

## · 综 述 ·

## 非侵入性神经调控治疗偏头痛的研究进展

张晓俊<sup>1</sup>, 陈子蒙<sup>2</sup>, 郎丽英<sup>1</sup>, 王炎强<sup>1</sup>

(1. 山东第二医科大学附属医院神经内二科, 山东 潍坊 261000;

2. 山东第二医科大学临床医学院, 山东 潍坊 261000)

**[摘要]** 偏头痛是一种常见的特发性慢性神经血管疾病, 被世界卫生组织列为全球致残性疾病第 7 位, 为患者及家庭带来沉重负担。虽然目前临床仍普遍应用药物进行预防和治疗, 但部分患者存在药物禁忌证、药物不良反应、疗效欠佳等情况, 因此偏头痛的神经调控治疗再次引起研究者的关注。非侵入性神经调控治疗具有非侵入性、操作简单、不良反应小、自我管理等优势, 如经皮神经电刺激、经颅磁刺激、经颅直流电刺激、远程电神经调控等, 为偏头痛患者, 尤其是难治性偏头痛患者的预防和治疗带来了更多的可能性。该文综述非侵入性神经调控在偏头痛治疗中的研究进展, 旨在为临床工作及进一步研究提供参考。

**[关键词]** 经皮神经电刺激; 经颅磁刺激; 偏头痛; 难治性偏头痛; 综述

DOI: 10.3969/j.issn.1009-5519.2026.02.031

中图法分类号: R747.2

文章编号: 1009-5519(2026)02-0412-05

文献标识码: A

**Research progress in non-invasive neuromodulation for migraine treatment**ZHANG Xiaojun<sup>1</sup>, CHEN Zimeng<sup>2</sup>, LANG Liying<sup>1</sup>, WANG Yanqiang<sup>1</sup>

(1. The Second Department of Neurology, Affiliated Hospital of Shandong Second Medical University, Weifang, Shandong 261000, China; 2. School of Clinical Medicine, Shandong Second Medical University, Weifang, Shandong 261000, China)

**[Abstract]** Migraine is a common idiopathic chronic neurovascular disease, ranked as the seventh leading cause of disability worldwide by the World Health Organization, imposing a heavy burden on patients and their families. Although pharmacological interventions remain the primary clinical approach for prevention and treatment, some patients face contraindications, adverse drug reactions, or suboptimal efficacy. Consequently, neuromodulation therapies for migraine have garnered renewed research attention. Non-invasive neuromodulation therapy, such as transcutaneous electrical nerve stimulation, transcranial magnetic stimulation, transcranial direct current stimulation, and remote electrical neuromodulation, has the advantages of non-invasive, simple operation, few adverse reactions, and self-management. It brings more directions for the prevention and treatment of migraine patients, especially those with refractory migraine. This article reviews the research progress of non-invasive neuromodulation in the treatment of migraine, aiming to provide reference for clinical work and further research.

**[Key words]** Transcutaneous electrical nerve stimulation; Transcranial magnetic stimulation; Migraine; Refractory migraine; Review

偏头痛是一种常见的特发性慢性神经血管疾病, 多表现为发作性、中重度搏动样疼痛, 伴随恶心、呕吐、畏光、畏声等, 持续 4~72 h, 可有困倦、头晕等前驱症状及视觉、感觉等先兆症状<sup>[1]</sup>, 并与认知障碍、焦虑、抑郁等多种疾病密切相关<sup>[2-3]</sup>。2016 年世界卫生组织全球疾病负担调查研究显示, 在人类致残性神经系统疾病中偏头痛位居第 2 位。随着病程进展, 部分患者发展为难治性偏头痛, 更为患者的学习工作、日常生活带来极大的负面影响。目前, 偏头痛的药物治

疗分为急性期非特异性药物, 如对乙酰氨基酚和非甾体抗炎药, 特异性药物如曲坦类、地坦类和吉泮类药物, 预防性药物如抗抑郁药、抗癫痫药、 $\beta$ 受体阻滞剂、钙离子通道阻滞剂、CGRP 受体拮抗剂、血管紧张素转换酶抑制剂或血管紧张素 II 受体拮抗剂、肉毒杆菌毒素 A 等药物, 但上述药物治疗存在局限性。如妊娠期患者存在药物禁忌, 如曲坦类药物有血管收缩等不良反应, 心脑血管疾病患者禁用此药, 多项偏头痛急性期发作药物疗效临床试验显示约 20%~30% 患者应答良好<sup>[4-6]</sup>, 多项 CGRP 受体拮抗剂预防性治疗的 III 期临床试验显示约 40%~60% 患者应答良好<sup>[7-8]</sup>, 部分患者存在疗效欠佳等现状。而过度使用药物治疗也是引起偏头痛病情进展的最重要风险因素之

一<sup>[9]</sup>。而非侵入性神经调控治疗具有非侵入性、操作简单、安全性高、依从性好等优点。因此,再次引起研究者的广泛关注,如经皮神经电刺激(TENS)、经颅磁刺激(TMS)、经颅直流电刺激(tDCS)、远程电神经调控(REN)等。有研究显示,TENS 治疗偏头痛急性发作期患者的有效应答率约为 50%<sup>[10]</sup>,为偏头痛患者,尤其是难治性偏头痛患者的预防和治疗带来了更多的可能性。

## 1 偏头痛的病理生理机制

偏头痛的病理生理机制目前仍不清楚,目前较公认的观点是,皮层扩散性抑制现象(CSD)引发偏头痛先兆,激活三叉神经血管系统,将痛觉信号传递至高级中枢如脑干、丘脑和大脑皮层等,释放多种血管活性物质,共同参与偏头痛发作<sup>[11]</sup>。三叉神经血管学说认为三叉神经颈复合体(TCC)<sup>[11]</sup>中三叉神经脊束核接收疼痛信号传入,导致外周敏化,进而传递至高级中枢如脑干、丘脑和大脑皮层等,形成中枢敏化。外周神经敏化后启动级联反应,硬脑膜内肥大细胞脱颗粒、神经源性炎症促使血管舒张<sup>[12]</sup>,P 物质、CGRP 等分泌增加,同时 CGRP 启动和维持外周、中枢神经敏化<sup>[13]</sup>,再次刺激痛觉纤维传入中枢,形成恶性循环。脑干相关疼痛调节结构,如中脑导水管周围灰质(PAG)、延髓头端腹内侧区、蓝斑、中缝大核、孤束核等,构成下行抑制系统、下行易化系统参与调控。目前,将血管、神经及神经递质结合在一起的三叉神经血管学说得到了大多数研究者的认同。难治性偏头痛近年来也受到学界和临床的广泛关注。难治性头痛的发展可能与 TCC 传入的外周敏化、中枢敏化及下行抑制系统功能障碍相关。同时,慢性偏头痛患者的大脑疼痛调节通路呈现非典型疼痛模式,频发头痛使 PAG 被反复激活,CGRP 等炎症介质过度表达,使 PAG 功能紊乱,下行疼痛抑制网络功能障碍,进一步降低其偏头痛发作阈值。此外,丘脑及药物相关的中枢敏化也会导致偏头痛慢性化<sup>[14]</sup>。

## 2 神经调控治疗

神经调控治疗方法分为侵入性和非侵入性,利用光线、磁场、电流、超声波等方式作用于神经系统,改变颅内电活动,调节神经递质释放及神经网络活动。非侵入性治疗包括 TENS、TMS、tDCS、REN 等。在临床工作中,存在不同的适应证及局限性。TMS 利用脉冲磁场穿透颅骨,诱导大脑皮层产生感应电流,改变神经元的兴奋性,可用于治疗抑郁症、焦虑症、帕金森病、睡眠障碍、疼痛等方面,可靶向特定脑区,但便携性差,且极少数可能引起头痛或癫痫等。TENS 通过电极贴片在皮肤表面施加低频电流,刺激周围神经,从而缓解疼痛,可用于各种急慢性躯体疼痛、偏头痛等治疗。tDCS 微弱直流电调节神经元静息电位,增强(阳极)或抑制(阴极)皮层兴奋性,穿透程度较深,可用于抑郁症、慢性疼痛、认知增强等。REN 通

过电刺激外周神经,远程调节中枢神经电活动,用于偏头痛、躯体疼痛、焦虑抑郁等治疗。TENS、tDCS、REN 具有无创、便携、可居家自我管理等优势,但目前治疗效果存在个体差异,且由于设备成本较高,对于普通家庭经济负担较大,目前还未受到社会层面的广泛认可。但研究证明,神经调控治疗对偏头痛患者的治疗发挥着重要作用<sup>[15]</sup>,且安全性高、副作用小、操作简易,有利于提高患者依从性。对于优先采用非药物治疗、存在药物禁忌证、药物不良反应、药物疗效欠佳、存在焦虑抑郁情绪的患者,以及妊娠期、哺乳期患者来说是新的治疗方向。

**2.1 经皮电刺激** TENS 包括眶上神经刺激(t-SNS)、迷走神经刺激(nVNS)、单一枕神经刺激(t-ONS)、三叉神经外部刺激(e-TNS)等。CHOU 等<sup>[16]</sup>对 106 例偏头痛患者进行双盲、随机、对照试验,刺激双侧滑车上神经和眶上神经,刺激干预方法(250 ms, 16 mA, 100 Hz),结果显示在“无先兆偏头痛”试验组 1 h 疼痛评分显著降低,对“有先兆的偏头痛”发作,疼痛评分无显著差异。仅有 5 例轻微不良事件发生。无先兆偏头痛患者与有先兆的偏头痛患者治疗效果存在差异,是否与发病机制相关还需进一步研究。另一项随机对照研究<sup>[10]</sup>,对 30 例偏头痛急性发作期患者,采用 Cefaly 刺激双侧滑车上神经和眶上神经治疗,刺激干预方法:16 mA, 250  $\mu$ s 或 9.51 mA, 100 Hz,每次 1 h,结果显示平均疼痛强度在 e-TNS 治疗 1~2 h 后显著降低;在 2 h 观察期内无止痛药物摄入情况;但在 24 h 随访中发现,仅在 24 h 内止痛药物摄入量存在差异,但无统计学意义。ZHANG 等<sup>[17]</sup>进行了一组双盲、随机、假对照试验,对 70 例偏头痛患者连续 nVNS 4 周,结果显示试验组 nVNS 可以缓解偏头痛患者的头痛症状。LIU 等<sup>[18]</sup>对 110 例偏头痛患者进行随机对照试验,A、B、C 3 组分别接受 2、100、2 Hz 的 t-ONS,D 组接受假 t-ONS 干预,E 组口服托吡酯,每天刺激 30 min,持续 4 周,结果显示偏头痛天数(100 Hz t-ONS 组和托吡酯均显著降低)、持续时间、强度在所有 5 组中相等,50% 应答率(在 t-ONS 刺激组和托吡酯之间显著降低)。VECCHIO 等<sup>[19]</sup>对 38 例(无先兆偏头痛组 17 例和对照组 21 例)进行 e-TNS 随机对照试验,刺激干预方法:250 ms, 16 mA 或 2 mA, 60 Hz,每次 20 min,每天 1 次,与安慰剂(2 mA)相比,试验组(16 mA)显著降低了偏头痛组和对照组的三叉神经 N2P2 振幅。TRIMBOLI 等<sup>[20]</sup>对 24 例慢性偏头痛患者给予 e-TNS 治疗,刺激干预方法:60 Hz, 16 mA, 每天 20 min,持续 3 个月,结果显示 e-TNS 可能是一种安全的慢性偏头痛预防治疗方式,但疗效比较无统计学意义。

**2.2 TMS** TMS 包括单脉冲(sTMS)、成对脉冲(ppTMS)、重复 TMS(rTMS)、配对关联刺激(PAS)、模式化 rTMS 等几种治疗模式。rTMS 和 theta 暴发

式刺激在临床工作中应用广泛<sup>[15]</sup>。有 meta 分析研究提出, rTMS 可降低慢性偏头痛患者头痛发作频率及发作期疼痛程度<sup>[21]</sup>。JIANG 等<sup>[22]</sup>荟萃分析了 361 例偏头痛患者的随机对照试验, 结果显示高频 rTMS 降低了偏头痛患者头痛的发作频率和头痛强度, 但也增加了不良事件的发生。部分患者出现了头颈部不适、肌肉抽搐和嗜睡等不良反应。朱建建等<sup>[23]</sup>对 57 例前庭性偏头痛患者进行随机对照试验, 分为 rTMS 组和对照组, 作用于枕叶, 刺激干预方法 1 Hz, 80%~100% 运动阈值 (MT), 刺激 10 s, 间隔 2 s, 治疗 20 min, 结果显示 rTMS 能有效改善 VM 伴位置性眩晕患者头痛症状。GRANATO 等<sup>[24]</sup>对 14 例偏头痛患者进行随机对照试验, 作用于背外侧前额叶皮层, 刺激干预方法 20 Hz, 100% MT, 刺激 2 s, 间隔 30 s, 结果显示未能证明 rTMS 治疗的作用。而 ZHOU 等<sup>[25]</sup>的荟萃分析研究提出, rTMS 作用于背外侧前额叶皮层可以改善疼痛的情绪方面, 进行偏头痛的管理, 而非缓解疼痛。各项研究的刺激位置、参数设置、治疗模式等存在差异, ANTONIO 等<sup>[24]</sup>的阴性疗效结果是否与之相关还需进一步深入研究。

**2.3 tDCS** tDCS 通过阳极和阴极释放微弱直流电 (1~2 mA), 改变神经元膜电位, 从而调节神经兴奋性。有研究分析了 72 例偏头痛患者随机对照试验, 分别进行 rTMS 和 tDCS 治疗, 作用于左背外侧前额叶皮层, 刺激干预方法 10 Hz, 70% MT, 刺激 6 s, 间隔 45 s, 600 脉冲, 结果提示 rTMS 和 tDCS 都可能有效降低慢性偏头痛患者的疼痛强度及焦虑情绪, 仅在 rTMS 组患者中观察到抑郁的显著改善<sup>[26]</sup>。HASIRCI 等<sup>[27]</sup>对 36 例月经相关偏头痛患者和 22 例非月经期偏头痛患者分别按照 1:1 随机分为治疗组和假刺激组, 并给予 tDCS, 作用于左侧背外侧前额叶皮层, 2 mA, 20 min 的阳极 tDCS, 连续 3 d, 结果显示治疗组患者发作频率、严重程度和镇痛药使用均降低, 差异均有统计学意义 ( $P < 0.001$ )。

**2.4 远程电神经调节** Nerivio<sup>®</sup> 被美国 FDA 批准用于美国 12 岁及以上人群中或有先兆的偏头痛的急性治疗<sup>[28]</sup>。TEPPER 等<sup>[29]</sup>进行了前瞻性、随机、双盲、假对照、多中心试验, 248 例参与者随机分配 (128 例治疗组, 120 例安慰剂组), 治疗组 REN 隔日 1 次, 追踪随访发现治疗组在平均每月减少偏头痛天数、减少中度/重度头痛天数、减少急性药物摄入天数等方面优于安慰剂组。MONTEITH 等<sup>[30]</sup>追踪 83 例青少年偏头痛患者 REN 作为偏头痛发作的急性治疗, 发现随后几个月的平均治疗时间缩短, 提出 REN 对偏头痛具有潜在的预防效果。

### 3 治疗机制

目前神经调控治疗机制尚无定论, TENS 治疗机制有几种假说, 一是调节传入神经纤维敏感性。1965 年由 MELZACK 及 WALL 提出“闸门控制理论”<sup>[31-32]</sup>, 其

认为外周电刺激引起外周触觉的粗纤维 (A $\beta$  纤维) 兴奋时, 使闸门关闭, 能抑制传导痛觉的细纤维 (C 纤维) 传入脊髓后角 T 细胞, 增强胶质细胞对疼痛刺激向上传递的抑制作用。二是激活疼痛下行抑制系统, 内源性阿片样肽释放理论<sup>[11, 33]</sup>。低频电刺激可以提高机体内 5-羟色胺、胆碱能神经递质、 $\beta$ -内啡肽和脑啡肽释放水平, 调节疼痛下行抑制系统。高频会引起强啡肽的释放增加<sup>[34]</sup>。三是外周传入神经逆向激活理论。外周传入神经的逆向激活, 使神经轴突离开中枢神经系统。当逆向神经冲动与伤害性传入冲动相遇时可发生冲突并抑制其产生。高强度诱发的在 A $\delta$  纤维中的抑制作用更为显著<sup>[35]</sup>。此外有研究发现, 刺激迷走神经可降低 TCC 中伤害性信号传入, 调节下行疼痛抑制系统, 阻止 CGRP 等的释放<sup>[36]</sup>。刺激 t-SNS 可调控中枢敏化<sup>[37]</sup>。rTMS 缓解偏头痛的机制也尚未明确。有研究提出, TMS 能够中断临床前偏头痛模型中的皮质扩散抑制<sup>[38]</sup>。低频会降低神经兴奋性, 而高频则相反<sup>[39]</sup>。高频刺激可以在神经性疼痛中产生镇痛作用。例如, 刺激初级运动皮层会抑制与疼痛感知相关的三级丘脑皮质投射神经元, 同时刺激背外侧前额叶皮层可能会抑制参与疼痛释放的中脑-内侧丘脑通路的活动, 激活 PAG, 并促进脑源性神经营养因子、多巴胺释放, 改变谷氨酸/谷氨酰胺释放水平<sup>[40-42]</sup>。

tDCS 可能的机制是通过阳极使神经元膜电位呈去极化状态, 提高大脑对疼痛感知的抑制功能, 激活疼痛下行抑制系统。阴极使神经元膜电位呈超极化状态, 抑制与疼痛相关的异常神经活动。此外 tDCS 也可以调节神经递质、炎症因子的释放<sup>[43]</sup>。有研究提示, REN 可能的机制是通过激活疼痛下行抑制系统, 从而抑制在偏头痛发作期间 TCC 中传入的疼痛信号<sup>[44]</sup>。

### 4 小结与展望

非侵入性神经调控目前在西方国家偏头痛患者中应用越来越广泛, 也有大量相关的技术研发。但各研究之间由于刺激位置、参数设置、治疗模式、样本量及患者来源等存在差异, 使各研究结果之间存在矛盾, 同时治疗过程中患者难以完全停用偏头痛药物, 因此试验结果不能除外药物影响, 非侵入性神经调控单独治疗的疗效也存在一定的疑问。在今后的研究中, 可以进行多中心、大样本的随机对照试验, 统一刺激参数, 结合不同地区的流行病学特点及偏头痛患者的个体差异, 研究不同情况下的有效刺激位置、治疗模式、参数设置, 以及延长疗效维持时间, 改善远期预后情况, 为临床治疗提供更准确的研究支持, 为偏头痛患者带来新的治疗方式。

### 参考文献

[1] Headache classification committee of the international

- headache society(IHS) the international classification of headache disorders, 3rd edition[J]. *Cephalalgia*, 2018, 38(1):1-211.
- [2] 王维. 难治性偏头痛的诊断及影响因素[J]. *国际神经病学神经外科学杂志*, 2011, 38(6):553-556.
- [3] 王静, 胡艳丽, 朱书渊, 等. 偏头痛患者认知功能状况及与焦虑、抑郁的相关性研究[J]. *中华全科医学*, 2024, 22(7):1196-1198.
- [4] DODICK D W, LIPTON R B, AILANI J, et al. Ubrogepant for the treatment of migraine[J]. *N Engl J Med*, 2019, 381(23):2230-2241.
- [5] GOADSBY P J, WIETECH A L A, DENNEHY E B, et al. Phase 3 randomized, placebo-controlled, double-blind study of lasmiditan for acute treatment of migraine[J]. *Brain*, 2019, 142(7):1894-1904.
- [6] CROOP R, GOADSBY P J, STOCK D A, et al. Efficacy, safety, and tolerability of rimegepant orally disintegrating tablet for the acute treatment of migraine: a randomised, phase 3, double-blind, placebo-controlled trial[J]. *Lancet*, 2019, 394(10200):737-745.
- [7] LIPTON R B, GOADSBY P J, SMITH J, et al. Efficacy and safety of eptinezumab in patients with chronic migraine: PROMISE-2[J]. *Neurology*, 2020, 94(13):e1365-e1377.
- [8] DETKE H C, GOADSBY P J, WANG S, et al. Galcanezumab in chronic migraine: the randomized, double-blind, placebo-controlled REGAIN study[J]. *Neurology*, 2018, 91(24):e2211-e2221.
- [9] SACCO S, BRASCHINSKY M, DUCROS A, et al. European headache federation consensus on the definition of resistant and refractory migraine: developed with the endorsement of the European Migraine & Headache Alliance(EMHA)[J]. *J Headache Pain*, 2020, 21(1):76-79.
- [10] CHOU D E, GROSS G J, CASADEI C H, et al. External trigeminal nerve stimulation for the acute treatment of migraine: open-label trial on safety and efficacy[J]. *Neuromodulation*, 2017, 20(7):678-683.
- [11] 中国医师协会神经内科医师分会, 中国研究型医院学会头痛与感觉障碍专业委员会. 中国偏头痛诊治指南(2022版)[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2022, 28(12):881-898.
- [12] WODEHOUSE T, BAHRA A, MEHTA V. Changes in peripheral and central sensitization in patients undergoing occipital nerve stimulation[J]. *Br J Pain*, 2020, 14(4):250-255.
- [13] 杨蓉, 李佳佳, 崔子婷, 等. 参与偏头痛发病的相关物质[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2025, 31(1):54-59.
- [14] 喻珮, 刘璐, 赵洛鹏, 等. 慢性偏头痛的病理生理机制研究现状及针刺潜在作用机制探讨[J]. *世界中医药*, 2022, 17(17):2383-2388.
- [15] ARCA K N, LAMBRU G, STARLING A J. Neuromodulation in migraine[J]. *Handb Clin Neurol*, 2024, 199(2):179-200.
- [16] CHOU D E, SHNAYDERMAN Y M, WINEGARNER D, et al. Acute migraine therapy with external trigeminal neurostimulation(ACME): a randomized controlled trial[J]. *Cephalalgia*, 2019, 39(1):3-14.
- [17] ZHANG Y, HUANG Y T, LI H, et al. Transcutaneous auricular vagus nerve stimulation(taVNS) for migraine: an fMRI study[J]. *Reg Anesth Pain Med*, 2021, 46(2):145-150.
- [18] LIU Y L, DONG Z, WANG R F, et al. Migraine prevention using different frequencies of transcutaneous occipital nerve stimulation: a randomized controlled trial[J]. *J Pain*, 2017, 18(8):1006-1015.
- [19] VECCHIO E, GENTILE E, FRANCO G, et al. Effects of external trigeminal nerve stimulation(eTNS) on laser evoked cortical potentials(LEP): a pilot study in migraine patients and controls[J]. *Cephalalgia*, 2018, 38(7):1245-1256.
- [20] TRIMBOLI M, MARSICO O, TROISI L, et al. External trigeminal neurostimulation in patients with chronic migraine[J]. *Pain Manag*, 2023, 13(3):185-192.
- [21] 单文文, 张红霞, 姜贵贤. 重复经颅磁刺激预防慢性偏头痛的临床疗效和安全性的 Meta 分析[J]. *医学信息*, 2024, 37(9):48-53.
- [22] JIANG Y M, YUAN C, SUN P P, et al. Efficacy and safety of high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation(rTMS) for migraine: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Acta Neurol Belg*, 2024, 124(4):1167-1176.
- [23] 朱建建, 张显军, 马霄, 等. 重复经颅磁刺激对育龄期前庭性偏头痛伴位置性眩晕患者疗效分析[J]. *中国耳鼻咽喉头颈外科*, 2024, 31(10):672-674.
- [24] GRANATO A, FANTINI J, MONTI F, et al. Dramatic placebo effect of high frequency repetitive TMS in treatment of chronic migraine and medication overuse headache[J]. *J Clin Neurosci*, 2019, 60(1):96-100.
- [25] ZHOU J, WANG Y, LUO X, et al. Revisiting the effects of rTMS over the dorsolateral prefrontal cortex on pain: an updated systematic review and meta-analysis[J]. *Brain Stimul*, 2024, 17(4):928-937.
- [26] NAJI F, SHARBAFCHI M R, KHORVASH F, et al. The efficacy of repetitive transcranial magnetic stimulation(rTMS) versus transcranial direct-current stimulation(tDCS) on migraine headaches: a randomized clinical trial[J]. *Adv Biomed Res*, 2024, 13(7):717-719.
- [27] HASIRCI BAYIR B R, AKSU S, GEZEGEN H, et al. Effects of transcranial direct current stimulation on clinical outcomes, calcitonin gene-related peptide, and pituitary adenylate cyclase-activating polypeptide-38 levels in menstrual migraine[J]. *Neuromodulation*, 2024, 27(5):835-846.
- [28] NIERENBURG H, STARK-INBAR A. Nerivio® remote electrical neuromodulation for acute treatment of chronic migraine[J]. *Pain Manag*, 2022, 12(3):267-281.
- [29] TEPPER S J, RABANY L, COWAN R P, et al. Remote electrical neuromodulation for migraine prevention: a double-blind, randomized, placebo-controlled clinical trial

- [J]. *Headache*, 2023, 63(3):377-389.
- [30] MONTEITH T S, STARK-INBAR A, SHMUELY S, et al. Remote electrical neuromodulation (REN) wearable device for adolescents with migraine: a real-world study of high-frequency abortive treatment suggests preventive effects[J]. *Front Pain Res (Lausanne)*, 2023, 4(1):1247313.
- [31] 孙雨佳, 张军风, 闫隆, 等. 经颅磁刺激治疗神经病理性疼痛作用机制研究[J]. *康复学报*, 2024, 34(6):625-632.
- [32] ZHAO Z Q. Neural mechanism underlying acupuncture analgesia[J]. *Prog Neurobiol* (1956), 2008, 85(4):355-375.
- [33] MOKHTARI T, REN Q Y, LI N, et al. Transcutaneous electrical nerve stimulation in relieving neuropathic pain: basic mechanisms and clinical applications[J]. *Curr Pain Headache Rep*, 2020, 24(4):414-416.
- [34] 路楷, 查海峰, 徐彬彬, 等. 电针刺激对脑损伤患者内源性阿片肽的影响[J]. *中华神经外科疾病研究杂志*, 2015, 14(1):82-83.
- [35] CHARLTON J. Core curriculum for professional education in pain[M]. Seattle:IASP press, 2005:93-96.
- [36] BLECH B, STARLING A J. Noninvasive neuromodulation in migraine[J]. *Curr Pain Headache Rep*, 2020, 24(12):78.
- [37] MAGIS D, D'OSTILIO K, THIBAUT A, et al. Cerebral metabolism before and after external trigeminal nerve stimulation in episodic migraine[J]. *Cephalalgia*, 2017, 37(9):881-891.
- [38] HAN X, YU S. Non-Pharmacological treatment for chronic migraine[J]. *Curr Pain Headache Rep*, 2023, 27(11):663-672.
- [39] STILLING J M, MONCHI O, AMOOZEGAR F, et al. Transcranial magnetic and direct current stimulation (TMS/tDCS) for the treatment of headache: a systematic review[J]. *Headache*, 2019, 59(3):339-357.
- [40] GODFREY K E M, MUTHUKUMARASWAMY S D, STINEAR C M, et al. Effect of rTMS on GABA and glutamate levels in treatment-resistant depression: an mr spectroscopy study[J]. *Psychiatry Res Neuroimaging*, 2021, 317(1):111377.
- [41] LIU J L, WANG S, CHEN Z H, et al. The therapeutic mechanism of transcranial iTBS on nerve regeneration and functional recovery in rats with complete spinal cord transect[J]. *Front Immunol*, 2023, 14:1153516.
- [42] BASTIOLI G, ARNOLD J C, MANCINI M, et al. Voluntary exercise boosts striatal dopamine release: evidence for the necessary and sufficient role of BDNF[J]. *J Neurosci*, 2022, 42(23):4725-4736.
- [43] 黄运健, 杜涛, 倪兵, 等. 经颅直流电刺激在慢性疼痛治疗中的应用进展[J]. *中国疼痛医学杂志*, 2025, 31(5):336-342.
- [44] RAPOPORT A M, LIN T, TEPPER S J. Remote electrical neuromodulation (REN) for the acute treatment of migraine[J]. *Headache*, 2020, 60(1):229-234.

(收稿日期:2025-05-16 修回日期:2025-10-02)

(上接第 411 页)

- [26] 秦福恩, 黄青青, 巩固. 超声引导下腹股沟韧带上髂筋膜阻滞对膝关节镜下交叉韧带重建术患者止血带相关反应的影响[J]. *临床麻醉学杂志*, 2023, 39(6):565-570.
- [27] LASH D, FRANTZ E, HURDLE M F. Ultrasound-guided cooled radiofrequency ablation of the genicular nerves: a technique paper[J]. *Pain Manag*, 2020, 10(3):147-157.
- [28] MU T, YUAN B H, WEI K, et al. Adductor canal block combined with genicular nerve block versus local infiltration analgesia for total knee arthroplasty: a randomized noninferiority trial[J]. *J Orthop Surg Res*, 2024, 19(1):546.
- [29] DUNDAR A, IPEK D, YALVAÇ M, et al. Comparison of the popliteal artery and the capsule of the posterior knee (IPACK) block and the genicular nerve block in primary total knee arthroplasty: a prospective randomized trial[J]. *Saudi Med J*, 2024, 45(3):279-287.
- [30] AMORNTODSAPORN PONG P, YUWA PATTANAWONG K, SAKURA S. Effects of genicular nerve blocks in combination with an adductor canal block in patients undergoing arthroscopic knee surgery: a randomized controlled trial[J]. *Cureus*, 2025, 17(2):e79215.
- [31] KERTKIATKACHORN W, NGARMUKOS S, TAN-AVALEE A, et al. Intraoperative landmark-based genicular nerve block versus periarticular infiltration for postoperative analgesia in total knee arthroplasty: a randomized non-inferiority trial[J]. *Reg Anesth Pain Med*, 2024, 49(9):669-676.
- [32] JIANG B W, GUO Y, YANG M Y, et al. The analgesic effect of continuous adductor canal block combined with popliteal plexus block for total knee arthroplasty: a randomized controlled trial[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):27757.
- [33] RUNGE C, MORIGGL B, BORGLUM J, et al. The spread of ultrasound-guided injectate from the adductor canal to the genicular branch of the posterior obturator nerve and the popliteal plexus: a cadaveric study[J]. *Reg Anesth Pain Med*, 2017, 42(6):725-730.
- [34] WANG C G, MA W H, LIU R, et al. The effect of continuous adductor canal block combined with distal interspace between the popliteal artery and capsule of the posterior knee block for total knee arthroplasty: a randomized, double-blind, controlled trial[J]. *BMC Anesthesiol*, 2022, 22(1):175.
- [35] SAKAI N, ADACHI T K M, SUDANI T, et al. Popliteal plexus block compared with tibial nerve block on rehabilitation goals following total knee arthroplasty: a randomized non-inferiority trial[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):23853.

(收稿日期:2025-05-28 修回日期:2025-09-23)