

# 无创性神经调控技术治疗睡眠障碍的研究进展

吴瑜婷<sup>1\*</sup>, 江桂华<sup>1,2,3#</sup>

<sup>1</sup>暨南大学附属广东省第二人民医院医学影像科, 广东 广州

<sup>2</sup>广东省第二人民医院医学影像科, 广东 广州

<sup>3</sup>福建医科大学附属厦门弘爱医院医学影像科, 福建 厦门

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月1日; 发布日期: 2026年4月13日

## 摘要

睡眠障碍作为一类破坏正常睡眠模式的疾患, 是临床实践中极为常见的问题之一。睡眠障碍干扰个体正常的躯体、心理、社交和情绪功能, 严重时可能影响整体健康状况、个人安全乃至生活质量。无创神经调控技术是治疗睡眠障碍的非侵入性且安全有效的手段, 主要通过磁刺激、电刺激等方式对大脑神经功能状态进行调控, 主要类型包括重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)和经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)。本综述将从原理及特点、治疗方法、治疗效果等方面对tDCS及rTMS在睡眠障碍中的应用进行阐述, 以期为今后睡眠障碍的临床治疗和研究提供借鉴。

## 关键词

睡眠障碍, 无创神经调控技术, 重复经颅磁刺激, 经颅直流电刺激

# Research Progress of Noninvasive Neuromodulation Technology in the Treatment of Sleep Disorders

Yuting Wu<sup>1\*</sup>, Guihua Jiang<sup>1,2,3#</sup>

<sup>1</sup>Department of Medical Imaging, The Affiliated Guangdong Second Provincial General Hospital of Jinan University, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Department of Medical Imaging, Guangdong Second Provincial General Hospital, Guangzhou Guangdong

<sup>3</sup>Department of Medical Imaging, Xiamen Humanity Hospital Fujian Medical University, Xiamen Fujian

Received: March 8, 2026; accepted: April 1, 2026; published: April 13, 2026

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 吴瑜婷, 江桂华. 无创性神经调控技术治疗睡眠障碍的研究进展[J]. 临床个性化医学, 2026, 5(2): 534-546.  
DOI: 10.12677/jcpm.2026.52154

## Abstract

Sleep disorders, as a category of conditions that disrupt normal sleep patterns, are among the most prevalent issues in clinical practice. These disorders interfere with individuals' normal physical, psychological, social, and emotional functions, and in severe cases, may adversely affect overall health status, personal safety, and even quality of life. Non-invasive neuromodulation techniques represent a non-invasive and safe therapeutic approach for sleep disorders, primarily involving the modulation of brain neural functional states through methods such as magnetic stimulation and electrical stimulation. The main types include repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) and transcranial direct current stimulation (tDCS). This review will elaborate on the application of tDCS and rTMS in sleep disorders from aspects such as principles and characteristics, treatment methods, and therapeutic outcomes, aiming to provide references for future clinical treatment and research on sleep disorders.

## Keywords

Sleep Disorders, Non-Invasive Neuromodulation Techniques, Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, Transcranial Direct Current Stimulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 睡眠障碍的研究现状

近年来, 睡眠障碍发病率呈快速上升趋势。我国睡眠研究会 2023 年 3 月发布的《2023 年运动与睡眠白皮书》显示, 我国有 3 亿多人面临睡眠障碍及相关问题[1]。睡眠障碍在成人和儿童中均较为常见, 并且存在多种类型。国际睡眠障碍分类(International Classification of Sleep Disorders, ICSD) [2]可为睡眠障碍提供标准化的分类和定义, ICSD 第三版(ICSD-3)将睡眠障碍分为以下六大类。

### 1.1. 失眠

失眠是一种常见的临床疾病, 核心特征为入睡或维持睡眠困难, 并伴有清醒时烦躁或疲劳等症状。失眠常与多种精神心理及躯体疾病共病, 也是部分常见睡眠障碍的早期核心症状[3]。目前, 认知行为疗法(Cognitive Behavioral Therapy for Insomnia, CBTI)因其有效性、安全性和益处的持久性, 被认为是失眠的一线治疗方法[4], 但其高昂的成本限制了其临床普及。因此, 目前临床上用于治疗失眠的方法主要有药物治疗和无创性神经调控技术, 如重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)和经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)等。

### 1.2. 睡眠呼吸障碍(Sleep-Disordered Breathing, SDB)

睡眠呼吸障碍是一系列与睡眠相关的呼吸异常疾病的总称, 包括打鼾、阻塞性睡眠呼吸暂停(Obstructive Sleep Apnea Syndrome, OSAS)、中枢性睡眠呼吸暂停(Central Sleep Apnea, CSA)、呼吸相关觉醒和睡眠相关的通气不足。SDB 的特征是睡眠期间呼吸暂停(指反复停止呼吸)或呼吸低通气(指呼吸幅度降低), 这些事件通常伴随睡眠碎片化、血氧饱和度下降以及交感神经系统激活并伴心率和血压升高[5]。

OSAS 是睡眠呼吸障碍的最常见形式, 其发病机制在心血管和代谢疾病的发病机制中起作用, 并可

能会影响神经系统患者的大脑健康和病情进展[6]。目前在临床上, 尽管持续气道正压通气治疗和其他形式的无创正压通气仍然是最常见治疗方法, 但包括 rTMS 在内的新型疗法也已逐步应用于临床。

### 1.3. 中枢性嗜睡障碍(Central Disorders of Hypersomnolence, CDH)

CDH 的特征是患者以白天过度嗜睡为主要症状, 日常功能受到显著影响, 且该症状不能归因于其他睡眠障碍, 如夜间睡眠被扰乱(如阻塞性睡眠呼吸暂停)、睡眠不足或昼夜节律失常[7]。CDH 分为原发性睡眠过度和继发性睡眠过度, 具体包括 1 型发作性睡病(Narcolepsy Type 1, NT1)、2 型发作性睡病(Narcolepsy Type 2, NT2)、特发性睡眠过度(Idiopathic Hypersomnia, IH)、Kleine-Levin 综合征(Kleine-Levin Syndrome, KLS)和睡眠不足综合征(Insufficient Sleep Syndrome, ISS) [8]。目前该疾病的诊断通常需要结合临床评估和睡眠实验室内的客观检查[9], 临床上仍以服用药物作为主要治疗方法[10]。

### 1.4. 昼夜节律睡眠 - 觉醒障碍(Circadian Rhythm Sleep-Wake Disorders, CRSWD)

昼夜节律睡眠 - 觉醒障碍是一类独特的睡眠障碍, 极易被误认为是失眠或早醒, 导致治疗不当。它由个体昼夜节律计时系统功能异常或内源性昼夜节律与所需的睡眠 - 觉醒时间表之间的不匹配引起[11], 造成睡眠时间与 24 小时环境周期之间发生错位。延迟睡眠阶段障碍(Delayed Sleep-Wake Phase Disorder, DSPD)和先进睡眠阶段障碍(Advanced Sleep-Wake Phase Disorder, ASPD)是两种最常见的昼夜节律睡眠障碍[12], 典型者常见于青少年或老年人, 表现为睡眠时间分别偏移至较晚或更早的时间, 通常会导致具有临床意义的痛苦, 并引起精神、身体、社会、职业、教育或其他功能障碍[13]。目前, 常见的治疗 CRSWD 方法包括睡眠健康教育、时间疗法、光疗、褪黑激素和催眠药物治疗[14]。

### 1.5. 异态睡眠

异态睡眠定义为在睡眠开始、睡眠期间或睡眠觉醒期间发生的不良身体事件或经历[15], 有时具有突出的自主神经特征, 可细分为觉醒障碍(如梦游、睡惊症和意识模糊性觉醒)、快速眼动(Rapid Eye Movement, REM)睡眠障碍(如噩梦障碍、快速眼动睡眠行为障碍和复发性孤立性睡眠麻痹)和其他异态睡眠(如睡眠相关的呻吟、爆炸头综合征、睡眠相关的幻觉和与睡眠相关的进食障碍)。异态睡眠(尤其是与 REM 相关的异态睡眠)可能与精神合并症有关, 在儿童群体中发病率较高[16]。许多异态睡眠的潜在病理生理学机制是状态解离, 即大脑部分清醒和部分睡眠。这种混合状态会导致大脑足够清醒, 可以执行非常复杂且持久的运动或言语行为, 但由于睡眠意识缺失, 无法意识到这些行为并对其负责。对于异态睡眠, 目前支持药物治疗的临床数据有限, 但在严重的情况下仍可能需要药物治疗。据报道, 氯硝西泮治疗 REM 睡眠障碍的有效率高达 89% [17]。

### 1.6. 睡眠相关运动障碍

最新版《国际睡眠障碍分类》将睡眠相关运动障碍分为不宁腿综合征(Restless Legs Syndrome, RLS)、周期性肢体运动障碍、睡眠相关腿抽筋、睡眠相关磨牙症和睡眠相关节律性运动障碍[18]。RLS 是一种具有明显昼夜模式的肢体慢性运动障碍, 虽然症状出现在清醒时, 但与睡眠密切相关[19]。它常与神经系统、精神、血管和炎症性疾病共病[20], 病理生理学机制可能是中枢性缺铁、多巴胺分泌过多和皮质兴奋异常的结合[21]。

近年来, 睡眠障碍的发生率呈逐年上升趋势, 但此类问题往往未得到足够重视。这种忽视不仅可能导致症状加重、共病风险增加, 还会影响整体健康与生活质量。因此, 对睡眠障碍进行早期识别与规范干预具有重要的临床意义。目前, 药物治疗是我国睡眠障碍临床推荐的主要方法, 但患者药物治疗的依从性不高, 且存在药物不良反应、副作用、耐受性形成及病情容易反复等问题, 在一定程度上限制了其

应用, 因此探索更多的非药物治疗手段一直是睡眠障碍治疗领域的研究热点。

无创性神经调控技术如 rTMS 和 tDCS, 是改善神经退行性疾病患者运动和非运动症状的非药物方法。由于该方法具有无痛、安全、价廉、参数和靶点可调整等优点, 近年来也被广泛应用于睡眠障碍的治疗领域, 展示出广阔的发展前景。本文对 rTMS 和 tDCS 用于治疗睡眠障碍的作用机制、治疗效果、治疗方法以及未来的发展前景进行综述, 以期为临床上应用无创神经调控技术治疗睡眠障碍提供新思路。

## 2. 重复经颅磁刺激在睡眠障碍的应用现状

### 2.1. 原理及特点

重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)是一种以电磁学为基础的非侵入性神经调控技术。rTMS 是指在患者清醒状态下, 通过头皮线圈产生磁场, 利用电磁感应的无痛方式在大脑内产生阈上电流, 诱导运动皮层发生兴奋性或抑制性变化, 进而对大脑的生物电活动、脑血流及代谢进行调节, 达到改善脑功能的目的。rTMS 可改善睡眠障碍的主要作用机制被认为是通过调节突触可塑性及改变睡眠障碍相关脑区之间的连接强度[22]。

临床上, rTMS 主要用于诱导大脑活动的变化, 如调节大脑皮质活动。这些 rTMS 诱导的大脑活动的变化可以持续到磁刺激周期之外, 即 rTMS 可以在大脑中产生持久的后效应。影响后效应的因素主要包括磁刺激的时间与频率。首先, 后效应的持续时间与刺激时间的长度呈正相关, 刺激时间越长, 后效应持续时间越长[23]。其次, rTMS 产生的效应性质取决于刺激频率, 据此可将 rTMS 分为低频(low frequency, LF, <1 Hz)和高频(high frequency, HF,  $\geq 5$  Hz)两种。低频刺激(<1 Hz)具有抑制效应, 且这种后效应的持续时间往往长于刺激本身的时长, 但在阈下强度(低于运动阈值)时, 1 Hz rTMS 往往不能对运动兴奋性产生可测量的影响; 高频刺激(>5 Hz)可诱导大脑产生兴奋效应, 但有证据表明, 200 Hz 的不间断 HF rTMS 也可能产生抑制反应, 只有在 43 个脉冲后加入间隔或暂停时才会表现出兴奋性[24]。此外, 另有研究表明 rTMS 还能显著改变脑内部分神经递质的浓度, 如多巴胺、去甲肾上腺素、5-羟色胺等[25], 而这些神经递质均与睡眠质量密切相关。因此, rTMS 通过改变脑内神经递质浓度调控睡眠节律, 可能也是其治疗睡眠障碍的机制之一。

总而言之, 结合上述的治疗原理及特点可见, rTMS 为开发更多针对睡眠障碍的非药物治疗方案提供了可能。此外, rTMS 与临床、睡眠相关和神经影像学数据相结合, 可作为暂时调节皮质兴奋性和诱导短期突触可塑性的一种有效工具[26]。

### 2.2. 治疗方法及效果

迄今为止, rTMS 已在许多神经和精神疾病中得到应用并发挥不同程度的治疗作用, 并且在临床上已成为治疗多种睡眠障碍的有效工具[26], 尤其是在原发性失眠、不宁腿综合征和阻塞性睡眠呼吸暂停综合征的治疗中应用广泛。现以这几种疾病为例, 介绍 rTMS 在临床治疗睡眠障碍中的应用情况。

#### 2.2.1. 原发性失眠(Primary Insomnia, PI)

PI 是指在没有身体、精神或物质相关原因干扰的情况下难以入睡、维持睡眠或非恢复性睡眠, 并伴有日间功能显著受损的睡眠障碍, 是一种非常普遍的疾病。近年来, rTMS 因其有效性和安全性在治疗失眠领域受到了广泛关注。有研究表明, 失眠患者的睡眠紊乱与皮质代谢异常有关, 左侧背外侧前额叶皮质(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)被认为是 rTMS 治疗 PI 的关键靶点[27]。基于黎曼等人在 2010 年提出的失眠患者的系统性高唤醒可能根源于皮层多动这一假设, 相较于高频刺激, 大多数 rTMS 相关研究均采用低频刺激来改善失眠患者的睡眠状况[28]。从神经环路角度来看, DLPFC 作为默认模式网络和执行控制网络的重要节点, 其过度活跃与失眠患者入睡前无法抑制的“反刍思维”和过度警觉密切相关。

低频 rTMS 抑制左侧 DLPFC 后, 不仅降低了该区域自身的代谢, 还通过其与后扣带回、海马等默认模式网络核心脑区的功能连接, 减少了入睡前的自我参照思维和内省活动, 从而为睡眠的发生创造了条件。这种对功能网络的“重启”或“重置”, 可能是 rTMS 治疗的深层机制所在。

国外一项研究在左侧 DLPFC 施加 1 Hz rTMS, 发现 rTMS 的有效作用可以通过分布式网络介导, 使失眠患者左侧 DLPFC - 右侧额上回(superior frontal gyrus, SFG)皮层之间过度兴奋的功能连接正常化, 进而改善患者失眠症状, 其机制与左侧 DLPFC 中枢通路的调节有关[29]。值得注意的是, rTMS 改善失眠的机制并非孤立地调节单一脑区。失眠的核心病理特征被认为是“皮质高唤醒状态”, 即大脑在睡眠时仍保持过度的警觉性。rTMS 通过低频刺激抑制过度活跃的 DLPFC, 不仅降低了局部皮层的兴奋性, 更重要的是可能通过调节皮质 - 丘脑 - 皮质环路, 降低了丘脑感觉门控的增益, 减少对外界刺激的感知, 从而促进睡眠的维持。这种对环路水平的调控, 可能是其改善失眠“高唤醒”核心症状的关键。并且由于 rTMS 的治疗效果具有持续性, 理论上其具有广泛的治疗和康复作用, 可以引起持久的神经适应性变化。Feng 等人对 40 名慢性失眠患者的左侧 DLPFC 每天施加 1 次 rTMS, 持续 14 天[30]。研究人员采用磁共振波谱(Magnetic Resonance Spectroscopy, MRS)测定左侧 DLPFC 内  $\gamma$ -氨基丁酸( $\gamma$ -aminobutyric acid, GABA)相对于肌酸的浓度, 采用失眠严重指数(Insomnia Severity Index, ISI)评价失眠症状, 并在治疗前后对所有受试者进行 MRS 和 ISI 评定。他们的研究表明 1 Hz rTMS 有可能通过增加慢性失眠患者左侧 DLPFC 的 GABA 水平发挥治疗作用。然而, 目前对于 MRS 技术检测 GABA 的可靠性和敏感性尚存在一定争议, 这限制了对结果因果关系的推断。此外, GABA 水平的变化是 rTMS 治疗的直接效应还是间接伴随现象, 仍需进一步探究。除这一途径外, 另有一研究表明 rTMS 刺激 DLPFC 还可能通过提高大脑中脑源性神经营养因子的水平, 并降低大脑皮层的兴奋性, 从而达到改善失眠症状的目的[31]。

治疗的关键靶点除左侧 DLPFC 外, 低频(LF, <1 Hz) rTMS 刺激右侧 DLPFC 或后顶叶皮层(posterior parietal cortex, PPC)均可有效降低 PI 患者皮层的过度兴奋性[32], 达到改善睡眠质量的目的。一项研究在受试者右侧 DLPFC 每日进行 1 Hz rTMS, 为期 2 周, 结果显示受试者的 III 期睡眠和睡眠周期的快速动眼期均得到了改善, 并且这种治疗效果在 rTMS 刺激停止 1 个月后仍然存在, 患者在 3 个月内的复发率最低[33], 这体现了 rTMS 治疗失眠时发生的远程效应。由此可见, 低频(LF, <1 Hz) rTMS 无论是刺激左侧 DLPFC 还是右侧 DLPFC, 对改善失眠患者的睡眠状况均具有显著效果, 充分体现出 rTMS 治疗失眠的潜力巨大。

此外, 在多方式联合治疗方面, 针刺联合 12 次 1 Hz rTMS 刺激左侧 DLPFC, 对失眠患者睡眠质量的改善效果也优于联合其他刺激的对照组[34]。然而, 目前 PI 的常规 TMS 治疗缺乏个性化干预方案, 如果每次都能准确刺激 DLPFC, 且刺激参数量化一致, 那么 rTMS 有望取得更好的疗效。

### 2.2.2. 不宁腿综合征(Restless Legs Syndrome, RLS)

RLS 也称为 Willis-Ekbom 病, 是一种常见的运动障碍, 临床表现通常为夜间睡眠时, 双下肢出现极度不适感, 迫使患者不停地移动下肢或下地行走, 最终导致严重的睡眠障碍。目前, 对 RLS 患者的临床管理主要是通过药理学方法[35], 但药物治疗可能会产生各类副作用。事实上, rTMS 在降低 RLS 严重程度、改善睡眠质量和优化睡眠结构方面的效果, 优于药物治疗和认知行为干预, 其治疗效果主要取决于刺激频率。一般认为, 低频 rTMS 可以降低目标皮质区域的兴奋性, 而高频 rTMS 可以增强目标皮质区域的兴奋性。

近年来, 临床开始尝试使用低频 rTMS 刺激初级运动皮层(primary motor cortex, M1)来短暂缓解 RLS 患者在入睡或维持睡眠方面的障碍, 这种短期效应是通过对 RLS 患者的 M1 区, 尤其是初级躯体感觉皮层(primary somatosensory cortex, S1)进行无创性、无痛性抑制实现[36]。低频 rTMS 刺激 S1 区可以调节躯

体感觉处理, 并且 S1 兴奋性的降低还能对 M1 功能和运动控制的神经机制产生影响[37]。RLS 的病理生理学涉及中枢神经系统铁缺乏和皮质脊髓束兴奋性异常, 表现为感觉运动皮层整合功能的失调。rTMS 作用于 M1/S1 区域, 其治疗意义不仅在于局部兴奋性的改变。低频 rTMS 抑制 S1 区, 正是通过降低对下肢异常感觉信号的放大和处理, 从而打断感觉-运动环路中的异常兴奋传导; 同时, 其对 M1 区的间接影响也可能通过调节丘脑-皮层通路, 减少周期性肢体运动的触发。由此可知, 应用低频 rTMS 治疗 RLS 患者时, 刺激 M1 和 S1 区域均具有治疗效果。与治疗 PI 不同的是, 对于 RLS 患者, rTMS 的应用并不仅限于低频刺激。例如国内一项研究对 14 例 RLS 患者给予高频 Rtms (15 Hz, 100%运动阈值)治疗一个疗程(共 14 天), 刺激部位为大脑额叶前部皮质腿部运动代表区[38]。由于 RLS 患者的睡眠质量与其焦虑、抑郁状态密切相关[39], 所以在 rTMS 治疗 RLS 患者过程中, 患者的睡眠质量、焦虑和抑郁状态的改善是评估 RLS 病情好转的非常重要的指标。该研究分别采用国际 RLS 评定量表(International Restless Legs Scale, IRLS-RS)、匹兹堡睡眠质量指数(Pittsburgh Sleep Quality Index, PSQI)、汉密尔顿焦虑量表(Hamilton Anxiety Rating Scale, HAMA)和汉密尔顿抑郁量表(Hamilton Depression Rating Scale, HAMD)评估患者 RLS 的严重程度、睡眠质量、焦虑和抑郁程度, 并在四个时间点(基线、第 14 次治疗结束时、治疗后 1 个月和 2 个月)对患者进行量表评分。研究结果表明, 高频 rTMS 刺激可以明显降低 RLS 患者的发作频率和严重程度, 提高睡眠质量, 改善患者的焦虑和抑郁状态, 且疗效可持续 2 个月。

以上结果表明, 低频和高频 rTMS 均为改善 RLS 患者睡眠质量的有效非药物治疗手段。

### 2.2.3. 阻塞性睡眠呼吸暂停综合征(Obstructive Sleep Apnea Syndrome, OSAS)

OSAS 定义为每小时睡眠中出现 5 次呼吸事件, 如呼吸暂停、低通气或呼吸努力相关性微觉醒, 典型症状包括大声打鼾、呼吸暂停、喘息、窒息、打鼾和频繁醒来。OSAS 是一种常见的睡眠呼吸障碍疾病, 发病特征是睡眠期间反复发作的上气道塌陷。值得注意的是, OSAS 患者在清醒状态下并不会发生上气道塌陷, 因此, 临床上可通过在睡眠时使用 rTMS 刺激上气道肌肉来改善未觉醒 OSAS 患者的气流动力学, 从而提高患者睡眠质量。目前, 有观点提出 OSAS 患者的皮质兴奋性异常, 如受刺激皮层的整体低兴奋性和较慢的中枢运动传导率[40], 既往也已有研究发现 OSAS 患者的皮质兴奋性降低、皮质沉默期延长以及中枢运动电导率降低[41], 这些可能是 OSAS 患者各种神经认知功能异常的病理生理学基础。

然而, 不同于 RLS, 并非任何频率的 rTMS 对 OSAS 患者的睡眠质量均有改善作用。国外一项研究中对 13 例未经治疗的重度 OSAS 患者和 12 例年龄、性别相匹配的健康对照者进行 10 Hz rTMS 治疗[42], 研究人员分别于治疗前和治疗后对静息运动阈值、运动诱发电位波幅、皮质静息期等指标进行检测, 以评估运动皮层和皮质脊髓束兴奋性检测。研究结果表明, OSAS 患者运动皮层抑制增加, 且对 10 Hz rTMS 无反应。这一阴性结果可能与样本量较小、刺激参数单一(仅使用 10 Hz 高频刺激)以及患者异质性(不同严重程度或不同亚型的 OSAS 患者可能对 rTMS 的反应存在差异)有关。此外, 该研究仅评估了运动皮层的兴奋性变化, 未结合睡眠监测指标, 难以全面判断 rTMS 对 OSAS 核心症状的影响。

因此, rTMS 在 OSAS 患者中的疗效尚有待验证。尽管该疾病的复杂病理生理学机制值得进一步研究, 以探索不同的刺激方案, 但目前的证据还无法表明 HFrTMS 对改善 OSAS 患者的睡眠障碍具有显著作用。

## 3. 经颅直流电刺激在睡眠障碍的应用现状

### 3.1. 原理及特点

经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)和 rTMS 类似, 也是一种非侵入性脑刺激技术。传统的 tDCS 设备主要包括两个凝胶海绵电极(阴极和阳极, 用于向头皮输送弱强度电流), 一个电

池供电设备(用于发送恒定低强度电流), 以及一个输出的控制软件(用于设置刺激类型)。电极在头皮或皮肤上的排列称为蒙太奇, 其布局决定了接收大部分电能的大脑区域[43]。值得注意的是, 进行 tDCS 治疗时, 其中一个电极必须放置在目标脑区相对应的头皮部位, 另一个电极可以放置在头部(如眶上部), 也可以放置在颈部(如三角肌)。

tDCS 的作用机制是通过海绵电极将恒定的弱直流电(1~2 mA)施加到头皮上, 利用两个电极片可以改变大脑神经元异常的静息膜电位, 使大脑神经元产生生化反应和神经电生理反应, 进而对神经元膜电位进行阈下调制, 改变通过目标神经元的电流, 以增加或降低皮层兴奋性和活性, 即靠近阳极部位的脑区神经细胞出现去极化, 靠近阴极部位的细胞出现超极化。通过这种电位调节方式, 改变细胞膜内外的电位差, 在不同部位增加或降低目标脑区的兴奋性, 使大脑神经元恢复正常, 重塑或恢复神经元功能, 进而调节大脑皮质兴奋性和大脑自发活动, 影响情绪和认知功能, 最终达到有效治疗病症的目的。

与 rTMS 相似, tDCS 引起大脑皮质兴奋性增加或减少主要取决于使用的刺激类型[44]。阳极刺激是正性刺激, 通常可以增加刺激脑区神经元的兴奋性, 对大脑皮质起兴奋作用; 阴极刺激是负性刺激, 会降低刺激部位神经元的兴奋性, 对大脑皮质起抑制作用。tDCS 对睡眠的调节作用, 与其对睡眠稳态和昼夜节律两大调控系统的潜在影响有关。阳极 tDCS 刺激 DLPFC 等区域, 不仅能局部去极化神经元, 还可能通过增强慢波振荡, 促进睡眠稳态的恢复。更关键的是, 前额叶皮层与下丘脑视交叉上核(昼夜节律主时钟)存在解剖和功能联系, tDCS 可能通过调节这条通路, 影响褪黑素的分泌节律, 从而帮助重建紊乱的睡眠-觉醒周期。这种双重调节机制, 使其在治疗多种伴有睡眠障碍的疾病时显示出潜力。通常情况下, tDCS 作用时间一般为 20~60 min, 其疗效可在刺激停止后的一段时间甚至更长时间内观察到, 说明 tDCS 可以引起皮层兴奋性短暂或持久的变化, 这主要取决于刺激的时间和电流的强度。例如, 一项在脑卒中患者中开展的随机、双盲交叉研究表明, 在初级运动皮层上进行 20 分钟 1 mA 阳极刺激可以在刺激后 30 分钟以上使患者患侧手部持续产生性能增益[45]。另一项研究也发现, 在连续数天(24~26 天)的重复 tDCS 刺激结合运动训练后, 患者可获得持续数周甚至数月的治疗增益[46]。对此, 大多研究者将 tDCS 引发的短暂效应归因于膜电位的变化, 但有研究发现, 多巴胺系统也参与了 tDCS 持久后效应的产生[47]。

tDCS 是一种操作相对简单, 易于使用的技术, 具有安全、经济、耐受性好、副作用小、便于携带等优点。需要注意的是, tDCS 本身并不会引起动作电位, 而是促进或抑制自发的神经网络活动, 所以不会引起神经毒性作用, 这种技术所使用的直流电仅为 1~2 mA (人体安全电流为 10 mA), 远远低于引起动作电位的阈值。因此不会对人体皮肤、血管、肌肉、神经等组织造成损伤。

## 3.2. 治疗方法及效果

既往研究证明, tDCS 可通过放置在感兴趣的皮层区域上的电极向头皮施加微弱的直流电来调节皮层兴奋性, 从而提高睡眠质量和效率, 减少浅睡眠及觉醒次数, 并增加总睡眠时间[48]。临床观察发现, 睡眠障碍是许多精神和神经系统疾病的普遍症状。因此, 除睡眠障碍专症人群外, 在其他伴有睡眠障碍的神经和神经精神疾病中, tDCS 也可以有效改善患者客观或主观睡眠质量, 减轻睡眠障碍症状[49]。现以失眠症、抑郁症、双相情感障碍和神经退行性疾病为例, 阐述目前 tDCS 在临床治疗该类患者的睡眠障碍症状中的应用情况。

### 3.2.1. 失眠症

长期失眠会影响个人的正常生活和工作, 并增加各种健康问题的风险。因此, 临床迫切需要一种有效和安全的治疗方法来改善患者的睡眠状况。国外一项研究在失眠患者非快速眼动睡眠第 2 阶段采用慢速振荡 tDCS 的方法, 将患者的脑电波共振到睡眠慢波的频率[50]。初步结果表明, 在刺激终止后, 与对照组相比, 慢振荡 tDCS 可增加非快速眼动睡眠第 3 阶段的持续时间, 减少第 1 阶段的持续时间, 同时

减少第 1 阶段和入睡后觉醒时间, 还能提高睡眠效率, 促进从第 2 阶段到第 3 阶段的睡眠过渡, 并减少了第 2 阶段到觉醒的过渡。由此可知, tDCS 对失眠患者具有稳定睡眠的作用, 这可能与增强慢波睡眠的药物效果相仿。需要注意的是, 该研究为初步的探索性研究, 且慢振荡 tDCS 的技术参数(如频率、强度、持续时间)尚未标准化, 睡眠过程中实施刺激本身对患者睡眠的干扰效应也未予以控制, 因此研究结果的外推性和不同研究间的可比性均较差。

此外, tDCS 还可与药物联合使用, 以达到更好的治疗效果。如应用 tDCS 联合右佐匹克隆方案治疗慢性失眠, 可改善患者睡眠结构, 提高睡眠质量, 降低焦虑抑郁程度, 并具有远期疗效, 其机制可能与下调患者血清皮质酮、促肾上腺皮质激素水平有关。尽管联合治疗显示出优势, 但现有研究多为开放性试验, 缺乏盲法设计和随机对照, 可能存在显著的偏倚风险。联合治疗的最优方案(如 tDCS 与药物的时序关系、治疗周期)尚不明确, 且长期安全性数据不足, 这些因素共同限制了其临床推广。而且并非所有刺激部位的 tDCS 治疗都有效, 有研究表明 tDCS 刺激双额叶既不会对失眠症患者的睡眠连续性产生影响[51], 也不会引起睡眠结构的显著变化。

### 3.2.2. 抑郁症伴发失眠

抑郁症是一种普遍存在的慢性疾病, 会影响思想、情绪和身体健康。其核心特征是情绪低落、精力不足、悲伤、失眠和无法享受生活。抑郁症患者通常表现为一系列复杂的重叠症状, 且常出现躯体症状, 尤其是疲劳、失眠和不明原因的疼痛。其中, 失眠是抑郁症的常见症状, 被认为是抑郁症的常见共病。研究表明, 抑郁症患者的左侧 DLPFC 活性降低, 右侧 DLPFC 活性过高[52]。抑郁症伴发失眠的神经基础, 与皮层-边缘系统环路功能障碍密切相关。表现为左侧 DLPFC(执行控制)活性降低, 而右侧 DLPFC 及杏仁核(情绪加工)活性过高。tDCS 采用阳极左、阴极右的放置方式, 其治疗意义在于通过阳极兴奋左侧 DLPFC, 增强其对杏仁核的“自上而下”的抑制控制, 减轻情绪困扰对睡眠的干扰; 同时, 阴极对右侧 DLPFC 的抑制, 可直接降低与焦虑相关的过度觉醒。因此, tDCS 在改善抑郁情绪的同时改善睡眠, 是其对情绪调节环路进行整体调控的必然结果, 而非两个独立的治疗效应。这种对皮层-边缘系统平衡的恢复, 可能是其相较于单纯药物治疗能更全面改善抑郁症患者睡眠质量的根本原因。近年来一项研究对抑郁症患者进行 tDCS 治疗, 研究人员将阳极和阴极电极分别放置在左侧和右侧 DLPFC 上[53], 虽然 DLPFC 是阳极 tDCS 最常用的部位之一, 但这一实验将阴极放置在身体的对侧对应部分是一个相对较新的方法。该 tDCS 治疗方案为: 使用 2 mA 直流电刺激 DLPFC 30 分钟, 共 20 次(周末除外), 后续每周治疗 4 次。结果表明, 使用 tDCS 刺激双侧 DLPFC 的患者自我评估焦虑量表(Self-Rating Anxiety Scale, SAS)和自我评估抑郁量表(Self-Rating Depression Scale, SDS)总分均有显著改善, 匹兹堡睡眠质量量表(Pittsburgh Sleep Quality Index, PSQI)总分和除“睡眠时间和睡眠效率”外的所有 PSQI 分项在治疗后均有明显改善。此外, 另有研究通过多导睡眠图(Polysomnography, PSG)检测发现, tDCS 可增加总睡眠时间和提高睡眠效率, 进而改善睡眠结构[54]。不仅如此, 2021 年一项双相抑郁电治疗试验进一步证实了 tDCS 对治疗抑郁患者的睡眠障碍有显著效果[55]。

总而言之, 对于有抑郁症伴睡眠障碍的患者, tDCS 刺激 DLPFC 在改善抑郁症状的同时, 还能有效改善患者的睡眠质量, 使患者的睡眠质量和睡眠效率得到显著提高。将 tDCS 这种非药物治疗手段作为药物治疗的一种辅助手段, 其临床疗效显著优于单纯药物治疗。因此, 在临床上可将 tDCS 作为药物治疗的一个重要补充。

### 3.2.3. 双相情感障碍伴发失眠

双相情感障碍(Bipolar Disorder, BD)又称躁郁症, 核心特征为极度抑郁和躁狂, 通常与不良结局有关, 包括生活功能下降, 生活质量受损, 自杀死亡风险增加。睡眠问题在 BD 中很常见, 并且可能在疾病的

缓解期持续存在。国外一项研究将右侧小脑皮层作为阴极(抑制性), 左侧 DLPFC (兴奋性)作为阳极, 设置 tDCS 刺激强度为 2 mA, 时长为 20 min, 连续刺激 3 周, 通过 tDCS 刺激前额叶 - 小脑来改善缓解期 BD 患者的睡眠质量[56]。这一研究首次报道了 tDCS 对缓解期 BD 患者睡眠质量具有积极的影响。前额叶皮质 DLPFC 和小脑在调节睡眠过程中均发挥作用, tDCS 刺激前额叶可使 BD 患者缓解期 P3b 成分波幅升高, 潜伏期缩短[57]; 而 tDCS 同时刺激右侧小脑的阴极和左侧 DLPFC 的阳极具有调节前额叶 - 丘脑 - 小脑环路的潜力。因此, 临床治疗 BD 患者时可以通过这种方法来改善患者的睡眠质量。

然而, 当 tDCS 中的阴极电极从颅骨移动到外侧位置时, 两个大脑半球受到刺激的区域增大, 这对疗效和安全性都有潜在的影响。国外曾报告过一例 tDCS 引起轻躁狂的病例[58]。这表明 tDCS 在用于 BD 患者时, 与刺激双额叶相比, 刺激额叶外侧需要采取额外的预防和保护措施。

除上述神经和精神系统疾病外, tDCS 也可用于其他系统疾病伴睡眠障碍的治疗。如原发性脊髓灰质炎患者在感染后约 20~40 年通常会出现脊髓灰质炎后综合征(post-polio syndrome, PPS), 而睡眠障碍就是这一综合征的主要症状之一[59]。国外一项研究对脊髓灰质炎后综合征患者的运动前区域进行数天的阳极 tDCS 刺激[60], 结果发现患者的睡眠障碍和疲劳症状得到改善。此外, 也有研究表明对于脑损伤伴失眠患者, 持续 3 周的 tDCS 治疗可改善其睡眠质量, 且治疗效果在治疗开始后的 6 周内均能保持[61]。因此, tDCS 是治疗各类睡眠障碍的一种非侵入性、有价值的新型治疗工具, 无论患者是否合并基础疾病。

#### 4. 问题与展望

目前, tDCS 对睡眠障碍的治疗疗效还存在很多的不确定因素, 如电极片的放置部位和刺激模式以及作用时间等, 未来对这些影响因素的研究不仅要探索适用于绝大部分患者的通用模式, 还要强调个体化精准治疗。另外, tDCS 治疗最常见的不良反应是轻微刺痛感, 部分患者在治疗过程中还会出现瘙痒感、烧灼感、疼痛感等; 第二常见的不良反应是中度疲劳。目前为止, 已有研究表明在药物与 tDCS 联合治疗后, 患者可能出现躁狂或轻躁狂症状[62]。此外, 当前该领域研究的另一关键局限在于, 许多阳性结果来自小样本、单中心的探索性研究, 缺乏多中心、大样本的随机对照试验验证。不同研究之间刺激参数、电极放置部位、治疗时程的高度异质性, 加之部分研究未严格实施盲法和分配隐藏, 使得 Meta 分析难以得出统一的结论, 也容易产生发表偏倚。未来应鼓励阴性结果的发表, 并建立标准化的研究范式。

相比于 tDCS, rTMS 给患者带来的不良反应则更严重。有研究表明, rTMS 会引起患者头部的强烈不适[63], 尤其是快速变化的 TMS 还具有诱导癫痫的能力。此外, rTMS 治疗对操作者的技术要求较高, 如磁线圈必须保持静止; 并且用于排除安慰剂效应而施加的对照刺激, 对操作者来说通常具有挑战性[64]。鉴于在不同类型的睡眠障碍中可发现独特 TMS 模式, 并将其作为神经调节方案的精准靶标, 因此, 在未来应该进一步探索出更准确的定位靶点和更先进的刺激模式, 以优化 rTMS 治疗[65]。

现代医学的进步依赖于多种科学方法的融合。由于 rTMS 和 tDCS 在治疗睡眠障碍这一领域都有着各自不可替代的优点, 在今后的发展中可以考虑将二者联合应用于临床, 以达到更好的疗效。一项研究报告了一例 52 岁女性接受 rTMS 联合 tDCS 治疗的病例, 在治疗完成后, 患者整体的临床症状得到改善, 且在干预后 1 个月仍保持这种改善[66]。这一病例为 rTMS 和 tDCS 联合治疗睡眠障碍患者的可行性、耐受性和安全性提供了首个临床证据。此外, 近年来有不少学者将 rTMS 与功能磁共振相结合, 深入研究非侵入性脑刺激技术引起神经可塑性改变的机制。这为下一步将 tDCS 与功能磁共振联合开展研究提供了新思路, 表明无创性脑刺激技术正迈入一个全新的领域。总之, 无创性神经调控技术是蓬勃发展的新技术, 在临床研究领域潜力巨大, 值得深入研究与开发, 具有非常广阔的研究和应用前景。

#### 参考文献

- [1] 黄鑫, 李苏宁, 尹军祥, 等. 我国睡眠障碍防控研究现状及建议[J]. 四川大学学报(医学版), 2023, 54(2): 226-230.

- [2] Karna, B., Sankari, A. and Tatikonda, G. (2023) Sleep Disorder. StatPearls Publishing.
- [3] Dopheide, J.A. (2020) Insomnia Overview: Epidemiology, Pathophysiology, Diagnosis and Monitoring, and Nonpharmacologic Therapy. *The American Journal of Managed Care*, **26**, S76-S84.
- [4] Sutton, E.L. (2021) Insomnia. *Annals of Internal Medicine*, **174**, ITC33-ITC48. <https://doi.org/10.7326/aitc202103160>
- [5] Battisha, A., Kahlon, A. and Kalra, D.K. (2025) Sleep-disordered Breathing and Hypertension—a Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article 3115. <https://doi.org/10.3390/jcm14093115>
- [6] Foldvary-Schaefer, N.R. and Waters, T.E. (2017) Sleep-Disordered Breathing. *Continuum*, **23**, 1093-1116. <https://doi.org/10.1212/01.con.0000522245.13784.f6>
- [7] Maski, K., Trotti, L.M., Kotagal, S., Robert Auger, R., Swick, T.J., Rowley, J.A., *et al.* (2021) Treatment of Central Disorders of Hypersomnolence: An American Academy of Sleep Medicine Systematic Review, Meta-Analysis, and GRADE Assessment. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, **17**, 1895-1945. <https://doi.org/10.5664/jcsm.9326>
- [8] Biscarini, F., Barateau, L., Pizza, F., Plazzi, G. and Dauvilliers, Y. (2025) Present and Future of Central Disorders of Hypersomnolence. *Journal of Sleep Research*, **34**, e70118. <https://doi.org/10.1111/jsr.70118>
- [9] Trotti, L.M. (2020) Central Disorders of Hypersomnolence. *Continuum*, **26**, 890-907. <https://doi.org/10.1212/con.0000000000000883>
- [10] Maski, K., Trotti, L.M., Kotagal, S., Robert Auger, R., Rowley, J.A., Hashmi, S.D., *et al.* (2021) Treatment of Central Disorders of Hypersomnolence: An American Academy of Sleep Medicine Clinical Practice Guideline. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, **17**, 1881-1893. <https://doi.org/10.5664/jcsm.9328>
- [11] Spiegelhalder, K., Nissen, C. and Riemann, D. (2019) Clinical Sleep-Wake Disorders II: Focus on Insomnia and Circadian Rhythm Sleep Disorders. In: *Handbook of Experimental Pharmacology*, Springer, 261-276. [https://doi.org/10.1007/164\\_2017\\_40](https://doi.org/10.1007/164_2017_40)
- [12] Martinez, D. and Lenz, M.D.C.S. (2010) Circadian Rhythm Sleep Disorders. *The Indian Journal of Medical Research*, **131**, 141-149.
- [13] Gao, S., Ye, X., Zhang, L. and Zhang, Y. (2025) The Interplay among Circadian Rhythm, Pain and Affective Disorders and the Underlying Mechanisms. *Chinese Science Bulletin*, **70**, 3406-3416. <https://doi.org/10.1360/tb-2024-0746>
- [14] Sun, S.Y. and Chen, G.H. (2022) Treatment of Circadian Rhythm Sleep—Wake Disorders. *Current Neuropharmacology*, **20**, 1022-1034.
- [15] Fleetham, J.A. and Fleming, J.A.E. (2014) Parasomnias. *Canadian Medical Association Journal*, **186**, E273-E280. <https://doi.org/10.1503/cmaj.120808>
- [16] Bruni, O., DelRosso, L.M., Melegari, M.G. and Ferri, R. (2024) The Parasomnias. *Psychiatric Clinics of North America*, **47**, 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.psc.2023.06.009>
- [17] Sobreira-Neto, M.A., Stelzer, F.G., Gitai, L.L.G., Alves, R.C., Eckeli, A.L. and Schenck, C.H. (2023) REM Sleep Behavior Disorder: Update on Diagnosis and Management. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, **81**, 1179-1194. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1777111>
- [18] Merlino, G. and Gigli, G.L. (2012) Sleep-Related Movement Disorders. *Neurological Sciences*, **33**, 491-513. <https://doi.org/10.1007/s10072-011-0905-9>
- [19] Wong, S.G., Vorakunthada, Y., Lee-Iannotti, J., *et al.* (2023) Sleep-Related Motor Disorders. In: Younger, D.S., *Handbook of Clinical Neurology*, Elsevier, 383-397. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323988186000121>
- [20] Trotti, L.M. (2017) Restless Legs Syndrome and Sleep-Related Movement Disorders. *Continuum*, **23**, 1005-1016. <https://doi.org/10.1212/con.0000000000000488>
- [21] Khan, M. (2023) Restless Legs Syndrome and Other Common Sleep-Related Movement Disorders. *Continuum*, **29**, 1130-1148. <https://doi.org/10.1212/con.0000000000001269>
- [22] Lanza, G., Fisicaro, F., Cantone, M., Pennisi, M., Cosentino, F.I.I., Lanuzza, B., *et al.* (2023) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Primary Sleep Disorders. *Sleep Medicine Reviews*, **67**, Article 101735. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2022.101735>
- [23] Klomjai, W., Katz, R. and Lackmy-Vallée, A. (2015) Basic Principles of Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) and Repetitive TMS (rTMS). *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, **58**, 208-213. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2015.05.005>
- [24] Beynel, L., Appelbaum, L.G., Lubner, B., Crowell, C.A., Hilbig, S.A., Lim, W., *et al.* (2019) Effects of Online Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rtms) on Cognitive Processing: A Meta-Analysis and Recommendations for Future Studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **107**, 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.08.018>
- [25] Zheng, X., Zhao, Q., Fang, Q., Wang, R., Ma, B., Williams, J.P., *et al.* (2025) Feasibility of Rtms Combined with

- Dexmedetomidine in Chronic Insomnia Disorder. *Scientific Reports*, **15**, Article No: 33507. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17363-w>
- [26] Nardone, R., Sebastianelli, L., Versace, V., Brigo, F., Golaszewski, S., Pucks-Faes, E., *et al.* (2020) Effects of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Subjects with Sleep Disorders. *Sleep Medicine*, **71**, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.01.028>
- [27] Qi, S., Zhang, Y., Li, X., Sun, C., Ma, X., Li, S., *et al.* (2022) Improved Functional Organization in Patients with Primary Insomnia after Individually-Targeted Transcranial Magnetic Stimulation. *Frontiers in Neuroscience*, **16**, Article 859440. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.859440>
- [28] Krone, L.B., Fehér, K.D., Rivero, T. and Omlin, X. (2023) Brain Stimulation Techniques as Novel Treatment Options for Insomnia: A Systematic Review. *Journal of Sleep Research*, **32**, e13927. <https://doi.org/10.1111/jsr.13927>
- [29] Li, M., Zhu, Y., Zhang, X., Yang, H., Zhang, S., Liu, J., *et al.* (2022) 1Hz rTMS over Left DLPFC Rewired the Coordination with Hippocampus in Insomnia Patients: A Pilot Study. *Brain Stimulation*, **15**, 437-440. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2022.02.011>
- [30] Zhang, H., Huang, X., Wang, C. and Liang, K. (2022) Alteration of Gamma-Aminobutyric Acid in the Left Dorsolateral Prefrontal Cortex of Individuals with Chronic Insomnia: A Combined Transcranial Magnetic Stimulation-Magnetic Resonance Spectroscopy Study. *Sleep Medicine*, **92**, 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2022.03.003>
- [31] Feng, J., Zhang, Q., Zhang, C., Wen, Z. and Zhou, X. (2019) The Effect of Sequential Bilateral Low-Frequency rTMS over Dorsolateral Prefrontal Cortex on Serum Level of BDNF and GABA in Patients with Primary Insomnia. *Brain and Behavior*, **9**, e1206. <https://doi.org/10.1002/brb3.1206>
- [32] Song, P.H., Lin, H., Li, S.R., Wang, L., Liu, J.H., Li, N. and Wang, Y.P. (2019) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) Modulates Time-Varying Electroencephalography (EEG) Network in Primary Insomnia Patients: A TMS-EEG Study. *Sleep Medicine*, **56**, 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2019.01.007>
- [33] Zhu, L., Dang, G., Wu, W., Zhou, J., Shi, X., Su, X., *et al.* (2023) Functional Connectivity Changes Are Correlated with Sleep Improvement in Chronic Insomnia Patients after rTMS Treatment. *Frontiers in Neuroscience*, **17**, Article 1135995. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1135995>
- [34] Shi, X., Guo, Y., Zhu, L., Wu, W., Hordacre, B., Su, X., *et al.* (2021) Electroencephalographic Connectivity Predicts Clinical Response to Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Patients with Insomnia Disorder. *Sleep Medicine*, **88**, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2021.10.017>
- [35] Gossard, T.R., Trotti, L.M., Videnovic, A. and St Louis, E.K. (2021) Restless Legs Syndrome: Contemporary Diagnosis and Treatment. *Neurotherapeutics*, **18**, 140-155. <https://doi.org/10.1007/s13311-021-01019-4>
- [36] Nardone, R., Sebastianelli, L., Versace, V., Brigo, F., Golaszewski, S., Pucks-Faes, E., *et al.* (2020) Contribution of Transcranial Magnetic Stimulation in Restless Legs Syndrome: Pathophysiological Insights and Therapeutical Approaches. *Sleep Medicine*, **71**, 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2019.12.009>
- [37] Lanza, G., Cantone, M., Aricò, D., Lanuzza, B., Cosentino, F.I.I., Paci, D., *et al.* (2018) Clinical and Electrophysiological Impact of Repetitive Low-Frequency Transcranial Magnetic Stimulation on the Sensory-Motor Network in Patients with Restless Legs Syndrome. *Therapeutic Advances in Neurological Disorders*, **11**, Article 1756286418759973. <https://doi.org/10.1177/1756286418759973>
- [38] Lin, Y.C., Feng, Y., Zhan, S.Q., *et al.* (2015) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for the Treatment of Restless Legs Syndrome. *Chinese Medical Journal*, **128**, 1728-1731. <https://doi.org/10.4103/0366-6999.159344>
- [39] Afshari Saleh, L., Asadpour, H., Amini, M., Hojjat, S.K., Talaei, A. and Raji, H. (2025) Investigating of Mood and Sleep Disorders in Patients with Restless Legs Syndrome: A Cross-Sectional Study. *Jundishapur Journal of Chronic Disease Care*, **14**, e158353. <https://doi.org/10.5812/jjcdc-158353>
- [40] Rogić Vidaković, M., Šoda, J., Jerković, A., Benzon, B., Bakrač, K., Dužević, S., *et al.* (2020) Obstructive Sleep Apnea Syndrome: A Preliminary Navigated Transcranial Magnetic Stimulation Study. *Nature and Science of Sleep*, **12**, 563-574. <https://doi.org/10.2147/nss.s253281>
- [41] Lanza, G., Lanuzza, B., Aricò, D., Cantone, M., Cosentino, F.I.I., Pennisi, M., *et al.* (2015) Direct Comparison of Cortical Excitability to Transcranial Magnetic Stimulation in Obstructive Sleep Apnea Syndrome and Restless Legs Syndrome. *Sleep Medicine*, **16**, 138-142. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2014.08.016>
- [42] Das, A., Anupa, A.V. and Radhakrishnan, A. (2013) Reduced Plastic Brain Responses to Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Severe Obstructive Sleep Apnea Syndrome. *Sleep Medicine*, **14**, 636-640. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2013.04.008>
- [43] Shinde, A.B., Lerud, K.D., Munsch, F., Alsop, D.C. and Schlaug, G. (2021) Effects of tDCS Dose and Electrode Montage on Regional Cerebral Blood Flow and Motor Behavior. *NeuroImage*, **237**, Article 118144. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118144>
- [44] Hao, W., Liu, Y., Gao, Y., Gong, X. and Ning, Y. (2023) Transcranial Direct Current Stimulation for the Treatment of

- Post-Stroke Depression: A Systematic Review. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 955209. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.955209>
- [45] 刘洋, 钱苏, 孙文琳, 等. 经颅直流电刺激联合镜像疗法对脑卒中后上肢及手功能恢复的影响[J]. 哈尔滨医科大学学报, 2023, 57(5): 575-579.
- [46] Ebajemito, J.K., Furlan, L., Nissen, C. and Sterr, A. (2016) Application of Transcranial Direct Current Stimulation in Neurorehabilitation: The Modulatory Effect of Sleep. *Frontiers in Neurology*, **7**, Article 54. <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00054>
- [47] 张懿. 经颅直流电刺激在精神疾病治疗中应用的研究进展[J]. 临床合理用药杂志, 2020, 13(18): 178-180.
- [48] Lefaucheur, J., Antal, A., Ayache, S.S., Benninger, D.H., Brunelin, J., Cogiamanian, F., *et al.* (2017) Evidence-Based Guidelines on the Therapeutic Use of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS). *Clinical Neurophysiology*, **128**, 56-92. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.10.087>
- [49] Herrero Babiloni, A., Bellemare, A., Beetz, G., Vinet, S., Martel, M.O., Lavigne, G.J., *et al.* (2021) The Effects of Non-Invasive Brain Stimulation on Sleep Disturbances among Different Neurological and Neuropsychiatric Conditions: A Systematic Review. *Sleep Medicine Reviews*, **55**, Article 101381. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2020.101381>
- [50] Saebipour, M.R., Joghataei, M.T., Yoonessi, A., Sadeghniaat-Haghighi, K., Khalighinejad, N. and Khademi, S. (2015) Slow Oscillating Transcranial Direct Current Stimulation during Sleep Has a Sleep-Stabilizing Effect in Chronic Insomnia: A Pilot Study. *Journal of Sleep Research*, **24**, 518-525. <https://doi.org/10.1111/jsr.12301>
- [51] Frase, L., Selhausen, P., Krone, L., Tsodor, S., Jahn, F., Feige, B., *et al.* (2019) Differential Effects of Bifrontal tDCS on Arousal and Sleep Duration in Insomnia Patients and Healthy Controls. *Brain Stimulation*, **12**, 674-683. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.01.001>
- [52] Cavinato, M., Genna, C., Formaggio, E., Gregorio, C., Storti, S.F., Manganotti, P., *et al.* (2019) Behavioural and Electrophysiological Effects of tDCS to Prefrontal Cortex in Patients with Disorders of Consciousness. *Clinical Neurophysiology*, **130**, 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.10.018>
- [53] Zhou, Q., Yu, C., Yu, H., Zhang, Y., Liu, Z., Hu, Z., *et al.* (2020) The Effects of Repeated Transcranial Direct Current Stimulation on Sleep Quality and Depression Symptoms in Patients with Major Depression and Insomnia. *Sleep Medicine*, **70**, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.02.003>
- [54] 董强利, 欧阳萱, 谌红献, 等. 失眠物理治疗的研究进展[J]. 精神医学杂志, 2022, 35(6): 653-656.
- [55] Tortella, G., Sampaio-Junior, B., Moreno, M.L., Moffa, A.H., da Silva, A.F., Lafer, B., *et al.* (2021) Cognitive Outcomes of the Bipolar Depression Electrical Treatment Trial (BETTER): A Randomized, Double-Blind, Sham-Controlled Study. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, **271**, 93-100. <https://doi.org/10.1007/s00406-020-01121-2>
- [56] Minichino, A., Bersani, F.S., Spagnoli, F., Corrado, A., De Michele, F., Calò, W.K., *et al.* (2014) Prefronto-Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation Improves Sleep Quality in Euthymic Bipolar Patients: A Brief Report. *Behavioural Neurology*, **2014**, 1-3. <https://doi.org/10.1155/2014/876521>
- [57] Bersani, F.S., Minichino, A., Fattapposta, F., *et al.* (2015) Prefrontocerebellar Transcranial Direct Current Stimulation Increases Amplitude and Decreases Latency of P3b Component in Patients with Euthymic Bipolar Disorder. <https://doi.org/10.2147/NDT.S91625>
- [58] Gálvez, V., Alonzo, A., Martin, D., Mitchell, P.B., Sachdev, P. and Loo, C.K. (2011) Hypomania Induction in a Patient with Bipolar II Disorder by Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS). *The Journal of ECT*, **27**, 256-258. <https://doi.org/10.1097/yct.0b013e3182012b89>
- [59] 王玉明, 宫慧明, 张俊义, 等. 脊髓灰质炎后综合征的临床表现及诊断[J]. 中国康复理论与实践, 2017, 23(5): 501-504.
- [60] Acler, M., Bocci, T., Valenti, D., Turri, M., Priori, A. and Bertolasi, L. (2013) Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) for Sleep Disturbances and Fatigue in Patients with Post-Polio Syndrome. *Restorative Neurology and Neuroscience*, **31**, 661-668. <https://doi.org/10.3233/rnn-130321>
- [61] Bakhshayesh Eghbali, B., Ramezani, S., Sedaghat Herfeh, S., Emir Alavi, C., Najafi, K., Esmaceli Lipaci, P., *et al.* (2023) Transcranial Direct Current Stimulation Improves Sleep Quality in Patients with Insomnia after Traumatic Brain Injury. *Brain Injury*, **37**, 63-73. <https://doi.org/10.1080/02699052.2022.2145363>
- [62] 刘观秀, 孙伟铭, 董香丽, 等. 经颅直流电刺激患者不良反应的表现、原因与规避[J]. 精准医学杂志, 2023, 38(4): 373-376.
- [63] D'Urso, G., Toscano, E., Barone, A., Palermo, M., Dell'Osso, B., Di Lorenzo, G., *et al.* (2023) Transcranial Direct Current Stimulation for Bipolar Depression: Systematic Reviews of Clinical Evidence and Biological Underpinnings. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, **121**, Article 110672. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2022.110672>
- [64] Lanza, G. and Scalise, A. (2020) The Present and the Future of Transcranial Magnetic Stimulation in Restless Legs

- Syndrome. *Sleep Medicine*, **71**, 122-123. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.02.002>
- [65] Lanza, G. (2020) Repetitive TMS for Sleep Disorders: Are We Ready? *Sleep Medicine*, **71**, 111-112. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2020.03.001>
- [66] Zhou, Q., Liu, Z., Zhao, S., Yu, J., Zhou, D., Xu, W., *et al.* (2022) Transcranial Magnetic Stimulation Combined with Transcranial Direct Current Stimulation in Patients with Chronic Insomnia: A Case Report. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, **18**, 2871-2874. <https://doi.org/10.5664/jcsm.10272>