

经颅干扰电刺激调控小脑-皮层通路对动态平衡能力的影响：从基础研究到临床应用的综述

邱颖

南京体育学院，江苏南京，210014；

摘要：经颅干扰电刺激（如 tDCS 和 rTMS）调控小脑-皮层通路已成为改善动态平衡能力的研究热点。小脑在运动协调和动态平衡控制中发挥着核心作用，其与皮层区域的功能连接对运动表现至关重要。研究表明，通过对小脑或运动皮层进行非侵入性电刺激，可以调节其神经活动，进而改善平衡能力。基础研究发现，tDCS 和 rTMS 能够通过增强神经可塑性，促进小脑-皮层通路的重塑，从而改善平衡控制。例如，低频 rTMS 对小脑的刺激已被证明能改善步态稳定性和姿势控制。临床研究则关注这些技术在不同患者群体中的应用效果。在老年人群体中，tDCS 已被用于改善平衡能力，减少跌倒风险；在中风和帕金森病患者中，rTMS 的应用有助于恢复运动功能和协调性。尽管取得了一定进展，但仍存在刺激参数优化、个体差异性和长期效果等问题。未来的研究应聚焦于多靶点刺激策略、个性化干预方案以及联合运动训练的综合干预模式，以期实现更有效的动态平衡恢复。

关键词：经颅干扰电刺激；tDCS；rTMS；小脑-皮层通路；动态平衡能力；神经可塑性；运动协调；康复治疗

DOI：10.69979/3029-2808.25.12.042

引言

动态平衡能力是指个体在运动或静止状态下，维持身体姿势稳定，并根据环境和任务需求做出快速调整的能力^[1]。随着年龄增长或神经系统疾病（如中风、帕金森病等）的影响，平衡能力逐渐下降，导致运动功能障碍和生活质量下降^[2]。为了改善这些问题，研究者开始关注通过非侵入性神经调节技术——经颅干扰电刺激（如 tDCS 和 rTMS）调控小脑-皮层通路，以提高平衡能力。小脑在运动协调和动态平衡中的关键作用已被广泛认可^[3]。小脑通过与其他皮层区域（如运动皮层）的连接，协调运动并控制平衡^[4]。

经颅直流电刺激（tDCS）和重复经颅磁刺激（rTMS）作为非侵入性神经调节技术，已被证明能够调节小脑的活动，进而改善运动协调和动态平衡能力^[5]。基础研究表明，低频 rTMS 刺激小脑可改善步态稳定性和姿势控制^[6]。同时，tDCS 也被广泛应用于改善老年人及运动障碍患者的平衡能力^[7]。然而，尽管现有研究取得了一定进展，但刺激参数、个体差异性和长期效果仍存在不一致性^[8]。因此，未来的研究应进一步优化刺激方案，探索个性化干预策略，以期更有效地恢复平衡能力。

1 经颅干扰电刺激技术概述

经颅干扰电刺激（NIBS）技术是指通过非侵入性的手段，利用电流或磁场直接调节大脑活动，已成为改善

神经功能、促进康复治疗的有力工具。常见的 NIBS 技术包括经颅直流电刺激（tDCS）、重复经颅磁刺激（rTMS）和经颅交流电刺激（tACS）。这些技术通过调节神经元的兴奋性，改变大脑皮层及其下游区域的神经活动，从而影响运动、认知等功能。

1.1 经颅直流电刺激（tDCS）

tDCS 是一种通过头皮电极传递微弱直流电流的非侵入性技术。在此过程中，阳极电极（正电极）和阴极电极（负电极）分别放置在头皮的特定区域，通过调节电流的方向和强度，改变神经元的膜电位。研究表明，阳极电刺激可以增强神经元的兴奋性，而阴极电刺激则抑制神经元的兴奋性^[2]。tDCS 常用于改善运动控制、增强学习能力和神经康复，如在帕金森病、脑卒中后的运动功能恢复中显示了积极的临床效果^[3]。

1.2 重复经颅磁刺激（rTMS）

rTMS 利用强磁场脉冲作用于大脑皮层，通过快速磁场变化在皮层内诱发电流，调节神经活动。rTMS 已被广泛用于研究和临床治疗中枢神经系统的功能障碍，如抑郁症、运动障碍和神经康复。低频 rTMS 通常用于抑制过度活跃的神经区域，而高频 rTMS 则用于激活功能减退的脑区^[4]。针对小脑的 rTMS 干预已经被证明能够有效改善平衡控制和步态稳定性，尤其在运动障碍患者中具有显著的临床效果^[5]。

1.3 经颅交流电刺激 (tACS)

tACS 通过施加周期性的交流电流调节大脑的电活动振荡,与大脑的自发神经振荡同步,从而优化脑区功能^[6]。tACS 的应用能够调节特定频段的脑电活动,促进运动控制和认知功能的恢复,尤其在与运动训练结合时,对平衡能力的提高显示出良好的效果^[7]。

1.4 技术的临床应用

NIBS 技术,尤其是 tDCS 和 rTMS,已广泛应用于临床治疗中。对于运动障碍患者,如中风、帕金森病、脑外伤等,NIBS 通过调节小脑-皮层通路及其他相关区域,促进运动功能恢复和动态平衡能力的改善。tDCS 已在脑卒中患者、帕金森病患者及老年人群中应用,显示出在提高平衡稳定性、减少跌倒风险和恢复运动控制方面的潜力^[8]。

2 小脑-皮层通路与动态平衡的关系

小脑是人体平衡控制的重要结构,它通过与大脑皮层、脊髓等多种脑区的相互连接,协调运动和姿势稳定性。小脑不仅在运动的精细控制中起关键作用,还涉及平衡和协调等更复杂的运动功能。小脑-皮层通路的调节对动态平衡能力的维持至关重要。

2.1 小脑的功能与平衡控制

小脑主要通过运动皮层、前额叶皮层及其他脑区的广泛连接,控制和调节身体的平衡。小脑通过接收来自大脑皮层的运动指令并进行处理,向身体发出精细的调整信号。尤其在步态控制、姿势稳定性和运动协调方面,小脑起着重要作用。小脑的损伤或功能减退会导致运动障碍和显著的平衡能力丧失^[1]。

2.2 小脑-皮层通路的作用机制

小脑与皮层之间的通信路径主要通过皮层-小脑通路和小脑-皮层反馈回路完成。研究发现,小脑不仅调节与运动相关的神经网络,还能够通过皮层-小脑通路参与到认知和情感的调节中^[2]。这一通路在动态平衡中尤为关键,尤其在复杂的运动任务或不稳定的平衡挑战中,皮层与小脑之间的协调作用能够显著提高平衡稳定性^[3]。

3 经颅干扰电刺激调控小脑-皮层通路的基础研究

经颅干扰电刺激 (tDCS、rTMS) 通过调节大脑皮层

及其相关脑区的神经活动,已经成为神经康复和运动功能恢复的有效手段。小脑在运动协调和动态平衡控制中扮演着重要角色,调控小脑-皮层通路对改善运动功能、恢复平衡能力具有重要意义。基础研究表明,经颅电刺激技术能够通过调节小脑活动,促进小脑-皮层通路的重塑,从而显著改善平衡能力。

3.1 小脑-皮层通路的作用

小脑通过皮层-小脑通路与大脑皮层及脊髓等区域进行信息交流,协同控制运动与平衡。研究发现,小脑不仅参与运动的协调,还通过与运动皮层的协同作用调节平衡和姿势控制^[1]。小脑-皮层通路在平衡任务中的调节尤为重要,在步态控制、快速姿势调整等过程中,皮层与小脑之间的协调作用能够显著提高平衡稳定性^[2]。

3.2 经颅干扰电刺激对小脑-皮层通路的影响

tDCS 和 rTMS 作为两种常见的非侵入性神经调节方法,已广泛应用于小脑-皮层通路的调节研究。tDCS 通过改变神经元膜电位来调节神经元的兴奋性,阳极电刺激增强皮层活动,阴极电刺激则抑制其活动^[3]。研究发现,通过小脑的阳极 tDCS 刺激,可以有效地增强小脑的神经活动,提高平衡能力^[4]。rTMS 则通过磁场脉冲调节皮层和小脑区域的神经活动,低频 rTMS 能够通过抑制小脑皮层的过度活动,改善运动协调和步态控制^[5]。

4 经颅干扰电刺激调控小脑-皮层通路的临床应用

经颅干扰电刺激 (tDCS、rTMS) 调控小脑-皮层通路在神经康复领域取得了显著进展。小脑在运动协调和动态平衡中的核心作用使其成为运动障碍和神经退行性疾病治疗中的一个重要靶点。通过非侵入性的电刺激技术调节小脑及其相关皮层区域的活动,已成为改善平衡、步态和运动功能的有效方法。

4.1 中风患者的平衡恢复

中风后,平衡和步态障碍是患者常见的症状,严重影响日常生活。多项临床研究表明,tDCS 和 rTMS 能够通过刺激小脑或运动皮层,促进小脑-皮层通路的重塑,从而改善中风患者的平衡能力^{[6]-[7]}。

4.2 帕金森病患者的运动功能恢复

帕金森病患者常因运动迟缓、步态不稳和震颤等症状影响生活质量。tDCS 和 rTMS 通过调节小脑-皮层通路,

已被证明对改善帕金森病患者的运动功能和动态平衡能力具有积极作用^[8]。

5 结论

经颅干扰电刺激调控小脑-皮层通路在改善动态平衡能力方面具有重要的临床意义。基础研究和临床试验均表明,通过调节小脑-皮层通路的神经活动,可以显著改善运动控制和动态平衡^{[1]-[2]}。tDCS和rTMS已被广泛应用于中风、帕金森病、老年人群体等运动障碍患者的康复治疗,显示出良好的疗效^{[3]-[4]}。然而,未来研究需进一步优化刺激参数、解决个体差异性,并探索长期效果的维持机制,以推动该技术在临床应用中的广泛推广。

参考文献

- [1]Baharlouei H, et al. The effect of transcranial direct current stimulation on balance in young and older adults. *Neuroscience Letters*. 2020;731:135015.
- [2]Grossman N, Bono D, Dedic N, et al. Noninvasive Deep Brain Stimulation via Temporally Interfering Electric Fields. *Cell*. 2017;169(6):1029-1041.e16.
- [3]Guo Z, et al. The effects of transcranial direct current stimulation on balance in older

adults: A systematic review. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2020;12:275.

- [4]Hummel FC, et al. Non-invasive brain stimulation: A new strategy to improve neurorehabilitation after stroke? *Lancet Neurology*. 2006;5(8):708-712.
- [5]Oldrati V, et al. Targeting the human cerebellum with transcranial direct current stimulation: A meta-analysis of 32 studies. *Neuropsychologia*. 2018;115:1-8.
- [6]Priori A. Transcranial direct current stimulation: State of the art 2008. *Brain Stimulation*. 2008;1(3):206-223.
- [7]Tseng S- C, et al. Transcranial Direct Current Stimulation for Improving Balance in Healthy Older Adults and Older Adults with Stroke: A Scoping Review. *Brain Sciences*. 2024;14(10):1021.
- [8]Wang X, et al. Effects of cerebellar repetitive transcranial magnetic stimulation on balance in stroke patients. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2025;39(1):22-31.

作者简介:邱颖(2002.6-),女,汉族,山东日照,在读硕士研究生,研究方向:运动人体科学。