

## 综述

## 非侵入性神经调控技术治疗创伤后应激障碍研究进展

罗芳,肖洪奇,邱昌建,朱鸿儒

(四川大学华西医院,成都 610041)

**摘要** 创伤后应激障碍(PTSD)可导致注意力、记忆力和执行力等功能受损,并引发异常脑活动以及脑区间功能连接紊乱。尽管现有药物治疗和心理干预具有一定疗效,但仍存在药物副作用和起效延迟等问题。因此,需要结合非侵入性神经调控技术进行治疗。非侵入性神经调控技术是一种新型的治疗技术,安全性高,疗效好,副作用少,其在PTSD治疗中展现出广阔的应用潜力。本文系统阐述了多种非侵入性神经调控技术在PTSD治疗中的应用,以期为今后相关的临床应用和研究提供一定的参考。

**关键词** 创伤后应激障碍;非侵入性神经调控技术;经颅磁刺激;经颅直流电

中图分类号:R749.5 文献标志码:A 文章编号:1005-930X(2025)04-0608-07

DOI:10.16190/j.cnki.45-1211/r.2025.04.016

### Research progress of non-invasive neuromodulation techniques in the treatment of post-traumatic stress disorder

LUO Fang, XIAO Hongqi, QIU Changjian, ZHU Hongru. (West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

**Abstract** Post-traumatic stress disorder (PTSD) can lead to impaired functions such as attention, memory, and executive function, and trigger abnormal brain activity as well as disrupted functional connectivity between brain regions. Although existing drug treatments and psychological interventions have certain therapeutic effects, there are still issues such as drug side effects and delayed onset of action. Therefore, the integration of non-invasive neuromodulation techniques into treatment regimens is warranted. Non-invasive neuromodulation techniques are a new type of treatment technique with high safety, good efficacy, and few side effects. It has shown great potential for application in the treatment of PTSD. This article systematically reviews the applications of various non-invasive neuromodulation techniques in PTSD treatment, aiming to offer valuable insights for future clinical applications and research.

**Keywords** post-traumatic stress disorder; non-invasive neuromodulation techniques; transcranial magnetic stimulation; transcranial direct current

创伤后应激障碍(post-traumatic stress disorder, PTSD)是由于受到异乎寻常的心理创伤,导致延迟出现和长期持续的精神障碍<sup>[1]</sup>。PTSD患者往往伴随不同程度的认知功能损害,这种损害显著增加了其日常生活与工作中的压力负荷,也加重了社会负担<sup>[2]</sup>。PTSD的防治研究表明,目前针对PTSD治疗主要包括应用抗焦虑、抗抑郁类药物与认知行为疗法等多种心理治疗相结合的综合性治疗措施<sup>[3]</sup>。认

知行为治疗、眼动脱敏和再加工技术是PTSD当前一线的治疗选择。美国食品药品监督管理局(FDA)批准用于PTSD的治疗药物目前只有帕罗西汀和舍曲林两种<sup>[4]</sup>。由于药物治疗的副反应、药物依赖以及心理治疗的长期性等原因,开发无创、安全、有效的治疗方法对于改善患者症状和预后至关重要。

PTSD与神经调控之间存在密切关系,其简要发病机制有遗传基因、神经内分泌轴、脑结构及其

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(No.82171513)

[通信作者] 朱鸿儒, E-mail: zhuhongru@wchscu.edu.cn

[收稿日期] 2024-09-22

功能等<sup>[5-6]</sup>。随着脑科学的研究深入发展,2019年的一项介绍了PTSD的神经网络机制,PTSD被认为与异常的应激反应和恐惧学习有关,进而影响大脑皮层的3个网络:默认模式、执行控制和突显网络<sup>[7]</sup>。非侵入性神经调控技术包括重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)、经颅电刺激(transcranial electrical stimulation, TES)、光疗治疗和脑电图神经反馈(electroencephalogram-neurofeedback, EEG-NF)等,显示出包括PTSD在内的多种精神障碍的巨大治疗前景<sup>[8-9]</sup>。本文主要探索目前上述非侵入性神经调控技术治疗PTSD的最新应用情况。

## 1 TMS治疗PTSD

**1.1 TMS的概念和起效方式** TMS是于1985年首次使用的一种非侵入性神经调控技术<sup>[10]</sup>。TMS采用法拉第电磁学的原理,通过盘绕的电路产生电流,电流再产生短暂的磁脉冲<sup>[11]</sup>。其可通过神经元皮层下通路和神经递质释放导致皮层和更深层次结构的局部改变<sup>[12]</sup>。在TMS中最常使用的是rTMS,rTMS包括标准模式的低频1 Hz,高频10 Hz、18 Hz、20 Hz等。 $\theta$ 爆发刺激(theta burst stimulation, TBS)已经被开发及使用,它可以在短时间内提供非常高的频率刺激。rTMS可以诱发大脑皮层动作电位,改善记忆及执行功能<sup>[13]</sup>。目前的研究致力于阐明这种现象的生理机制。初步研究表明其与记忆形成和皮层脊髓兴奋性相关<sup>[13]</sup>。由于神经元网络连接的存在,研究者观察到了可预测的变化以及其他下游效应。鉴于TMS目前主要针对皮层浅表区域,随着对神经网络认知的深入,深层脑结构有望成为潜在的调控靶点<sup>[7]</sup>。通过靶向调控特定脑区神经网络活动,TMS可以显著改善患者的症状,同时避免了药物治疗可能带来的副作用。尽管TMS治疗展现出积极前景,然而其精确的作用机制与治疗效果仍需通过严谨的系统性研究予以全面阐明,以进一步优化其临床应用策略。

**1.2 传统TMS目前在PTSD治疗的应用情况** 首先是rTMS治疗PTSD的有效性,在Belsher等<sup>[14]</sup>的研究中,使用rTMS治疗PTSD的研究进行了系统回顾。该综述纳入总计549例受试者的13项临床研

究,该研究发现rTMS治疗在减轻PTSD症状的效果优于对照组的假刺激干预。其次,目前已知达成共识的rTMS对PTSD的有效治疗靶点位置为右背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC),而关于采用高频或低频rTMS治疗PTSD的临床疗效,目前尚未达成共识。然而有研究发现,高频和低频对PTSD患者都有益处,尽管它们有相反的作用机制,既往研究认为高频rTMS诱导皮层兴奋性,而低频rTMS是抑制性的。这一矛盾的发现可以用高频rTMS在皮层和杏仁核下游的变化产生的不同效果来解释,即PTSD与前额叶皮层不活跃和杏仁核过度活跃有关。当高频rTMS应用于PTSD患者右DLPFC时,下层低活性皮层组织产生兴奋效应,这种激活导致随后的杏仁核间接抑制。尽管低频rTMS对PTSD症状的确切作用机制尚未完全阐明,但现有研究提出,其治疗效果可能源于对右DLPFC过度活跃区域的选择性抑制<sup>[15]</sup>。Hernandez等<sup>[16]</sup>研究显示,高频(主要10 Hz)TMS的治疗效果显著优于低频(1 Hz)。

在rTMS干预PTSD的过程中,脉冲数量与治疗效果并非呈简单的正相关关系。2021年的一项研究使用TMS对PTSD治疗结果进行了荟萃分析,发现治疗剂量可能与更强的治疗效果无关<sup>[14]</sup>。对于其可能的疗效机制,PTSD相关学习模式会有助于增强恐惧反应系统的敏感性和创伤相关恐惧学习的过分泛化,故有效的PTSD治疗最有可能涉及利用大脑可塑性来纠正先前的错误学习模式。而由于已经发现TMS影响大脑可塑性,许多学者也已经开始探索它是否可以加速响应或增强基于PTSD干预的学习<sup>[14]</sup>。除TMS的标准模式外,TMS的TBS模式近些年在精神障碍的治疗上同样应用广泛。Petrosino等<sup>[17]</sup>研究表明,间歇性 $\theta$ 爆发刺激(intermittent theta burst stimulation, iTBS)在治疗PTSD上同样是有有效的,且在iTBS刺激后的1年中,更多的iTBS累积干预证明了临床上有意义的改善,而且神经影像的默认模式连通性可用于预测长期结果。在PTSD的治疗中,iTBS模式是否与10 Hz标准TMS具有同等疗效仍是学术研究争议焦点。为了比较两种TMS的疗效,Yuan等<sup>[18]</sup>研究发现,干预后iTBS组和rTMS组的PTSD量表平民版和创伤后成长量表评分与假刺激iTBS组有显著差异。而这两个量表评

分在两个治疗组间无显著差异。iTBS治疗时间短,能有效改善PTSD症状,与rTMS治疗效果无显著差异。因此,iTBS具有减少等待时间和潜在成本等优点,值得推广应用到PTSD症状的干预。后续研究应深入探究iTBS的神经生理学机制,精细化其刺激参数,并系统评估其在PTSD治疗中的潜在临床价值。

对于TMS的联合治疗方案,某些精神障碍的治疗已整合了心理治疗策略。近期有研究将rTMS与PTSD的常用心理治疗方法中的暴露疗法相结合。Jiang等<sup>[19]</sup>探讨了rTMS(或联合短暂卒中再暴露)治疗卒中后PTSD的效果,表明rTMS可有效治疗脑卒中后PTSD,而且结合简易暴露程序可加速其治疗效果,来争取快速缓解患者症状。另一项相关研究探讨了TMS结合行为治疗协同增效的作用机制<sup>[20]</sup>。TMS的行为改善作用机制可能是通过增强前额叶和皮层下/边缘系统结构及相关网络的功能,从而提高神经可塑性。由于增强了消退学习能力,或者改善了灵活思考和减少反刍倾向的能力,TMS在PTSD和焦虑方面带来了行为改变。对于难治性PTSD患者,这种靶向干预手段可能带来突破性进展。通过缩短治疗周期,TMS有望提高患者的治疗依从性,推动完整疗程的顺利完成。

**1.3 新型TMS技术在PTSD的应用情况** 近年来出现了许多新的TMS技术,这些技术已经应用于不同的精神障碍领域。然而,它们在治疗PTSD方面的效果尚待进一步研究。首先是深部经颅磁刺激(deep transcranial magnetic stimulation, DTMS),无论是传统TMS和DTMS都可以调节皮层兴奋性,传统TMS的8线圈仅能调节1.5~2.5 cm深度的皮层,而DTMS采用的H型线圈则可调节最大深度至6 cm皮层<sup>[21]</sup>。DTMS最初主要用于难治性抑郁症,目前正在研究其在治疗一系列广泛的神经和精神疾病中的应用,如双相情感障碍、抑郁症、偏头痛、PTSD和精神分裂症等<sup>[22]</sup>。目前关于DTMS治疗PTSD的研究较少,Isserles等<sup>[23]</sup>探讨了DTMS联合简易暴露疗法治疗PTSD的有效性,结果表明在创伤事件脚本暴露后,给予DTMS的患者在临床用创伤后应激障碍量表(clinician-administered PTSD scale, CAPS)的侵入性症状部分有显著改善,而对照组患者没有明显改善。

导航经颅磁刺激(navigation transcranial magnetic stimulation, NTMS)作为一种新型TMS技术,对于PTSD的治疗同样有待进一步研究。NTMS是通过集成协作机器人、光学追踪、医学影像分析处理和定位导航的技术,以实现个体目标靶向分析和精准定位。Giuffre等<sup>[24]</sup>研究已经证明,机器人引导的神经导航TMS映射程序可以更好地控制线圈定向,提高精度,并改善电流传递。有研究使用机器人神经导航TMS测绘运动图的可靠性,结果提示机器人引导的神经导航TMS测绘相对可靠<sup>[25]</sup>。虽然尚未检索到有基于医学影像的NTMS治疗PTSD的研究,但在导航TMS的相关研究中,NTMS通过左DLPFC来降低前扣带回皮层的活动,发现NTMS能恢复默认模式网络和楔前叶网络、左执行控制网络和感觉-运动网络之间的异常功能网络连接<sup>[26]</sup>。因此,NTMS将会用于更多的精神科疾病,包括PTSD。此外,目前有相对更加精准的个体化的TMS治疗已经应用于PTSD患者的治疗,Makale等<sup>[27]</sup>的研究显示,因为有研究表明PTSD起因于大脑默认模式网络活动的中断,故此研究使用基于频谱的脑电图引导来用于优化症状解决,经过4~6周的个体TMS治疗,PTSD的退伍军人表现出显著的临床改善。而且在50%以上的患者中,PTSD症状得到了完全缓解。

综上,早期研究表明,使用TMS作为治疗PTSD的治疗工具取得了令人鼓舞的结果。它的使用相较于传统治疗安全、副作用少。然而,还需要收集更多的数据,才能更有把握地将TMS疗法作为经批准的PTSD治疗方案。为了最大化治疗潜力和最小化可能的副作用,需要建立TMS参数、PTSD治疗的时间和确定最佳的目标区域以及应用程序设置。此外,还需要对PTSD和TMS进行研究,以了解该技术如何应用于治疗该疾病的侵入性症状<sup>[28]</sup>。

## 2 TES治疗PTSD

TES通过在头皮释放微弱的电流来调节神经细胞跨膜电位,使皮层兴奋性发生改变<sup>[29]</sup>。TES包括经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)、经颅交流电刺激(transcranial alternating current stimulation, tACS)和经颅随机噪声刺激

(transcranial random noise stimulation, tRNS)。其中主要用于治疗 PTSD 的是 tDCS。且相关研究表明 tDCS 对 PTSD 治疗效果良好。如 Van't Wout 等<sup>[30]</sup> 研究显示, tDCS 在恐惧消退巩固过程中的作用, 可能是一种增强消退回忆的方法。接下来这个研究支持了 10 次 2 mA 双侧 DLPFC 的 tDCS 治疗 PTSD 症状的疗效。Ahmadzadeha 等<sup>[31]</sup> 的一项随机双盲对照试验, 纳入 40 例 PTSD 患者, 对 PTSD、抑郁和焦虑症状在治疗前、治疗后及 1 个月的随访期后进行盲评。该研究发现, tDCS 治疗能显著降低 PTSD 患者的症状, 包括过度觉醒、抑郁和焦虑等。与假刺激相比, 真刺激的效果更显著, 且能降低再次出现症状的概率。

有研究试着确定 tDCS 治疗 PTSD 结局的有利预测因素, 在 Han 等<sup>[32]</sup> 的一项研究中, 51 例患者接受了 10 次 2 mA、20 min 的 tDCS 治疗。其研究结果强调了额叶 tDCS 治疗 PTSD 患者的疗效, 并将基线期反刍性思维得分与数字广度测验成绩确定为 tDCS 治疗结局的有利预测因素。从以上研究结果可以看出, tDCS 治疗对 PTSD 的症状缓解是有效的。此外, tACS 及 tRNS 治疗 PTSD 的现状尚不清楚。

### 3 光照治疗 PTSD

光是影响多种大脑功能的强大环境因素, 对情绪、记忆、大脑发育和代谢等脑功能有调节作用<sup>[33]</sup>。光照治疗是一种通过接受特定波长的可见光, 在一定强度及时间范围内调节机体生物节律及神经递质分泌的一种治疗<sup>[33]</sup>。Zalta 等<sup>[34]</sup> 对可穿戴照明设备进行了一项安慰剂对照的试点试验, 其结果是治疗耐受性良好, 并观察到高度可感知的积极效应。与安慰剂组相比, 真刺激组(光照强度 500 lux, 1 h/d)在缓解 PTSD 和抑郁症状方面展现出更为明显的改善效果。这项研究初步证实了光疗法可以改善 PTSD 的概念。但是为了确定治疗效果, 需要进行更多、更大规模的试验。Youngstedt 等<sup>[35]</sup> 在 69 例因战争患有 PTSD 的退伍军人中进行随机双盲试验, 研究结果提示, 与对照组相比强光照射(光照强度 10 000 lux, 30 min/d)可显著改善临床用 PTSD 诊断量表(CAPS)和临床总体印象量表(clinical global impression scale, CGI)的评分。这项迄今为止最全

面的光照治疗 PTSD 的研究表明, 在患有慢性 PTSD 的退伍军人中, 光照治疗对主要疗效指标(CAPS 和 CGI)达到临床相关的短期显著改善。在焦虑、抑郁或睡眠障碍方面尚未发现明显的影响。基于此, 有必要进一步探索光照治疗对 PTSD 昼夜节律的影响机制。

### 4 EEG-NF 治疗 PTSD

EEG-NF 是一种可用于调整与觉醒相关的脑电图大脑活动。EEG-NF 在注意力缺陷多动障碍方面的研究最为广泛。EEG-NF 是一个闭环学习过程, 其中患者和计算机同时参与。计算机实时提供视觉或听觉反馈活动, 患者需要学会这些自我调节特定的大脑活动。使受试者能够发展技能, 以维持目标活动, 并在反复训练后, 诱导大脑的长期神经可塑性<sup>[36]</sup>。因此, 相对于经颅磁刺激等被动外源性方法, 神经反馈学习可能被认为是一种适应性内源性神经调节刺激技术。EEG-NF 训练已被证明可以改变长期的神经元活动或连通性, 并改善相关的过度警觉或情感钝化症状<sup>[37]</sup>。

一个纳入 7 项近期神经反馈治疗 PTSD 的随机对照研究的综述提示, 相较于功能磁共振的神经反馈, EEG-NF 训练对 PTSD 症状的训练更有帮助<sup>[38]</sup>。在 Van der Kolk 等<sup>[39]</sup> 的研究中, 其纳入了 52 例 PTSD 患者, 与对照组相比, EEG-NF 组在慢性 PTSD 患者中产生了显著的 PTSD 症状改善。Du Bois 等<sup>[40]</sup> 的研究显示, 在 PTSD 患者中, 神经反馈训练对减轻症状严重程度有重要的临床效果, 即使在实验室外的情况下, 使用佩戴式低成本脑电图的 EEG-NF 培训也是成功的。未来的研究肯定会受益于更严格的方法设计, 包括具有更大样本量的随机双盲对照试验以及纵向随访结果, 以增加研究结果的可信度<sup>[36]</sup>。

就其长期治疗的有效性而言, Elbogen 等<sup>[41]</sup> 调查了一种移动设备上的应用程序相连接的便携式脑电图耳机, 用于提供神经反馈, 以评估其对患有慢性疼痛、创伤性脑损伤和 PTSD 退伍军人的长期治疗效果, 研究对象被要求在 3 个月内自行执行“移动神经反馈训练”, 其中 36 例退伍军人在 3 个月后的随访中报告了症状的改善, 包括疼痛、抑郁、PTSD 症状、愤怒、睡眠障碍和自杀意念的降低。相关研

究表明,通过EEG-NF进行调节可以改善PTSD患者的症状,同时症状的改善与特定脑网络的连接增强有关,包括右侧脑岛、双侧后扣带回、右侧额中回和左侧内侧前额叶皮层的默认模式网络<sup>[42]</sup>。

## 5 总结与展望

综上所述,常规rTMS(尤其是右DLPFC靶点)对PTSD具有明确的临床疗效,高频(10 Hz)与低频(1 Hz)方案均显示出改善症状的效果,未来需进一步探索TBS模式的优化参数组合。从现有证据看,增加治疗脉冲数或疗程并不必然导致治疗效果的线性提升,最佳治疗参数仍需进一步系统性研究。随着TMS技术的不断发展,NTMS和DTMS在PTSD治疗中展现出新的希望。现有研究初步证实,DTMS对缓解患者的侵入性症状具有明确的临床价值,尽管该技术仍处于探索阶段。虽然NTMS治疗PTSD的具体情况尚未阐明,但基于其高度个性化和精准定位的特征,未来仍有进一步发展的巨大潜力。通过整合TMS与PTSD脑网络研究,并结合近红外光谱等技术,有助于优化个性化治疗方案并提高评估准确性。同时借助神经影像学技术,临床医师或研究员可预先对患者的rTMS治疗反应进行精确预测。

当然TMS也存在应用局限:第一,需严格掌握禁忌证(如癫痫急性期、颅内动脉瘤、白内障术后、颅内/心脏金属支架植入等),且需要患者一定的配合度。第二,尽管现有的大量研究表明,TMS治疗具有明显的安全性优势,大多数患者对该治疗方式的耐受性良好。但仍有少数患者不能耐受短期的头晕、头痛等不良反应,极个别甚至可能出现癫痫不良反应,需注意观察患者治疗时及治疗后的反应,及时进行沟通调整。鉴于PTSD的异质性表现,需要注意rTMS方案与PTSD亚型之间的匹配也可能存在差异。第三,尽管TMS在治疗焦虑、抑郁、睡眠障碍等常见精神科疾病显示出显著的疗效,但其在儿童精神障碍(如注意缺陷多动障碍)的治疗中,现有荟萃分析结果表明其疗效并不理想。

现有研究证实,tDCS对PTSD具有一定治疗效果,而tACS在PTSD治疗领域尚待进一步探索,未来有望开展相关研究。尽管光照治疗和脑电图生

物反馈治疗对PTSD的研究仍处于初级阶段,但初步研究已显示其一定的临床潜力,有待后续系统的科学探索。综合现有PTSD治疗手段,药物和心理治疗均有一定局限性,因此及早结合具有潜力的非侵入性神经调控方法,如rTMS、tDCS等已成为突破治疗瓶颈的关键途径。

## 参考文献:

- [1] 高标,许悦,陆小新.创伤后应激障碍的研究进展[J].中华卫生应急电子杂志,2017,3(5): 290-294.
- [2] 鲁萍萍,王亮.创伤后应激障碍的经颅磁刺激研究进展[J].生物化学与生物物理进展,2020,47(4): 319-334.
- [3] YABUKI Y, FUKUNAGA K. Clinical therapeutic strategy and neuronal mechanism underlying post-traumatic stress disorder (PTSD)[J]. International journal of molecular sciences, 2019, 20(15): 3614.
- [4] 伍芳慧,刘媛.创伤后应激障碍诊治研究进展[J].创伤外科杂志,2021,23(6): 472-475.
- [5] AVETYAN D, ZAKHARYAN R, PETREK M, et al. Telomere shortening in blood leukocytes of patients with post-traumatic stress disorder[J]. Journal of psychiatric research, 2019, 111: 83-88.
- [6] 刘阳,宁武凤,胡茂荣.创伤后应激障碍发病机制研究进展[J].国际精神病学杂志,2020,47(3): 425-428.
- [7] PHILIP N S, BARREDO J, AIKEN E, et al. Theta-burst transcranial magnetic stimulation for posttraumatic stress disorder[J]. American journal of psychiatry, 2019, 176(11): 939-948.
- [8] WANG M, YIN Y H, YANG H L, et al. Evaluating the safety, feasibility, and efficacy of non-invasive neuro-modulation techniques in chemotherapy-induced peripheral neuropathy: a systematic review[J]. European journal of oncology nursing, 2022, 58: 102124.
- [9] CHU C S, LI C T, BRUNONI A R, et al. Cognitive effects and acceptability of non-invasive brain stimulation on Alzheimer's disease and mild cognitive impairment: a component network meta-analysis[J]. Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry, 2021, 92(2): 195-203.
- [10] ZORZO C, BANQUERI M, HIGARZA S G, et al. Current state of transcranial magnetic stimulation and its use in psychiatry[J]. Actas espanolas de psiquiatria, 2019, 47(3): 110-120.
- [11] TERRANOVA C, RIZZO V, CACCIOLA A, et al. Is there

- a future for non-invasive brain stimulation as a therapeutic tool?[J]. *Frontiers in neurology*, 2019, 9: 1146.
- [12] DI LAZZARO V, ZIEMANN U, LEMON R N. State of the art: Physiology of transcranial motor cortex stimulation[J]. *Brain stimulation*, 2008, 1(4): 345-362.
- [13] KLOMJAI W, KATZ R, LACKMY-VALLÉE A. Basic principles of transcranial magnetic stimulation (TMS) and repetitive TMS (rTMS)[J]. *Annals of physical and rehabilitation medicine*, 2015, 58(4): 208-221.
- [14] BELSHER B E, BEECH E H, REDDY M K, et al. Advances in repetitive transcranial magnetic stimulation for posttraumatic stress disorder: a systematic review[J]. *Journal of psychiatric research*, 2021, 138: 598-606.
- [15] BERLIM M T, VAN DEN EYNDE F. Repetitive transcranial magnetic stimulation over the dorsolateral prefrontal cortex for treating posttraumatic stress disorder: an exploratory meta-analysis of randomized, double-blind and sham-controlled trials[J]. *Canadian journal of psychiatry Revue canadienne de psychiatrie*, 2014, 59(9): 487-496.
- [16] HERNANDEZ M J, RELJIC T, VAN TREES K, et al. Impact of comorbid PTSD on outcome of repetitive transcranial magnetic stimulation (TMS) for veterans with depression[J]. *The journal of clinical psychiatry*, 2020, 81(4): 19m1315.
- [17] PETROSINO N J, VAN 'T WOUT-FRANK M, AIKEN E, et al. One-year clinical outcomes following Theta burst stimulation for post-traumatic stress disorder[J]. *Neuro-psychopharmacology*, 2020, 45(6): 940-946.
- [18] YUAN H L, LIU B, LI F Z, et al. Effects of intermittent Theta-burst transcranial magnetic stimulation on post-traumatic stress disorder symptoms: a randomized controlled trial[J]. *Psychiatry research*, 2023, 329: 1155.
- [19] JIANG C, LI Z S, WANG J J, et al. Effectiveness of repetitive transcranial magnetic stimulation combined with a brief exposure procedure for post-stroke posttraumatic stress disorder[J]. *Journal of affective disorders*, 2023, 326: 89-95.
- [20] LANTRIP C, SZABO Y Z, ANDREW KOZEL F, et al. Neuromodulation as an augmenting strategy for behavioral therapies for anxiety and PTSD: a narrative review [J]. *Current treatment options in psychiatry*, 2022, 9: 406-418.
- [21] ROTH Y, AMIR A, LEVKOVITZ Y, et al. Three-dimensional distribution of the electric field induced in the brain by transcranial magnetic stimulation using figure-8 and deep H-coils[J]. *Journal of clinical neurophysiology*, 2007, 24(1): 31-38.
- [22] BERSANI F S, MINICHINO A, ENTICOTT P G, et al. Deep transcranial magnetic stimulation as a treatment for psychiatric disorders: a comprehensive review[J]. *European psychiatry*, 2013, 28(1): 30-39.
- [23] ISSELES M, SHALEV A Y, ROTH Y, et al. Effectiveness of deep transcranial magnetic stimulation combined with a brief exposure procedure in post-traumatic stress disorder-A pilot study[J]. *Brain stimulation*, 2013, 6(3): 377-383.
- [24] GIUFFRE A, KAHL C K, ZEWIDIE E, et al. Reliability of robotic transcranial magnetic stimulation motor mapping [J]. *Journal of neurophysiology*, 2021, 125(1): 74-85.
- [25] KAHL C K, GIUFFRE A, WRIGHTSON J G, et al. Reliability of active robotic neuro-navigated transcranial magnetic stimulation motor maps[J]. *Experimental brain research*, 2023, 241(2): 355-364.
- [26] TANG N L, SUN C Z, WANG Y T, et al. Clinical response of major depressive disorder patients with suicidal ideation to individual target-transcranial magnetic stimulation[J]. *Frontiers in psychiatry*, 2021, 12: 768819.
- [27] MAKALE M T, ABBASI S, NYBO C, et al. Personalized repetitive transcranial magnetic stimulation (prtms®) for post-traumatic stress disorder (ptsd) in military combat veterans[J]. *Heliyon*, 2023, 9(8): e1894.
- [28] EDINOFF A N, HEGEFELD T L, PETERSEN M, et al. Transcranial magnetic stimulation for post-traumatic stress disorder[J]. *Frontiers in psychiatry*, 2022, 13: 701348.
- [29] EKHTIARI H, TAVAKOLI H, ADDOLORATO G, et al. Transcranial electrical and magnetic stimulation (tES and TMS) for addiction medicine: a consensus paper on the present state of the science and the road ahead[J]. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 2019, 104: 118-140.
- [30] VAN 'T WOUT M, LONGO S M, REDDY M K, et al. Transcranial direct current stimulation may modulate extinction memory in posttraumatic stress disorder[J]. *Brain and behavior*, 2017, 7(5): e00681.
- [31] AHMADIZADEH M J, REZAEI M, FITZGERALD P B. Transcranial direct current stimulation (tDCS) for post-traumatic stress disorder (PTSD): a randomized, double-blinded, controlled trial[J]. *Brain research bulletin*, 2019, 153: 273-278.
- [32] HAN J, CHOI K M, YANG C, et al. Treatment efficacy of

- tDCS and predictors of treatment response in patients with post-traumatic stress disorder[J]. *Journal of affective disorders*, 2022, 318: 357-363.
- [33] HUANG X D, TAO Q, REN C R. A comprehensive overview of the neural mechanisms of light therapy[J]. *Neuroscience bulletin*, 2024, 40(3): 350-362.
- [34] ZALTA A K, BRAVO K, VALDESPINO-HAYDEN Z, et al. A placebo-controlled pilot study of a wearable morning bright light treatment for probable PTSD[J]. *Depression and anxiety*, 2019, 36(7): 617-624.
- [35] YOUNGSTEDT S D, KLINE C E, REYNOLDS A M, et al. Bright light treatment of combat-related PTSD: a randomized controlled trial[J]. *Military medicine*, 2022, 187(3/4): e435-e444.
- [36] ROS T, BAARS B J, LANIUS R A, et al. Tuning pathological brain oscillations with neurofeedback: a systems neuroscience framework[J]. *Frontiers in human neuroscience*, 2014, 8: 1008.
- [37] MICOULAUD-FRANCHI J A, JEUNET C, PELISSOLO A, et al. EEG neurofeedback for anxiety disorders and post-traumatic stress disorders: a blueprint for a promising brain-based therapy[J]. *Current psychiatry reports*, 2021, 23(12): 84.
- [38] HONG J, PARK J H. Efficacy of neuro-feedback training for PTSD symptoms: a systematic review and meta-analysis[J]. *International journal of environmental research and public health*, 2022, 19(20): 13096.
- [39] VAN DER KOLK B A, HODGDON H, GAPEN M, et al. A randomized controlled study of neurofeedback for chronic PTSD[J]. *PLoS one*, 2016, 11(12): e016675.
- [40] DU BOIS N, BIGIRIMANA A D, KORIK A, et al. Neurofeedback with low-cost, wearable electroencephalography (EEG) reduces symptoms in chronic post-traumatic stress disorder[J]. *Journal of affective disorders*, 2021, 295: 1319-1334.
- [41] ELBOGEN E B, ALSOBRINKS A, BATTLES S, et al. Mobile neurofeedback for pain management in veterans with TBI and PTSD[J]. *Pain medicine*, 2021, 22(2): 329-337.
- [42] KLUETSCH R C, ROS T, THÉBERGE J, et al. Plastic modulation of PTSD resting-state networks and subjective wellbeing by EEG neurofeedback[J]. *Acta psychiatrica Scandinavica*, 2014, 130(2): 123-136.

本文引用格式：

罗芳,肖洪奇,邱昌建,等.非侵入性神经调控技术治疗创伤后应激障碍研究进展[J].广西医科大学学报,2025,42(4):608-614.DOI:10.16190/j.cnki.45-1211/r.2025.04.016

LUO F, XIAO H Q, QIU C J, et al. Research progress of non-invasive neuromodulation techniques in the treatment of post-traumatic stress disorder [J]. *Journal of Guangxi medical university*, 2025, 42(4): 608-614.DOI:10.16190/j.cnki.45-1211/r.2025.04.016