

电刺激防治压力性损伤的机制研究及临床应用进展*

袁邻雁^{1,2} 吴孟航^{1,2} 刘晓艳² 杨雪² 李玲利^{2**}

¹四川大学华西医院普外科肝脏外科病房, 成都 610041; ²四川大学华西护理学院 护理学四川省重点实验室, 成都 610041

[摘要] 压力性损伤已成为老龄化社会的公共卫生问题。电刺激作为压力性损伤防治的无创、主动愈合的微环境治疗方式, 是目前最有前途的压力性损伤主动防治策略之一。电刺激可以促进受压部位肌肉收缩, 重新分布压力, 改善受压组织周围皮肤血流及微循环, 调控细胞行为。本文简要介绍了防治压力性损伤的电刺激技术与产品, 对电刺激防治压力性损伤的作用机制及临床应用作一综述。

[关键词] 电刺激; 压力性损伤; 防治; 机制

doi: 10.3969/j.issn.1674-7593.2024.02.022

Advancements in the Mechanism and Application of Electrical Stimulation for Preventing and Treating Pressure Injuries

Yuan Linyan^{1,2}, Wu Menghang^{1,2}, Liu Xiaoyan², Yang Xue², Li Lingli^{2**}

¹Division of Liver Surgery, Department of General Surgery, West China Hospital of Sichuan University, Chengdu 610041;

²West China School of Nursing, Sichuan University, Nursing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041

** Corresponding author: Li Lingli, email: lilingli2000@126.com

[Abstract] Pressure injury have emerged as a significant public health concern in societies with increasing elderly populations. Electrostimulation stands out as a non-invasive and proactive microenvironmental intervention for both the prevention and treatment of pressure injury, representing a forefront strategy in combating these injuries. By inducing muscle contractions and redistributing localized stress, electrical stimulation enhances blood flow and microcirculation in surrounding skin and tissues, and modulates cellular activities. This paper provides an overview of electrostimulation concepts and products aimed at preventing and treating pressure injury, delving into the underlying mechanisms and their clinical implications in managing these injuries.

[Key words] Electrical stimulation; Pressure injury; Prevention and treatment; Mechanisms

压力性损伤 (Pressure injury, PI) 又称为压疮, 是由于压力或剪切力所致的皮肤或皮下软组织的局部损伤, 常位于骨隆突处, 表现为深部组织受损但皮肤完整或开放性溃疡。2~4 期 PI 患者创面感染发生率可达 92.7%, 菌血症和死亡风险随之增加^[1]。因其高发病率、长病程、高花费及大量占用医疗卫生资源, 已成为威胁人类健康的公共卫生问题。随着老龄化进程的加剧, PI 的防治是失能和残疾患者日常生活照护的重要组成部分。在临床实践中常使用的体位管理和各种减压垫对于 PI 的防治远远不足^[2]。电刺激作为一种非侵入式操作, 经济成本低, 安全有效, 是目前最有前途的 PI 主动防治策略之一^[3]。本文拟对电刺激在 PI 防治中的研究进展及其作用机制进行综述, 为 PI 防治提

供相应的切入点。

1 与 PI 防治相关的伤口内源性电流与电刺激技术

伤口内源性电流是人的表皮中 $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{ATP}$ 酶的不对称转运产生的跨上皮电位 (Transepithelial potential, TEP), 约 10~60 mV/mm^[4]。上皮细胞损伤时, TEP 被破坏, 导致电场短路, 伤口中心的电位下降, 这种电位差产生了一个内源性横向电场, 将损伤电流从伤口边缘指向伤口中心。伤口处的内源性电流不仅能驱动促炎细胞、成纤维细胞、上皮细胞和内皮细胞向伤口迁移, 还能够加速细胞增殖, 促进肉芽组织形成及血管化, 从而促进创面愈合^[5]。

电刺激技术是一种新型生物物理治疗手段, 多采用两个电极将外部电流从皮肤传递到伤口组织。

* 四川省自然科学基金 (2023NSFSC0541); 四川大学华西护理学科发展基金 (HXHL21005)

** 通讯作者: 李玲利, 电子邮箱 lilingli2000@126.com

可以模拟内源性伤口电流, 促进 PI、烧伤、糖尿病足、下肢静脉溃疡等慢性伤口创面愈合^[6]。指南推荐电刺激作为 2~4 期 PI 辅助治疗措施^[7]。特定频率的电刺激可以促进受压部位肌肉收缩, 改善组织周围皮肤血流及微循环, 预防因局部微循环紊乱和重复缺血再灌注引起的 PI。通过模拟内源性伤口损伤电流, 驱动细胞移动、分化和增殖, 同时加速细菌自溶, 从而达到抗菌、抗感染、加速 PI 创面愈合的效果^[8]。常见的电刺激输出包括直流电和脉冲电, 脉冲电包括脉冲微电流、低压单向脉冲、低压双向脉冲以及高压单向脉冲电流。其中高压单向脉冲电流因其在伤口愈合方面的积极作用, 在国外广泛应用于 PI 创面的愈合^[9]。微电流也逐渐成为治疗 PI 的研究热点, 其效果等同于伤口负压吸引疗法^[10]。与传统电刺激方法中的毫安级别的电流相比, 它能提供更微弱的微安级别的电流强度, 模拟伤口自然的微电流 ($\approx 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), 且微电流没有达到神经纤维去极化的阈值, 受试者难以察觉, 因此耐受性更好。

2 常见的电刺激产品及优缺点

为了满足多场景的电刺激需求, 24 h 可穿戴的折叠电刺激短裤, 镶嵌柔性导电体的电刺激坐垫及智能压力反馈控制的功能电刺激压疮防治系统可以避免电极片、导线在电刺激实施中对患者造成器械相关性损伤, 同时根据患者所处的环境能够智能调节电刺激参数^[11-13]。采用导电材料制备的电话性敷料, 作为电刺激实施载体, 使电流更有效地传导到整个创面, 同时发挥敷料的微环境调节作用, 逐渐成为创面治疗的新趋势^[14]。通过超声波清洗机实现电能转化的压电水凝胶, 具有重新分配压力、减少组织形变和维持皮肤微环境的作用, 从而实现 PI 的预防和早期治疗^[15]。但如何维持稳定的电压及持续电流是此类产品研发关注的要点。

3 电刺激在 PI 防治中的作用机制

3.1 促进肌肉收缩, 重新分布压力

局部减压是预防 PI 发生发展的关键。间歇性电刺激能够促进受压部位肌肉收缩, 模拟健康人因久坐不适时下意识进行的自然重新定位运动, 使得坐骨结节上的压力重新分配, 减轻局部皮肤压力^[16]。同时, 肌肉收缩可以维持臀部肌肉质量、增加局部血液循环及减少组织水肿, 且无需患者过多地配合, 就能达到预防深部组织损伤的目的^[17]。对脊髓损伤患者实施 12 周的臀部和腿部电刺激, 坐位时坐骨压力峰值降低, 静息时股总动脉直径和血流量增加, 大腿体积增加^[11]。另外, 电刺激干预可能有助于预防去神经支配肌肉萎缩及恢复肌肉组织。6 个月的电刺激干预后, 脊髓损伤患者的臀部区域髂白、尾骨高度处的肌肉组织厚度增加^[18]。

3.2 促进血液循环, 增加组织氧合

稳定的电刺激使血管通透性显著增加, 同时加快微循环的血流速度, 向 PI 部位输送氧气和免疫细胞, 实现细胞、活性分子在血管壁的交流^[19]。另外, 电刺激促使浅表皮肤血管内皮细胞释放一氧化氮, 扩张血管, 改善血液循环^[20]。目前有一款集成温湿度、氧饱和度、压力传感的柔性垫, 通过人工智能算法预测 PI 和创面细菌感染风险并决策电刺激方案, 如组织氧浓度低于正常, 系统自动开启电刺激, 触发肌肉收缩以增加组织供氧^[21]。

3.3 调控免疫细胞增殖与分化, 抗炎抗菌

在炎症早期, 电刺激可以募集巨噬细胞、淋巴细胞和中性粒细胞迁移到 PI 创面, 并分泌炎症因子如白细胞介素-1 β 、白细胞介素-6 及肿瘤坏死因子- α ^[22]。在炎症晚期, 减少免疫细胞和细胞因子数量, 诱导 M1 巨噬细胞向 M2 极化, 促进 PI 愈合过程向增殖期过渡^[23]。另外, 电刺激具有抗菌作用, 通过减少感染创面中病原体的数量或降低其运动性来间接帮助创面愈合, 可显著增强抗生素清除细菌生物膜的作用, 发挥生物电效应^[24]。

3.4 促进肉芽组织生长及上皮爬行, 重塑创面

电刺激促进血管内皮生长因子释放, 引导内皮细胞迁移、增殖和血管化; 引导角质细胞定向迁移及上皮化, 诱导成纤维细胞迁移及增殖, 促进其分泌胶原蛋白和生长因子, 从而促进肉芽组织形成及加速瘢痕成熟和重塑^[8,22]。一项针对人体皮肤细胞的体外研究表明, 微电流可增强成纤维细胞和单核细胞的活性, 使炎症和再生反应中重要介质转化生长因子 $\beta 1$ 的分泌量增加 30 倍^[25]。临床研究也证实了单相脉冲微电流对能够缩小 PI 表面积和潜行面积^[26]。然而, 不同极性电刺激对创面的影响存在争议。每种电荷吸引不同的细胞, 成纤维细胞和角质形成细胞趋向阴极, 巨噬细胞、中性粒细胞、上皮细胞趋向阳极。阴极电刺激似乎是 PI 愈合的更佳选择, 会吸引成纤维细胞和角质形成细胞到伤口部位, 增加伤口拉伸强度, 愈合质量更佳^[27]。

4 电刺激防治 PI 的临床应用

4.1 电刺激防治 PI 的适用人群

电刺激可适用于限制卧床、活动受限、营养不良、高龄等具有压力/剪切力危险因素或既往压疮病史人群^[28]。随着老龄化进程加剧, 导致脑血管意外、髌部骨折、阿尔茨海默病、肌少症等衰弱或失能的老年人是罹患 PI 的高危人群^[29]。PI 常好发于骶尾部、足跟、枕后等骨隆突处, 且伴有影响伤口愈合因素的情况如糖尿病、心血管疾病、静脉淤滞症等, 导致慢性创面经久不愈或进行性发展, 推荐使用电刺激辅助治疗。然而, 存在以下情况不宜采用电刺激治疗, 如脊髓损伤伴迟缓性瘫痪、反

射障碍、植入心脏起搏器或其他电子装置、枕骨区 PI、癌症、骨髓炎、全身感染或对电刺激治疗过敏或不耐受等。另外，电刺激也不适用于意识障碍或深度镇静患者，因为在干预过程中患者不能有效表达自我感受^[17]。

4.2 电刺激防治 PI 的临床疗效评价

4.2.1 创面评估 是否发生 PI、PI 创面愈合程度是电刺激防治压力性损伤疗效的主要观察指标。对 149 例重症监护室患者进行电刺激，每日通过自粘电极施加电刺激直到出院、死亡或发生压力性损伤，电刺激组较非电刺激组 PI 发生率明显降低^[17]。因为电刺激电流方式、参数设置及疗程差异，其治疗 PI 的创面评估方式也不尽相同。一项 Meta 分析纳入 913 例 PI 患者，电刺激实施 4~8 h/周，持续 3~12 周，结果表明，在伤口基本护理上施加电刺激可能会增加创面愈合的比例和愈合率，但不确定是否能缩短愈合时间^[30]。10 h/d 的微电流治疗 25 d，电刺激组比对照组的压疮愈合量表评分提高 25.3%，创面闭合率增加 28.6%，压疮分期及全愈合数也有所改善，但差异无统计学意义^[28]。

4.2.2 疼痛评估 使用疼痛视觉模拟量表对电刺激治疗的静脉溃疡、PI 等慢性难愈性伤口进行疼痛评估，96% 的疼痛患者在 48 h 内疼痛开始减轻，所有患者在电刺激治疗 7 d 后疼痛减轻，14 d 后疼痛进一步减轻，对镇痛药的需求减少^[31]。

4.2.3 其他指标 电刺激是一个长期干预的过程，部分研究者在可行性分析中比较了电刺激治疗对睡眠质量、住院时间、生命体征、皮肤反应的影响。对 8 例脊髓损伤患者中使用电刺激短裤 8 h/晚，连续 2 周，使用睡眠质量视觉模拟量表和匹兹堡睡眠问卷指数评估睡眠质量，自制问卷评估电刺激短裤的使用体验，结果表明，夜间电刺激诱导的肌肉激活不会干扰睡眠，受试者愿意在未来使用电刺激短裤^[11]。一项随机对照试验表明，电刺激干预缩短了患者在重症监护病房平均住院时间 1.8 d，并且电刺激对患者生命体征、机械通气时间和皮肤反应无影响^[17]。但也可能出现皮肤发红、瘙痒、肉芽组织增生等不良反应，极少数参与者抱怨头晕、出现妄想等情况^[30]。

5 小结与展望

电刺激作为一种极具潜力的 PI 防治方式，通过多种生物学机制调控组织细胞行为，预防 PI 发生，加速 PI 创面愈合及缓解疼痛。现有临床证据及科学研究已证实电刺激防治 PI 是安全有效的。然而，目前尚缺乏统一的电刺激标准。未来的研究可以在几个方面继续进行：①针对不同人群、PI 部位、分期等研究匹配的电刺激方案及参数；②难愈性 PI 可能存在窦道、潜行等复杂情况，测量创

面组织中实际传输的电流量；③关注治疗过程中患者的自我体验、满意度或者生存质量影响等。另外，PI 的防治需要长期主动管理，如何实现电刺激装置小型化和便携性，以及可穿戴式的电刺激产品及导电敷料等是未来压疮防治的热点研究方向。

参考文献

- [1] Sadeghi Fazel F, Mohammadnejad A, Amanpour S, et al. Bacteriology and antimicrobial sensitivity of isolated bacteria from pressure ulcers after spinal cord injury [J]. *Arch Neurosci*, 2019, 6 (2): e12446.
- [2] Gaspar S, Peralta M, Marques A, et al. Effectiveness on hospital-acquired pressure ulcers prevention: a systematic review [J]. *Int Wound J*, 2019, 16 (5): 1087-1102.
- [3] Mansfield S, Obraczka K, Roy S. Pressure injury prevention: a survey [J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2020, 13: 352-368.
- [4] Cheah YJ, Buyong MR, Mohd Yunus MH. Wound healing with electrical stimulation technologies: a review [J]. *Polymers (Basel)*, 2021, 13 (21). doi: 10.3390/polym13213790.
- [5] Korupalli C, Li H, Nguyen N, et al. Conductive materials for healing wounds: their incorporation in electroactive wound dressings, characterization, and perspectives [J]. *Adv Healthc Mater*, 2021, 10 (6): e2001384.
- [6] Fernández-Guarino M, Bacci S, Pérez González LA, et al. The role of physical therapies in wound healing and assisted scarring [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24 (8). doi: 10.3390/ijms24087487.
- [7] Kottner J, Cuddigan J, Carville K, et al. Prevention and treatment of pressure ulcers/injuries: the protocol for the second update of the international Clinical Practice Guideline 2019 [J]. *J Tissue Viability*, 2019, 28 (2): 51-58.
- [8] Luo RZ, Dai JY, Zhang JP, et al. Accelerated skin wound healing by electrical stimulation [J]. *Adv Healthc Mater*, 2021, 10 (16): e2100557.
- [9] Szołtys-Brzezowska B, Bańkowska A, Piejko L, et al. Electrical stimulation in the treatment of pressure injuries: a systematic review of clinical trials [J]. *Adv Skin Wound Care*, 2023, 36 (6): 292-302.
- [10] Avendaño-Coy J, López-Muñoz P, Serrano-Muñoz D, et al. Electrical microcurrent stimulation therapy for wound healing: a meta-analysis of randomized clinical trials [J]. *J Tissue Viability*, 2022, 31 (2): 268-277.
- [11] Smit CAJ, Berenpas F, de Groot S, et al. Feasibility of overnight electrical stimulation-induced muscle activation in people with a spinal cord injury. A Pilot study [J]. *Spinal Cord Ser Cases*, 2020, 6: 5.

- [12] 陈佳丽. 一种预防压力性损伤的电刺激装置: CN202010428323. 6 [P]. 2020-09-04.
Chen JL. An electrical stimulation device for the prevention of pressure injuries: CN202010428323. 6 [P]. 2020-09-04.
- [13] 徐硕. 智能压力反馈控制的功能电刺激压疮防治系统 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Xu S. Pressure ulcer prevention and treatment system with intelligent pressure feedback control using functional electrical stimulation [D]. Daliang: Dalian University of Technology, 2020.
- [14] Zhang J, Wu C, Xu Y, et al. Highly stretchable and conductive self-healing hydrogels for temperature and strain sensing and chronic wound treatment [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12 (37): 40990-40999.
- [15] Li Y, Fu R, Guan Y, et al. Piezoelectric hydrogel for prophylaxis and early treatment of pressure injuries/pressure ulcers [J]. *ACS Biomater Sci Eng*, 2022, 8 (7): 3078-3086.
- [16] Barton T, Low DA, Thijssen D, et al. Twelve-week daily gluteal and hamstring electrical stimulation improves vascular structure and function, limb volume, and sitting pressure in spinal cord injury: a pilot feasibility study [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2022, 101 (10): 913-919.
- [17] Baron MV, Silva PE, Koepf J, et al. Efficacy and safety of neuromuscular electrical stimulation in the prevention of pressure injuries in critically ill patients: a randomized controlled trial [J]. *Ann Intensive Care*, 2022, 12 (1): 53.
- [18] Alberty M, Mayr W, Bersch I. Electrical stimulation for preventing skin injuries in denervated gluteal muscles - promising perspectives from a case series and narrative review [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13 (2). doi: 10.3390/diagnostics13020219.
- [19] Mohana Sundaram P, Rangharajan KK, Akbari E, et al. Direct current electric field regulates endothelial permeability under physiologically relevant fluid forces in a microfluidic vessel bifurcation model [J]. *Lab Chip*, 2021, 21 (2): 319-330.
- [20] Ma SX, Mayer E, Lee P, et al. Transcutaneous electrical stimulation increased nitric oxide-cyclic GMP release biocaptured over skin surface of pericardium meridian and acupuncture points in humans [J]. *Acupunct Electrother Res*, 2015, 40 (2): 73-86.
- [21] Saleh ZS, Al-Neami AQ, Raad HK. Smart monitoring pad for prediction of pressure ulcers with an automatically activated integrated electro-therapy system [J]. *Designs*, 2021, 5 (3): 47.
- [22] Rajendran SB, Challen K, Wright KL, et al. Electrical stimulation to enhance wound healing [J]. *J Funct Biomater*, 2021, 12 (2). doi: 10.3390/jfb12020040.
- [23] Li P, Xu J, Shi Q, et al. Pulse capacitive coupling electric field regulates cell migration, proliferation, polarization, and vascularization to accelerate wound healing [J]. *Adv Wound Care (New Rochelle)*, 2023, 12 (9): 498-512.
- [24] Sen CK, Mathew-Steiner SS, Das A, et al. Electroceutical management of bacterial biofilms and surgical infection [J]. *Antioxid Redox Signal*, 2020, 33 (10): 713-724.
- [25] Todd I, Clothier RH, Huggins ML, et al. Electrical stimulation of transforming growth factor-beta 1 secretion by human dermal fibroblasts and the U937 human monocytic cell line [J]. *Altern Lab Anim*, 2001, 29 (6): 693-701.
- [26] Yoshikawa Y, Hiramatsu T, Sugimoto M, et al. Efficacy of low-frequency monophasic pulsed microcurrent stimulation therapy in undermining pressure injury: a double-blind crossover-controlled study [J]. *Prog Rehabil Med*, 2022, 7: 20220045.
- [27] Girgis B, Duarte JA. High voltage monophasic pulsed current (HVMP) for stage II-IV pressure ulcer healing. A systematic review and meta-analysis [J]. *J Tissue Viability*, 2018, 27 (4): 274-284.
- [28] Avendaño-Coy J, Martín-Espinosa NM, Ladriñán-Maestro A, et al. Effectiveness of microcurrent therapy for treating pressure ulcers in older people: a double-blind, controlled, randomized clinical trial [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19 (16). doi: 10.3390/ijerph191610045.
- [29] 胡鑫, 李优磊, 高天雅, 等. 热量限制对衰老及老年相关疾病影响的研究进展 [J]. *国际老年医学杂志*, 2023, 44 (4): 493-496.
Hu X, Li YL, Gao TY, et al. Research progress of the influence of caloric restriction on senility and geriatric diseases [J]. *Int J Geriatr*, 2023, 44 (4): 493-496.
- [30] Arora M, Harvey LA, Glinsky JV, et al. Electrical stimulation for treating pressure ulcers Review [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2020, 1 (1): CD012196.
- [31] Kurz P, Danner G, Lembelembe JP, et al. Activation of healing and reduction of pain by single-use automated microcurrent electrical stimulation therapy in patients with hard-to-heal wounds [J]. *Int Wound J*, 2023, 20 (6): 2053-2061.