home neuromuscular electrical stimulation in the first 6 weeks improves function and reduces pain after primary total knee arthroplasty: a

- matched comparison [J]. *Ann Transl Med*, 2019, 7(Suppl 7):S254.
- [6] HAJIBANDEH S, HAJIBANDEH S, ANTONIOU G A, et al. Neuromuscular electrical stimulation for the prevention of venous thromboembolism [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2017, 11(11): CD011764.
- [7] HARRIS C, RAMAGE D, BOLOORCHI A, et al. Using a muscle pump activator device to stimulate healing for non-healing lower leg wounds in long-term care residents [J]. *Int Wound J*, 2019, 16(1):266-274.
- [8] MA Y, HE C, GONG Y H, et al. Effects of low-frequency pulsed electrical stimulation at the common peroneal nerve on chronic refractory wounds of the lower limb: a randomized controlled trial [J]. *Health Sci Rep*, 2024, 7(9):e70023.
- [9] ZHANG L, LIU X B, PANG P, et al. Incidence and risk factors of admission deep vein thrombosis in patients with traumatic fracture: a multicenter retrospective study [J]. *Clin Appl Thromb Hemost*, 2023, 29: 10760296231167143.
- [10] LATTIMER C R, AZZAM M, PAPACONSTANDINO J A, et al. Neuromuscular electrical stimulation reduces sludge in the popliteal vein [J]. *J Vasc Surg Venous Lymphat Disord*, 2018, 6(2): 154-162.
- [11] GRIFFIN M, BOND D, NICOLAIDES A. Measurement of blood flow in the deep veins of the lower limb using the Geko™ neuromuscular electro-stimulation device [J]. *Int Angiol*, 2016, 35(4): 406-410.
- [12] AVAZZADEH S, O'FARRELL A, FLAHERTY K, et al. Comparison of the hemodynamic performance of two neuromuscular electrical stimulation devices applied to the lower limb [J]. *J Pers Med*, 2020, 10(2):36.
- [13] CHO S T, KIM S J, NAM B J, et al. Absolute bed rest duration of 3 days for osteoporotic vertebral fractures: a retrospective study [J]. *Asian Spine J*, 2022, 16(6): 898-905.
- [14] REIDY P T, EDVALSON L T, MCKENZIE A I, et al. Neuromuscular electrical stimulation and protein during bed rest increases CD11b(+) skeletal muscle macrophages but does not correspond to muscle size or insulin sensitivity [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2020, 45(11): 1261-1269.
- [15] STEFANO C. Electrical muscle stimulation in thromboprophylaxis: review and a derived hypothesis about thrombogenesis—the 4th factor [J]. *Springerplus*, 2016, 5(1): 884.
- [16] STEFANO C, KARATZANOS E, MITSIOU G, et al. Neuromuscular electrical stimulation acutely mobilizes endothelial progenitor cells in critically ill patients with sepsis [J]. *Ann Intensive Care*, 2016, 6(1):21.
- [17] 张昉, 孙智晶, 朱兰, 等. 神经肌肉电刺激预防妇科良性疾病术后下肢深静脉血栓临床疗效初探[J]. *中国实用妇科与产科杂志*, 2020, 36(7): 655-659.
- ZHANG F, SUN Z J, ZHU L, et al. A preliminary research of neuromuscular electrical stimulation to prevent deep vein thrombosis of lower limbs after gynecological surgery for benign diseases [J]. *Chin J Pract Gynecol Obstet*, 2020, 36(7): 655-659.
- [18] HARWOOD A E, PYMER S, IBEGGAZENE S, et al. Non-pharmaceutical alternatives or adjuncts to exercise programmes for people with intermittent claudication [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2021(3): CD014677.
- [19] 杨金州. 神经肌肉电刺激联合康复训练对髋关节置换术患者下肢深静脉血栓发生率的影响[J]. *中国疗养医学*, 2020, 29(4): 383-385.
- YANG J Z. Effect of neuromuscular electrical stimulation combined with rehabilitation training on the incidence of lower extremity deep vein thrombosis in patients undergoing hip arthroplasty [J]. *Chin J Conval Med*, 2020, 29(4): 383-385.
- [20] RAVIKUMAR R, LANE T R, BABBER A, et al. A randomised controlled trial of neuromuscular stimulation in non-operative venous disease improves clinical and symptomatic status [J]. *Phlebology*, 2021, 36(4): 290-302.
- [21] 聂晓奇, 郭宇宏, 程刚, 等. 神经肌肉电刺激预防自发性脑出血患者下肢深静脉血栓临床研究[J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2020, 20(8): 710-714.
- NIE X Q, GUO Y H, CHENG G, et al. Clinical study on the prevention of spontaneous intracerebral hemorrhage of lower extremity deep venous thrombosis by neuromuscular electrical stimulation [J]. *Chin J Contemp Neurol Neurosurg*, 2020, 20(8): 710-714.
- [22] 王洁, 彭剑英, 周佩洋, 等. 神经肌肉电刺激在全脑血管造影术后患者中的应用[J]. *介入放射学杂志*, 2021, 30(12): 1292-1295.
- WANG J, PENG J Y, ZHOU P Y, et al. Application of neuromuscular electrical stimulation in patients after receiving whole cerebral angiography [J]. *J Interv Radiol*, 2021, 30(12): 1292-1295.
- [23] DAS S K, DHOONMOON L, CHHABRA S. Neuromuscular stimulation of the common peroneal nerve increases arterial and venous velocity in patients with venous leg ulcers [J]. *Int Wound J*, 2021, 18(2): 187-193.
- [24] BULL R H, CLEMENTS D, COLLARTE A J, et al. The impact of a new intervention for venous leg ulcers: a within-patient controlled trial [J]. *Int Wound J*, 2023, 20(6): 2260-2268.
- [25] FLODIN J, WALLENIUS P, GUO L, et al. Wearable neuromuscular electrical stimulation on quadriceps muscle can increase venous flow [J]. *Ann Biomed Eng*, 2023, 51(12): 2873-2882.
- [26] MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ A, SENIN-CAMARGO F, RAPOSO-VIDAL I, et al. Effects of transcutaneous electrical nerve stimulation via peroneal nerve or soleus muscle on venous flow: a randomized cross-over study in healthy subjects [J]. *Medicine*, 2018, 97(36): e12084.
- [27] KIM G, KIM W S, KIM T W, et al. Home-based rehabilitation using smart wearable knee exercise device with electrical stimulation after anterior cruciate ligament reconstruction: a study protocol for a randomized controlled trial [J]. *Medicine*, 2020, 99(20): e20256.
- [28] LU P L, RUAN D X, HUANG M Q, et al. Harnessing the potential of hydrogels for advanced therapeutic applications: current achievements and future directions [J]. *Signal Transduct Target Ther*, 2024, 9(1): 166.

- [29] SUNDSTRÖM C, JUTHBERG R, FLODIN J, et al. Effects on hemodynamic enhancement and discomfort of a new textile electrode integrated in a sock during calf neuromuscular electrical stimulation [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2023, 123(9):2013–2022.
- [30] 吴晓臣, 李海燕. 电刺激用于静脉血栓栓塞症预防的应用进展[J]. *血管与腔内血管外科杂志*, 2023, 9(3):333–337.
WU X C, LI H Y. Application progress of electrical stimulation in preventing venous thromboembolism [J]. *J Vasc Endovasc Surg*, 2023, 9(3):333–337.
- [31] SUMMERS J A, CLINCH J, RADHAKRISHNAN M, et al. The Geko™ electro-stimulation device for venous thromboembolism prophylaxis: a NICE medical technology guidance [J]. *Appl Health Econ Health Policy*, 2015, 13(2):135–147.
- [32] ZHAO Y B, ZHANG B F, WANG Y Z, et al. Effectiveness of neuromuscular electrical stimulation for enhanced recovery after total hip replacement surgery: a randomized controlled trial [J]. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*, 2022, 13:21514593221129528.
- [33] CALBIYIK M, YILMAZ S. Role of neuromuscular electrical stimulation in increasing femoral venous blood flow after total hip prosthesis [J]. *Cureus*, 2022, 14(9):e29255.
- [34] JUTHBERG R, FLODIN J, GUO L, et al. Neuromuscular electrical stimulation in garments optimized for compliance [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2023, 123(8):1739–1748.
- [35] BADGER J, TAYLOR P, PAPWORTH N, et al. Electrical stimulation devices for the prevention of venous thromboembolism: preliminary studies of physiological efficacy and user satisfaction [J]. *J Rehabil Assist Technol Eng*, 2018, 5:2055668318800218.
- [36] GAMBOA J, PAULO-MIRASOL S, ESTRANY F, et al. Recent progress in biomedical sensors based on conducting polymer hydrogels [J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2023, 6(5):1720–1741.
- [37] ZHOU H, LU Y, CHEN W Z, et al. Stimulating the comfort of textile electrodes in wearable neuromuscular electrical stimulation [J]. *Sensors*, 2015, 15(7):17241–17257.
- [38] GOYAL A, ARORA S, BATRA S, et al. Role of calf muscle stimulation in the prevention of DVT in Indian patients undergoing surgeries for fractures around the hip [J]. *Indian J Orthop*, 2012, 46(5):542–547.
- [39] IZUMI M, IKEUCHI M, ASO K, et al. Less deep vein thrombosis due to transcutaneous fibular nerve stimulation in total knee arthroplasty: a randomized controlled trial [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2015, 23(11):3317–3323.
- [40] LOBASTOV K, RYZHKIN V, VORONTSOVA A, et al. Electrical calf muscle stimulation in patients with post-thrombotic syndrome and residual venous obstruction after anticoagulation therapy [J]. *Int Angiol*, 2018, 37(5):400–410.

Research Development on Wearable Neuromuscular Electrical Stimulation for Preventing Deep Vein Thrombosis in Lower Extremity

YIN Zhifei¹, MA Yu¹, SONG Jie¹, LIU Wentao², ZOU Jun³, SHEN Ying^{1*}

¹ The First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

² Nanjing Medical University School of Basic Medical Sciences, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

³ The First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

*Correspondence: SHEN Ying, E-mail: shenyings@njmu.edu.cn

ABSTRACT Deep vein thrombosis (DVT) is a common disease that causes global healthcare, social, and economic challenges, and its clinical harm and social impact cannot be ignored. The current prevention and treatment system has significant deficiencies, with traditional anticoagulant drugs posing a risk of bleeding, poor compliance with intermittent pneumatic compression therapy, and a lack of continuous long-term home-based treatment for most patients after discharge. The huge gap between clinical needs and prevention and treatment methods urgently requires innovative solutions. Neuromuscular electrical stimulation (NMES) is an effective non-invasive treatment method for preventing DVT of lower extremity. It stimulates the lower limb muscles to produce a "muscle pump" effect, which helps to increase blood circulation in the lower limbs, reduce venous stasis, improve nerve supply to the low limb veins, and reduce the risk of DVT. However, conventional NMES has disadvantages such as poor portability, limited applicability, and electrode induced skin allergies. With the rapid development of wearable devices, NMES combined with new biomaterials offers more advantages in reducing DVT risks and promoting remote home-based applications. Although there is no international consensus on the optimal intervention window for NMES to prevent DVT, the breakthrough progress of wearable NMES devices provides an innovative solution for clinical practice that combines early intervention feasibility and long-term treatment sustainability. This review elaborates on the mechanisms, application prospects, and intervention timing of wearable NMES in preventing DVT of lower extremity, in order to provide references for the clinical application of this technology.

KEY WORDS deep venous thrombosis of lower extremity; neuromuscular electrical stimulation; muscle pump; wearable; remote home-based

DOI:10.3724/SP.J.1329.2025.05013