

重复经颅磁刺激治疗ADHD的原理与临床应用

黄雪竹, 徐 磊, 周 丽

西南康复医院发育行为科, 四川 成都

收稿日期: 2026年7月28日; 录用日期: 2026年8月22日; 发布日期: 2026年9月1日

摘 要

注意缺陷多动障碍是一种常见的神经发育障碍, 以注意缺陷和多动、冲动为主要临床特征, 分为注意缺陷型、多动-冲动型和混合型, 注意缺陷症状不仅损害其学业发展, 也会影响人际交往。注意缺陷多动障碍个体与注意力相关的神经网络存在异常, 注意缺陷症状具有神经生理学基础。但神经网络具有一定的可塑性, 通过干预能够有效调控和改善。重复经颅磁刺激能够无创地、穿透颅骨直接作用于神经网络, 对神经系统进行调控, 在注意缺陷多动障碍治疗中具有巨大的潜力。本文系统介绍注意缺陷多动障碍的神经生理学基础, 分析重复经颅磁刺激的原理和调控神经网络的生理性基础, 并综述重复经颅磁刺激治疗注意缺陷多动障碍的临床应用, 为注意缺陷多动障碍的临床治疗提供参考。

关键词

注意缺陷多动障碍, 重复经颅磁刺激, 注意力, 神经网络, 神经可塑性

Principle and Clinical Application of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in the Treatment of ADHD

Xuezhu Huang, Lei Xu, Li Zhou

Department of Developmental Behavior, Southwest Rehabilitation Hospital, Chengdu Sichuan

Received: July 28, 2026; accepted: August 22, 2026; published: September 1, 2026

Abstract

Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) is a common neurodevelopmental disorder characterized by attention deficit, hyperactivity and impulsivity. It can be divided into attention deficit type, hyperactivity impulsivity type and mixed type. Attention deficit symptoms not only damage their academic development, but also affect their interpersonal communication. Attention deficit

hyperactivity disorder individuals have abnormal neural networks related to attention, and the symptoms of attention deficit hyperactivity disorder have neurophysiological basis. However, neural network has certain plasticity, which can be effectively regulated and improved through intervention. Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) has great potential in the treatment of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) because it can directly act on the neural network and regulate the nervous system. This paper systematically introduces the neurophysiological basis of attention deficit hyperactivity disorder, analyzes the principle of repetitive transcranial magnetic stimulation and the physiological basis of regulating neural network, and summarizes the clinical application of repetitive transcranial magnetic stimulation in the treatment of attention deficit hyperactivity disorder, so as to provide reference for the clinical treatment of attention deficit hyperactivity disorder.

Keywords

Attention Deficit Hyperactivity Disorder, Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, Attention, Neural Network, Neural Plasticity

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. 引言

注意缺陷多动障碍(Attention Deficit Hyperactivity Disorder, ADHD)是一种起病于儿童期的神经发育障碍, 以与年龄不相符的注意力不集中、多动以及冲动为主要特征, 并对其学业表现、社会交往和成年后的职业表现都具有一定的负面影响[1]。目前针对 ADHD 的传统干预手段主要依赖于药物治疗, 但部分患儿对药物治疗敏感度不高, 且长期用药仍会伴随副作用, 导致患儿的治疗依从性降低[2]。近年来, 重复经颅磁刺激(Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS)作为一种非侵入性的物理神经调控治疗技术, 在临床和科研领域得到众多学者和医生的广泛关注[3]。该技术利用脉冲磁场无创地穿透颅骨, 在皮层组织中引起感应电流, 进而调节特定脑区神经元的兴奋性及电生理活性[1]。rTMS 在调节大脑功能网络连接和引导神经可塑性方面具有独特优势, 不仅在精神障碍中得到了广泛应用, 也逐步被视为改善 ADHD 核心症状、优化注意力回路的潜在物理治疗手段[4]。本文根据注意力的神经生理学基础, 分析 rTMS 调控注意网络的原理与分子细胞机制, 并综述近年来 rTMS 治疗 ADHD 的临床试验研究成果, 为临床优化治疗方案提供借鉴与参考。

2. 注意力调控原理

2.1. 注意力的神经基础

注意力是个体维持正常认知活动、过滤干扰信息的核心机制, 其正常调控依赖于大脑中高度协调的神经网络与皮层下结构的双向作用[5]。认知神经科学研究表明, 注意力并不是由单一的脑区所主导, 而是由多个脑区共同构成的功能性网络协同运行的结果[6]。目前学术界普遍认同, 调控注意力的核心脑区包括前额叶皮层(Prefrontal Cortex, PFC)、前扣带回皮层(Anterior Cingulate Cortex, ACC)、后顶叶皮层(Posterior Parietal Cortex, PPC)以及皮层下的丘脑结构, 背外侧前额叶皮层(DLPFC)是执行控制与自上而下目标导向注意力调控的主要区域。

这些脑区在功能上被整合进额顶控制网络(Frontoparietal Network, FPN)、背侧注意网络(Dorsal

Attention Network, DAN)以及腹侧注意网络(Ventral Attention Network, VAN) [7]。DAN 主要参与自上而下的空间定向和保持警觉过程,而 VAN 则在检测新刺激和突发威胁等自下而上的注意力转移中发挥作用。皮层下的丘脑作为感觉信息输入大脑皮层的关键中继站,也起到了重要的“感觉过滤”作用,丘脑网状核与前额叶皮层之间的环路连接能有效调控感觉信号的上传,保护皮层过度负荷[8]。ADHD 个体的注意力调控网络普遍存在功能连接度异常或活动性降低,当个体在执行认知控制任务时,默认模式网络(DMN)往往不能被有效抑制,进而表现出内部念头增加、易受到外界刺激干扰等注意力受损症状[9]。

2.2. 神经可塑性基础

神经可塑性(Neuroplasticity)是指大脑建立、增强、虚弱甚至断开神经元之间物理连接的动态调整能力,这是大脑为适应各类环境及行为刺激而改变自身功能与结构的方式[10]。日常认知活动中,注意力的集中度以及对任务的适应性很大程度上依赖于突触水平的反应敏捷度,当神经元受到反复激活时,突触传递的有效性会产生持续增强或削弱的变化,这一过程常表现为长时程增强(Long-Term Potentiation, LTP)或长时程抑制(Long-Term Depression, LTD) [11]。在分子层面,突触的可塑性改变主要与 N-甲基-D-天冬氨酸(NMDA)受体的激活、胞内钙离子浓度和突触后膜 α -氨基-3-羟基-5-甲基-4-异恶唑丙酸(AMPA)受体数量的动态变化密切相关。

除了突触层面的神经可塑性外,还表现为更宏观的脑结构连通性优化,包括星形胶质细胞微环境的调节以及白质轴突中髓鞘包绕的适应性增厚,从而提高信息在神经通路中的传导电速度[12]。在正常认知系统内,主动进行注意力高度集中的任务训练能够促进特定前额叶-顶叶环路突触密度的增加,继而巩固注意网络的传输效率。而 ADHD 大脑的可塑性动态调节机制可能存在一定的延迟或障碍,导致相关皮层厚度发育滞后、突触连通性减弱,使自上而下的注意力选择显得较为困难[13]。物理疗法如外源性重复电磁刺激,可通过诱导目标脑区产生 LTP 样神经活动,重新激活受损的神经调控路径,增强神经连通状态并修复注意回路,促进特定脑区(如 DLPFC)的神经可塑性重建。

3. 重复经颅磁刺激原理

3.1. 重复经颅磁刺激影响大脑活动原理

重复经颅磁刺激(rTMS)技术主要基于法拉第电磁感应定律,在无创的前提下直接调控皮层神经元的兴奋状态。rTMS 治疗过程中,特制的磁刺激线圈紧贴患者头皮放置,线圈内部通过的高频交变电流产生高度局域化、强度可动态调整的时变磁场,在靶皮层电解质液内感应出次级电场,并引起皮层浅表神经元轴突膜电位的极化改变,一旦达到阈值便会触发动作电位,进而实现对胞体放电行为的人为干预[14]。以往研究表明,rTMS 干预的效应强烈依赖于刺激脉冲的输出频率,高频刺激多可诱发去极化占优势的神元放电行为,提升受刺激脑区的皮层兴奋性,而低频刺激则会降低细胞膜去极化几率,表现出局部皮层活动受限和兴奋性抑制特征。

3.2. 经颅磁刺激在注意力研究中的应用

注意力神经系统研究中,传统的脑影像技术虽然能够揭示注意力加工过程中活化区域的空间分布,但无法明确这些脑区与任务表现之间的因果关系。TMS 具有独特的“虚拟损毁”与“虚拟增强”功能,可有针对性地作用于特定脑区,观察其对注意力表现的影响,进行因果关系检验[3]。有研究发现在内源性注意力选择过程中,对额叶目标区进行单脉冲或重复脉冲磁干预可引起注意行为的中断或偏向,而作用于枕叶视觉区等区域时,个体则未呈现相近的注意受损表现,表明前额叶在内源性策略分配上具重要的作用[15]。

Yeager 等人利用单体注意力网络特征分析方法,探究磁刺激干预在不同人脑特异连通图谱下对注意力提升的作用机制,研究检验了定制化 TMS 靶点在优化个体网络内部整合性能上的重要价值[16]。利用同步联用技术(TMS-fMRI/EEG)检测物理刺激对全脑网络的影响发现,在向主要皮层投射节点(如 DLPFC)施加脉冲电场后,局灶产生的电生理激动能够沿突触长程纤维向远端输出,从而影响到默认模式网络(DMN)与背腹侧注意控制区域之间的协调关系[17]。以往相关研究表明,TMS 的应用范围不仅限于直接受到线圈照射的表层神经组织,其主要是通过激活长程白质纤维来实现对全脑大尺度功能网络状态的主动转换,从而调控注意力状态。

3.3. 分子与细胞水平机制

rTMS 能够诱发长期维持的脑功能增强,主要源于细胞和分子层面变化。当重复电磁信号作用于神经组织时,可引起突触前膜神经递质释放的改变,最主要表现为兴奋性谷氨酸与抑制性 GABA 递质水平的平衡调控[18]。在高频磁脉冲影响下,谷氨酸在突触间隙的大量积聚能促发突触后膜 NMDA 受体的开放,进而促成外源钙离子向胞浆空间的内流。钙离子瞬时大流量积压,是激活一系列胞内蛋白激酶通路(如 ERK 磷酸化以及 mTOR 激活)的关键节点,可有效调控转录活性并启动后期特定蛋白的主动转录与翻译[19]。这一过程极大地促进了脑源性神经营养因子(BDNF)等神经营养分子的释放,进而为树突棘的结构发育和新生突触的维持提供强劲的基础[20]。

微观水平下的 rTMS 除了调节经典突触元件外,还能影响星形胶质细胞以及小胶质细胞的生理活度。Clarke 等人开展的体外细胞电磁刺激实验表明,一定强度的脉冲刺激能够下调星形胶质细胞中大量与钙信号激惹、促炎因子分泌相关的基因表达,从而限制局部异常的自身免疫应答,防止由微环境过度激活带来的非器质性损伤[21]。在机体经历神经发育缺陷或病理应激损伤时,磁刺激通过舒缓小胶质细胞参与的系统性退行性免疫反应,对于稳定微型神经回路的长期运行而言具备重要维护意义[22]。以往研究在微观层面上也检验了 rTMS 长期延续改善脑组织的显著效果。

4. 经颅磁刺激治疗 ADHD 的临床应用

以往众多学者和临床医生已将 rTMS 应用于 ADHD 的治疗,并积累了众多实证证据[4] [23]。针对 ADHD 儿童的大脑电生理与神经递质特点,Kahl 等(2022)通过评估 ADHD 患儿和典型发育儿童的皮层运动图谱及神经代谢情况,发现在 ADHD 儿童的运动皮层各关键节点中普遍存在代谢物分泌及运动表型的明显偏离,研究解释了 ADHD 儿童电生理表型紊乱的成因,也为磁刺激个性化校准提供了电生理证据[24]。Weaver 等在试验中对青少年 ADHD 个体进行重复经颅磁刺激治疗,研究表明 ADHD 临床症状有所改善,而研究关注的严重不良安全事件发生率为零,证明了在青少年群体身上开展 rTMS 治疗的可行性及安全性[25]。一项包含 189 名 ADHD 个体的随机对照临床试验的 Meta 分析发现,接受 rTMS 治疗的个体在行为坚持意愿、警觉注意维持及整体的认知信息处理效率上显著优于对照组,安全性指标也优于传统药物[26]。

有学者也开始采用深部经颅磁刺激(deep TMS, dTMS)技术在成人 ADHD 中进行试验,Bleich-Cohen 等人采用深部经颅磁刺激进行干预和功能磁共振成像(fMRI)评估干预变化,研究发现,深部经颅磁刺激仪刺激后,成人 ADHD 的前额叶与其协同功能节点网络之间的局部与长程连接得到增强,也与临床症状的好转紧密相关性[27]。直观地展现了物理神经干预在调控病理性大脑内部“病理形态连接”中的潜力。

5. 小结

重复经颅磁刺激(rTMS)以法拉第感应电流为核心动力,直接作用于神经系统,提升注意力相关的神

经网络连接与协调。以往众多临床试验研究证明, rTMS 单独或联合应用能有效改善不同年龄段 ADHD 个体的临床症状和优化神经协调, 其效果要优于单一用药临床方案[2] [3]。

目前将 rTMS 治疗广泛应用于 ADHD 常规治疗中仍存在一定的挑战, 如面对低年龄发育期大脑独特的脑血流代谢情况, 采用 rTMS 刺激前额叶要慎重调试避免引发惊厥风险, 以及各项临床研究对治疗刺激靶点、频率和频次仍存在较大差异。未来研究可尝试结合前置性多模态成像, 例如基于 fMRI 及磁共振波谱 MRS 手段寻找精准刺激坐标等技术[28], 探究更为安全与准确的 rTMS 治疗方案, 为 rTMS 治疗广泛应用于临床中提供实证支持与参考。

参考文献

- [1] 中华医学会儿科学分会发育行为学组. 注意缺陷多动障碍早期识别, 规范诊断和治疗的儿科专家共识[J]. 中华儿科杂志, 2020, 58(3): 188-193.
- [2] Cao, P., Xing, J., Cao, Y., Cheng, Q., Sun, X., Kang, Q., *et al.* (2018) Clinical Effects of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Combined with Atomoxetine in the Treatment of Attention-Deficit Hyperactivity Disorder. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, **14**, 3231-3240. <https://doi.org/10.2147/ndt.s182527>
- [3] Yen, C., Lin, C.L. and Chiang, M.C. (2023) Exploring the Frontiers of Neuroimaging: A Review of Recent Advances in Understanding Brain Functioning and Disorders. *Life*, **13**, Article 1472. <https://doi.org/10.3390/life13071472>
- [4] Rubia, K., Westwood, S., Aggensteiner, P.M., *et al.* (2021) Neurotherapeutics for Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD): A Review. *Cells*, **10**, Article 2156. <https://doi.org/10.3390/cells10082156>
- [5] Oberauer, K. (2019) Working Memory and Attention—A Conceptual Analysis and Review. *Journal of Cognition*, **2**, Article 36. <https://doi.org/10.5334/joc.58>
- [6] Amso, D. and Scerif, G. (2015) The Attentive Brain: Insights from Developmental Cognitive Neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, **16**, 606-619. <https://doi.org/10.1038/nrn4025>
- [7] Draheim, C., Pak, R., Draheim, A.A. and Engle, R.W. (2022) The Role of Attention Control in Complex Real-World Tasks. *Psychonomic Bulletin & Review*, **29**, 1143-1197. <https://doi.org/10.3758/s13423-021-02052-2>
- [8] Phillips, J.M., Kambi, N.A., Redinbaugh, M.J., Mohanta, S. and Saalman, Y.B. (2021) Disentangling the Influences of Multiple Thalamic Nuclei on Prefrontal Cortex and Cognitive Control. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **128**, 487-510. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.06.042>
- [9] Osborne, J.B., Zhang, H., Carlson, M., Shah, P. and Jonides, J. (2023) The Association between Different Sources of Distraction and Symptoms of Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Frontiers in Psychiatry*, **14**, Article 1173989. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2023.1173989>
- [10] Diniz, C.R.A.F. and Crestani, A.P. (2022) The Times They Are A-Changin’: A Proposal on How Brain Flexibility Goes beyond the Obvious to Include the Concepts of “Upward” and “Downward” to Neuroplasticity. *Molecular Psychiatry*, **28**, 977-992. <https://doi.org/10.1038/s41380-022-01931-x>
- [11] Ramirez, A. and Arbuckle, M.R. (2016) Synaptic Plasticity: The Role of Learning and Unlearning in Addiction and beyond. *Biological Psychiatry*, **80**, e73-e75. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2016.09.002>
- [12] Kricheldorf, J., Göke, K., Kiebs, M., Kasten, F.H., Herrmann, C.S., Witt, K., *et al.* (2022) Evidence of Neuroplastic Changes after Transcranial Magnetic, Electric, and Deep Brain Stimulation. *Brain Sciences*, **12**, Article 929. <https://doi.org/10.3390/brainsci12070929>
- [13] Yen, C., Valentine, E.P. and Chiang, M.C. (2024) The Use of Transcranial Magnetic Stimulation in Attention Optimization Research: A Review from Basic Theory to Findings in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder and Depression. *Life*, **14**, Article 329. <https://doi.org/10.3390/life14030329>
- [14] Siebner, H.R., Funke, K., Abera, A.S., Antal, A., Bestmann, S., Chen, R., *et al.* (2022) Transcranial Magnetic Stimulation of the Brain: What Is Stimulated—A Consensus and Critical Position Paper. *Clinical Neurophysiology*, **140**, 59-97. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.04.022>
- [15] Fernández, A., Hanning, N.M. and Carrasco, M. (2023) Transcranial Magnetic Stimulation to Frontal but Not Occipital Cortex Disrupts Endogenous Attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **120**, e2219635120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2219635120>
- [16] Yeager, B.E., Dougher, C.C., Cook, R.H. and Medaglia, J.D. (2021) The Role of Transcranial Magnetic Stimulation in Understanding Attention-Related Networks in Single Subjects. *Current Research in Neurobiology*, **2**, Article 100017. <https://doi.org/10.1016/j.crneur.2021.100017>
- [17] Jung, J.Y., Bungert, A., Bowtell, R. and Jackson, S.R. (2020) Modulating Brain Networks with Transcranial Magnetic

- Stimulation over the Primary Motor Cortex: A Concurrent TMS/fMRI Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, **14**, Article 31. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00031>
- [18] Li, C.T., Huang, Y.Z., Bai, Y.M., *et al.* (2019) Critical Role of Glutamatergic and Gabaergic Neurotransmission in the Central Mechanisms of Theta-Burst Stimulation. *Human Brain Mapping*, **40**, 2001-2009. <https://doi.org/10.1002/hbm.24485>
- [19] Wang, X., Zhou, X., Bao, J., Chen, Z., Tang, J., Gong, X., *et al.* (2019) High-Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Mediates Autophagy Flux in Human Bone Mesenchymal Stromal Cells via NMDA Receptor-Ca²⁺-Extracellular Signal-Regulated Kinase-Mammalian Target of Rapamycin Signaling. *Frontiers in Neuroscience*, **13**, Article 1225. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01225>
- [20] Thomson, A.C., Kenis, G., Tielens, S., de Graaf, T.A., Schuhmann, T., Rutten, B.P.F., *et al.* (2020) Transcranial Magnetic Stimulation-Induced Plasticity Mechanisms: TMS-Related Gene Expression and Morphology Changes in a Human Neuron-Like Cell Model. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, **13**, Article 528396. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2020.528396>
- [21] Clarke, D., Beros, J., Bates, K.A., Harvey, A.R., Tang, A.D. and Rodger, J. (2021) Low Intensity Repetitive Magnetic Stimulation Reduces Expression of Genes Related to Inflammation and Calcium Signalling in Cultured Mouse Cortical Astrocytes. *Brain Stimulation*, **14**, 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2020.12.007>
- [22] Zuo, C., Cao, H., Feng, F., Li, G., Huang, Y., Zhu, L., *et al.* (2022) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Exerts Anti-Inflammatory Effects via Modulating Glial Activation in Mice with Chronic Unpredictable Mild Stress-Induced Depression. *International Immunopharmacology*, **109**, Article 108788. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2022.108788>
- [23] Memon, A.M. (2021) Transcranial Magnetic Stimulation in Treatment of Adolescent Attention Deficit/Hyperactivity Disorder: A Narrative Review of Literature. *Innovations in Clinical Neuroscience*, **18**, 43-46.
- [24] Kahl, C.K., Swansburg, R., Hai, T., Wrightson, J.G., Bell, T., Lemay, J., *et al.* (2022) Differences in Neurometabolites and Transcranial Magnetic Stimulation Motor Maps in Children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Journal of Psychiatry and Neuroscience*, **47**, E239-E249. <https://doi.org/10.1503/jpn.210186>
- [25] Weaver, L., Rostain, A.L., Mace, W., Akhtar, U., Moss, E. and O'Reardon, J.P. (2012) Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) in the Treatment of Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder in Adolescents and Young Adults: A Pilot Study. *The Journal of ECT*, **28**, 98-103. <https://doi.org/10.1097/yct.0b013e31824532c8>
- [26] Chen, Y.H., Liang, S.C., Sun, C.K., *et al.* (2023) A Meta-Analysis on the Therapeutic Efficacy of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Cognitive Functions in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorders. *BMC Psychiatry*, **23**, Article No. 756. <https://doi.org/10.1186/s12888-023-05261-2>
- [27] Bleich-Cohen, M., Gurevitch, G., Carmi, N., Medvedovsky, M., Bregman, N., Nevler, N., *et al.* (2021) A Functional Magnetic Resonance Imaging Investigation of Prefrontal Cortex Deep Transcranial Magnetic Stimulation Efficacy in Adults with Attention Deficit/Hyperactive Disorder: A Double Blind, Randomized Clinical Trial. *NeuroImage: Clinical*, **30**, Article 102670. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2021.102670>
- [28] Firouzabadi, F.D., Ramezanpour, S., Firouzabadi, M.D., Yousem, I.J., Puts, N.A.J. and Yousem, D.M. (2022) Neuroimaging in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: Recent Advances. *American Journal of Roentgenology*, **218**, 321-332. <https://doi.org/10.2214/ajr.21.26316>