·探索脑机接口与神经调控技术的应用·

时域干涉刺激在意识障碍中的机制研究与临床证据综述

茆梓恒[1] 李晨曦[1] 杨心怡[2] 张艳正[1] 陈树耿[3*]

(1.上海市誉华康复医院康复医学科，上海 201700；2.上海中医药大学康复医学院，上海 201203；
3.复旦大学附属华山医院康复医学科，上海 200040)

【摘要】 目的 系统综述时域干涉刺激(temporal interference stimulation, TI)的神经调控机制及其在意识障碍(disorders of consciousness, DOC)中的应用潜力，为其临床转化提供理论依据。**方法** 检索PubMed、EBSCOhost及Google Scholar数据库中近年相关文献，围绕TI的物理学原理、神经电生理机制及其在动物实验与临床研究中的应用进展进行归纳分析，并对相关研究进行定性整合。**结果** 现有研究表明，TI可通过高频电流干涉产生低频包络信号，实现对深部脑结构的选择性调控，其主要作用机制包括调节丘脑–皮层网络、影响神经振荡活动及调控神经递质系统。动物实验及初步人体研究证实，TI已在健康人中实现对深部脑区的非侵入性调控，但在DOC患者中的临床疗效尚待正在进行的临床试验验证。目前相关证据仍主要来源于动物实验及小样本研究，缺乏统一刺激参数及高质量临床试验证据。**结论** TI可实现对深部脑区的非侵入性调控，针对DOC患者的促醒康复具有潜在的研究价值，但其临床疗效及安全性仍需通过大规模随机对照研究进一步验证。

【关键词】 时域干涉刺激；意识障碍；神经调控；丘脑–皮层网络；微小意识状态

【中图分类号】 R493 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202604006

Mechanisms and clinical evidence of temporal interference stimulation in disorders of consciousness: a review

Mao Ziheng[1], Li Chenxi[1], Yang Xinyi[2], Zhang Yanzheng[1], Chen Shugeng[3]*

(1. Department of Rehabilitation Medicine, Shanghai Yuhua Rehabilitation Hospital, Shanghai 201700, China; 2. School of Rehabilitation Medicine, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China; 3. Department of Rehabilitation Medicine, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China)

【Abstract】 Objective To systematically review the mechanisms of temporal interference stimulation (TI) and summarize its current research progress in disorders of consciousness (DOC). **Methods** A comprehensive literature search was conducted in PubMed, EBSCOhost, and Google Scholar to identify studies related to TI stimulation. Both animal experiments and human studies were included. The neurophysiological mechanisms and clinical evidence of TI were analyzed through a narrative review and qualitative synthesis. **Results** Current evidence suggests that TI can selectively modulate deep brain structures by generating amplitude–modulated electric fields within brain tissue. Its neuromodulatory effects are primarily associated with the regulation of thalamocortical networks, neural oscillatory activity, and neurotransmitter systems. Animal experiments and preliminary human studies have indicated that TI can achieve non–invasive modulation of deep brain regions in healthy individuals; however, its clinical efficacy in patients with (DOC) remains to be validated by ongoing clinical trials. At present, the available evidence is still

收稿日期：2026–04–29

基金项目：上海市养老科技专项（24YL1900202）；国家自然科学基金资助项目（82202798）；上海扬帆专项（22YF1404200）

第一作者：茆梓恒，男，本科，初级康复师，研究方向：意识障碍康复与神经调控

通信作者：陈树耿，男，博士研究生，主管治疗师，研究方向：脑机接口与神经康复

mainly derived from animal experiments and small-sample studies, and standardized stimulation parameters as well as high-quality clinical trial evidence are lacking. **Conclusion** As an emerging non-invasive deep brain neuromodulation technique, TI has been demonstrated to enable non-invasive modulation of deep brain regions in healthy individuals and may have potential research value for arousal-promoting rehabilitation in patients with DOC. Nevertheless, its clinical efficacy and safety require further validation through large-scale randomized controlled trials.

【Key words】 Temporal interference stimulation; Disorders of consciousness; Neuromodulation; Thalamocortical network; Minimally conscious state

意识障碍（disorders of consciousness, DOC）是严重脑损伤后的常见并发症[1-3]，主要包括昏迷、无反应觉醒综合征及微小意识状态（minimally conscious state, MCS）。随着重症医学的发展，脑损伤患者生存率显著提高，但长期DOC患者比例仍然较高。当前研究认为，意识的产生依赖于广泛分布的脑网络，尤其是丘脑-皮层系统及前额叶-顶叶网络的协同作用[4-6]。神经影像与电生理研究显示，DOC患者常表现为脑网络连接性下降及神经振荡异常。现有常用治疗手段如重复经颅磁刺激（repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS）和经颅直流电刺激（transcranial direct current stimulation, tDCS）在疗效及深部脑靶向能力方面仍存在局限[7]。时域干涉电刺激（temporal interference stimulation, TI）由Grossman等[8]于2017年提出，通过在头皮表面施加两路频率相近但存在微小频差的高频交流电，在脑内不同电场的叠加区域形成随时间变化的干涉效应。当两路高频电流的频率差较小时，其叠加电场会产生相应频率的低频“包络”调制，从而在不直接施加低频电流的情况下，使深部神经组织受到低频调制作用，为非侵入性深部脑调控提供了新的技术路径。近年来，TI的研究已由深部脑区刺激的技术可行性验证逐步拓展至神经功能调控及潜在治疗应用。Violante等[9]在对健康受试者的研究中发现，TI靶向海马可局部调节海马活动并提高情景记忆准确性，提示该技术能够通过非侵入性深部脑调控产生相应的功能和行为效应，也为进一步探索其对DOC的调控机制及临床干预价值提供了研究基础。因此，本研究通过对现有文献的归纳整理，总结TI对DOC的神经调控机制，综述其在DOC中的基础研究与临床探索进展，分析其在DOC促醒康复中的潜在应用价值与现存问题，以期为深化TI在DOC中的机制研究和临床转化提供参考。

1 资料与方法

本研究采用PubMed、EBSCOhost及Google Scholar作为数据来源，以TI、DOC、动物实验、临床试验、MCS等为关键词检索相关文献。具体检索策略为：TS=（“temporal interference”OR“TI stimulation”OR“tTIS”OR“temporal interference stimulation”）AND TS=（“animal experiment”OR“animal study”OR“rodent”OR“in vivo”OR“human”OR“human study”OR“clinical trial”OR“healthy volunteer”）AND TS=（“disorders of consciousness”OR“DOC”OR“minimally conscious state”OR“delirium”OR“thalamocortical”）。检索截止时间为2026年4月31日，未设语言限制，共检索到298篇相关文献。

按照以下纳入排除标准筛选文献。纳入标准：①研究主题为TI相关研究；②涉及神经调控机制、动物实验或人体研究；③与DOC或相关脑功能调控相关。排除标准：①重复发表的文献；②与主题无关的研究；③仅为会议摘要或缺乏完整数据；④无法获取全文的文献。文献纳入与排除标准主要应用于基础研究证据和人体研究与临床探索证据部分，而对于机制探讨和理论背景部分，则采用代表性文献进行补充说明。最终纳入8篇直接涉及TI在DOC中的应用且为动物实验或临床试验研究的相关文献用于定性分析，见图1。

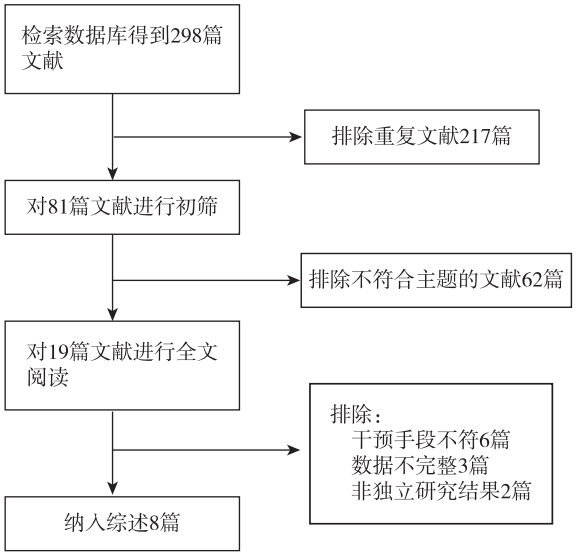


图 1 时域干涉刺激应用于意识障碍研究的临床证据相关文献检索流程

2 时域干涉刺激的作用机制

2.1 物理与电场调节机制

两组高频交流电在脑组织内相互干涉后，可形成低频振幅（amplitude modulation, AM）调制电场，其包络频率接近神经元可响应频段，这被认为是TI实现深部调控的重要基础。相较于传统的tDCS和经颅交流电刺激（transcranial alternating current stimulation, tACS），TI可在减少皮层电场强度的同时，提高深部脑区如丘脑、基底节等的电场聚焦能力，从而在理论上实现“非侵入性深脑刺激”的效果。见图2。

2.2 神经元与突触水平调节机制

在细胞层面，TI主要通过调制神经元膜电位及其时间动态特性发挥作用。研究[10]表明，高频电

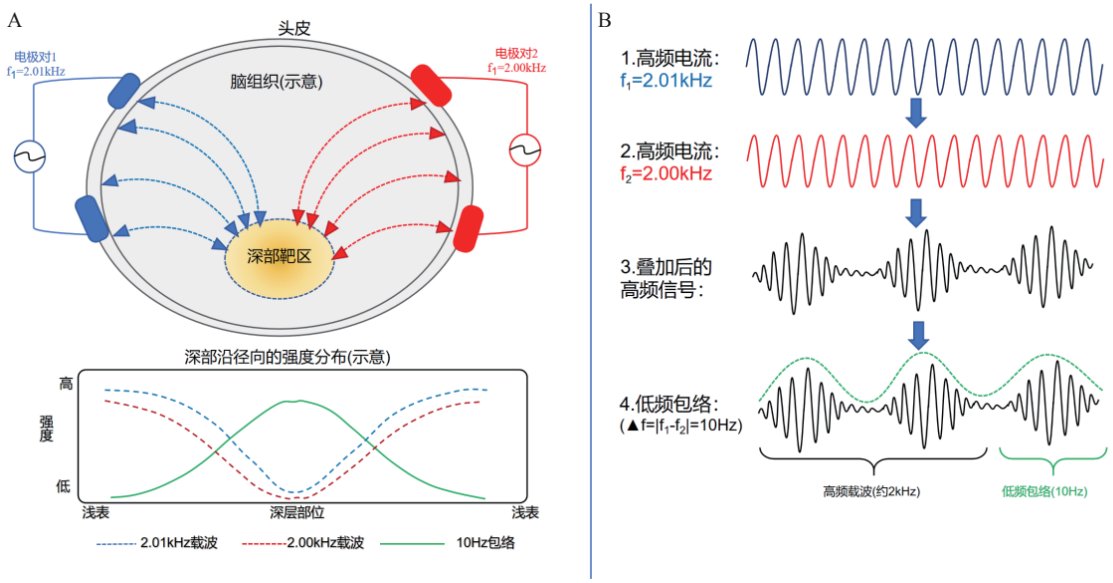


图 2 时域干涉刺激原理示意 A为空间干涉与深部靶向；B为信号形成原理

场难以直接诱导动作电位，但其形成的低频包络可引发节律性去极化，从而改变神经元放电概率。

此外，TI可能通过影响电压门控离子通道动力学，并调节突触传递过程，从而改变神经网络兴奋性，以及调节突触前递质释放和突触后响应，间接改变神经网络的兴奋性。这些效应提示TI不仅作用于单个神经元，还可能通过突触整合影响更大尺度的网络活动。

2.3 脑网络振荡与丘脑–皮层环路调控

从系统神经科学角度看，TI的核心作用可能体现在对脑网络振荡及关键环路的调节。神经振荡在意识维持和信息整合中具有基础作用[11–12]。而DOC患者常表现为低频（δ/θ）活动增强及高频（β/γ）活动降低的异常模式[5]。已有研究[10]提示，TI可对特定频段振荡产生调制作用，从而改善异常节律状态。

丘脑–皮层环路被认为是意识维持的核心结构，属于神经电活动和网络振荡。丘脑将感觉、觉醒、注意、运动和认知相关信息投射到皮层，皮层再通过反馈投射调节丘脑的活动，二者之间存在大量双向连接[4, 13]。丘脑–皮层环路经由神经递质系统通过改变兴奋性、抑制性和突触传递效率对认

知与意识进行调节，而TI可能通过在丘脑区域形成的低频包络改变神经元兴奋性，诱导或重塑神经振荡，并增强丘脑与皮层网络之间的功能连接，从而调控丘脑–皮层环路。这些电生理效应还可能进一步影响谷氨酸能、γ–氨基丁酸（gama–aminobutyric acid, GABA）能、胆碱能和多巴胺能等神经递质系统，进而有助于DOC患者恢复觉醒水平和行为反应能力。见图3。

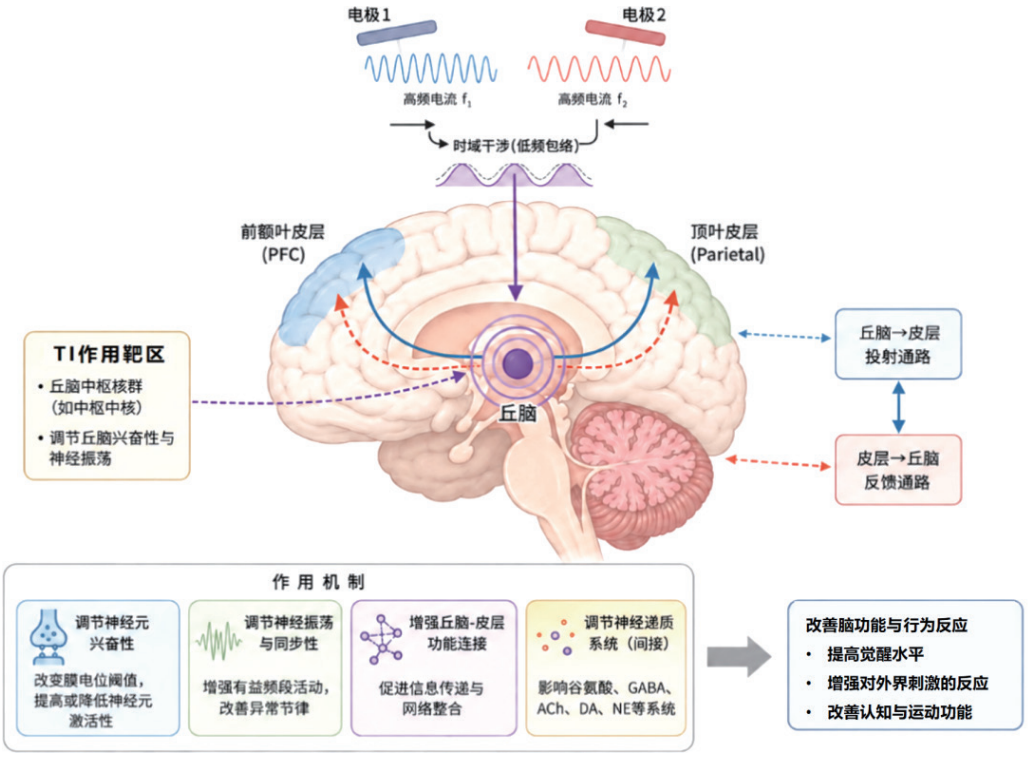


图3 时域干涉刺激通过作用于特定靶区激活丘脑–皮层环路

注：TI为时域干涉刺激；GABA为γ–氨基丁酸；ACh为乙酰胆碱；DA为多巴胺；NE为去甲肾上腺素。

2.4 神经递质与可塑性机制

除电生理效应外，TI还可能通过调节神经递质系统参与意识恢复过程。已有研究[5]表明，多巴胺及胆碱能系统在觉醒调控中具有关键作用。此外，随机对照试验[14]证实，金刚烷胺作为多巴胺调节药物，可加速意识恢复过程，提示神经调质系统在该过程中的重要性。TI可能通过调节相关神经环路的活动，间接影响递质系统功能。

进一步地，从长期效应来看，神经调控可能通过影响神经可塑性过程参与脑损伤后的功能恢复。既往研究[15]表明，非侵入性脑刺激可诱导长时程增强（long–term potentiation, LTP）等突触可塑性变化，并促进网络重组。此外，电刺激的时序模式及节律特征也被认为会影响损伤后脑组织中的突触活动与网络重建过程[16]。意识恢复通常伴随前额叶–顶叶网络及丘脑–皮层连接的逐步重建，而TI通过调节这些关键网络，可能在一定程度上促进功能重建，但目前关于TI促进长期神经可塑性及结构重建的直接证据仍较有限，仍需进一步研究验证。

3 时域干涉刺激临床研究

目前，TI在DOC患者中的研究仍处于探索阶段。已有研究主要集中在健康受试者，旨在证实TI在人体中实现深部脑区调控的可行性[9, 17]。Wang等[18]在一项针对健康受试者的研究中发现，不同包络频率的TI对运动皮层兴奋性具有不同调节效应，其中20 Hz的刺激可提高运动诱发电位（motor evoked potential, MEP）幅度，提示TI的神经调控作用具有频率依赖性。系统综述[19]亦指出，TI具有良好的安全性和潜在应用价值，但现有证据多来源于小样本研究或方法学验证。总体而言，当前临床证据仍存在样本量小、研究设计异质性高及随访时间

不足等问题，尚不足以支持其常规临床应用[20]。

尽管TI显示出一定潜力，但当前证据仍存在缺乏大规模随机对照试验、缺少标准化刺激参数与靶点选择、结局指标存在异质性以及个体差异的影响等明显不足。为系统总结TI在DOC领域的研究进展，本研究对现有文献进行了归纳整理，为进一步区分不同证据来源，将现有研究分为基础研究与临床探索两类，见表1、表2。近年来，TI在人类中的研究逐渐增多，相关研究已涉及海马、运动皮层及基底节等深部脑区，并在神经影像、行为学及神经生理层面显示出一定调控效应。然而，目前多数研究仍以健康受试者为主，针对DOC患者的直接临床证据仍较为有限。这表明TI虽具有潜在应用价值，但其临床疗效仍需进一步验证。

表1 时域干涉刺激应用于意识障碍领域的基础研究证据

研究者	发表年份	模型类型	实验对象	刺激靶点	主要发现	机制提示	局限性
Grossman等[8]	2017年	动物实验	小鼠	海马	实现非侵入性深部刺激	高频差频形成低频包络调制	主要验证电场原理，缺乏行为学评估
Esmaeilpour等[10]	2021年	电生理与计算模型	大鼠海马切片+头模型	深部脑区	TI可调节神经振荡活动	AM调制电场影响网络同步	缺乏体内功能及长期效应验证
Semenov等[21]	2025年	体外细胞实验	分离神经元	单神经元	高频正弦波可诱发兴奋	神经元响应并非完全依赖包络	难以反映复杂脑网络环境

注：TI为时域干涉刺激；AM为低频振幅。

表2 时域干涉刺激应用于意识障碍领域的临床探索

研究	发表年份	研究设计	研究对象	刺激靶点	主要发现	局限性
Violante等[9]	2023年	健康人实验研究	健康受试者	海马	证实TI可实现人类深部脑区非侵入性调控	非DOC患者
Beanato等[17]	2024年	健康人实验研究	健康受试者	海马–内嗅皮层复合体	空间导航及记忆表现改善	样本量较小
Wang等[18]	2025年	神经生理研究	健康受试者	初级运动皮层	20 Hz TI可增强MEP	缺乏长期随访
Demchenko等[19]	2025年	系统综述	人体研究	多脑区	TI在人类深部调控中显示出良好的安全性与应用潜力	临床异质性较高
Cai等[20]	2025年	临床试验方案	DOC患者	丘脑	研究正在进行	尚无已发表结果

注：TI为时域干涉刺激；DOC为意识障碍；MEP为运动诱发电位。

4 时域干涉刺激在意识障碍康复中的应用策略

4.1 个体化电场建模与精准刺激

TI通过不同频率电流在脑内叠加形成低频包络调制，其干涉热点位置对头部解剖结构及组织电学特性高度敏感。因此，个体间脑结构及电导率差异可能导致电场分布及靶点刺激强度的显著变化，使个体化电场建模成为优化TI疗效的重要技术手段之一。基于结构磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）构建的有限元模型（finite element model, FEM）可实现脑组织精细分割并预测电场空间分布，从而指导电极布局及电流参数设置[22–23]。目前，FEM已被用于参数优化框架，通过约束靶区与非靶区电场分布，实现刺激方案的定量设计。

然而，FEM结果依赖于若干理想化假设，如各向同性电导率及群体平均参数，且对病灶区域分割误差较为敏感，因此通常被用于电场分布的相对评估，而对绝对强度的解释需谨慎。随着多电极阵列的发展，通过调节电流比例可在一定程度上实现干涉场的空间“塑形”，提高深部脑区如丘脑或基底节的靶向性并减少浅表刺激。但该策略主要验证于仿真及健康人群，在DOC患者中的有效性仍有待进一步研究，其原因可能在于DOC患者常伴随脑萎缩及局灶性损伤，易使电流传播路径改变，同时其神经网络处于低反应或重组状态，电场靶向未必能够转化为预期的功能调制效应。

个体化电场建模并非TI所独有，而是非侵入性脑刺激精准化发展的共同方向，但对于DOC患者而言，脑萎缩、脑室扩大、局灶性损伤及白质结构改变可能显著影响电流传播路径，因此更需要基于个体化影像资料优化靶点选择、电极布局和刺激参数。该策略有助于提高丘脑、基底节或额顶网络等意识相关靶区的刺激准确性，并降低非靶区的过度刺激风险。

4.2 闭环调控

闭环神经调控系统通过实时神经信号反馈动态调整刺激参数，从而提高干预的个体适配性与精准性。近年来，基于脑电（electroencephalography, EEG）的闭环刺激逐渐成为非侵入性脑刺激的重要发展方向。研究[24]表明，刺激效果不仅取决于刺激参数本身，还与刺激时刻的大脑功能状态密切相关，基于实时脑状态的刺激策略有助于提高神经调控的一致性及长期效应。

在神经康复领域，EEG反馈、自适应脑机接口及实时参数优化等技术已被用于构建闭环神经调控框架，并显示出改善神经调控精准性的潜力[25]。相较于传统固定参数刺激，闭环系统可根据神经振荡、诱发电位或功能连接状态动态调整刺激时序与强度，从而提高刺激与目标脑状态之间的匹配程度。

对于DOC患者而言，闭环调控可能具有更突出的应用价值。由于DOC患者的行为反应常具有波动性与隐匿性，单纯依赖临床量表难以及时反映神经调控效应，因此，将TI刺激与EEG、诱发电位或功能连接等神经反馈指标结合，理论上有助于依据残余意识相关网络活动实现自适应刺激。然而，目前TI相关闭环研究仍处于方法学探索阶段，其临床可行性、稳定性及长期疗效仍需进一步验证。

4.3 多模态干预

多模态干预已成为DOC康复领域的重要发展方向[26]。TI可与感觉刺激、机器人辅助训练及药物治疗等多种手段结合，通过不同机制协同促进神经功能恢复。尽管多模态策略具有理论优势，但不同干预之间的协同机制尚不明确，且缺乏标准化治疗方案，这在一定程度上限制了其临床推广。多模态联合干预并非TI特有策略，但DOC康复涉及觉醒、感觉整合、运动反应和认知加工等多个层面，单一刺激方式往往难以覆盖全部功能障碍。因此，TI若与感觉刺激、机器人辅助训练及药物促醒治疗相结合，可能通过同时调节深部觉醒网络和外周感觉–运动输入，增强患者对外界刺激的反应性。

4.4 神经可塑性和网络重组

脑损伤后的功能恢复在很大程度上依赖于神经可塑性过程，包括突触重塑、网络重组及功能代偿。已有研究[20–21]表明，电刺激可诱导LTP等突触可塑性变化。从网络层面来看，意识恢复通常伴随着前额叶–顶叶网络及丘脑–皮层连接的逐步重建[5]。TI通过调节这些关键网络的活动，可能在一定程度上加速功能重组过程。然而，目前关于TI促进长期神经重建的直接证据仍较为有限，其作用机制主要基于间接推测。

神经可塑性和网络重组是脑损伤后康复的共同机制，并非TI所独有，但TI的潜在优势在于其可能通过深部靶向调控影响丘脑–皮层连接及额叶–顶叶网络等意识相关环路。对DOC患者而言，促醒治疗的关键不只是提高局部脑区兴奋性，更需要促进意识相关网络的重新整合，因此仍需通过纵向EEG、功能性磁共振成像（functional magnetic resonance imaging, fMRI）及行为量表进一步验证TI是否能够诱导稳定的长期网络重组。

5 总结与展望

TI作为一种新兴的非侵入性深部脑调控技术，为DOC的神经调控提供了新的研究路径。现有研究已开始将TI应用于DOC患者的促醒康复，并围绕深部脑区靶向调控、意识行为改善及神经电生理变化开展探索，初步显示出一定的应用潜力。总体来看，TI在DOC中的研究正由单纯的技术可行性探索，逐步向靶点优化、疗效评价和作用机制等方向延伸。但目前相关研究总体仍处于早期阶段，研究数量和证据积累有限，其临床疗效及作用机制仍有待进一步验证。

当前研究主要存在3个方面的不足。①刺激参数及靶点选择尚缺乏统一标准，不同患者的病因、病程、脑损伤部位及意识状态存在较大差异，现有通用刺激方案可能难以充分满足个体化治疗需求。②疗效和安全性评价体系仍需完善，目前对治疗效果的判断主要依赖临床意识状态及相关神经功能指标，如何进一步结合神经电生理和影像学指标，形成更加客观、系统的评价体系，仍是需要解决的问题。③临床研究规范化程度有待提高，需要进一步完善患者筛查、治疗方案制定、治疗过程记录、疗效评价及风险管理等流程。结合实际临床开展情况，患者病因、病程、意识状态以及MRI、EEG等资料的综合评估，是实现个体化治疗的重要基础。

针对上述问题，未来研究可从以下方面推进。①开展刺激参数和靶点的优化研究，结合患者个体差异，进一步探索不同刺激强度、频率、治疗时间及刺激区域的适宜组合，并逐步建立更加规范的个

体化刺激方案。②完善疗效和安全性评价体系。在临床意识功能评价的基础上，加强神经电生理、影像学等客观指标的应用，并关注治疗后的持续效应及长期安全性，从而提高疗效评价的客观性和完整性。③加强临床研究和规范化应用。未来需要通过更加规范的临床研究进一步验证TI的有效性，并逐步建立患者筛查、靶点确定、参数设定、疗效评价和风险管理相结合的标准化流程，为后续临床推广和科研转化提供基础。目前实际应用中也已体现出建立专家指导、多学科协作以及标准化诊疗记录体系的必要性。

此外，随着神经影像、脑电监测及人工智能技术的发展，未来可进一步探索个体化建模和智能化参数优化，利用患者临床、影像及神经电生理特征辅助刺激靶点和参数选择，并逐步探索实时监测基础上的闭环调控模式。对于谵妄等其他意识相关状态，TI也具有一定的探索价值，但目前更适合作为未来研究方向，而不宜作为已有临床证据进行扩展。

总体而言，TI在DOC中的应用具有一定的发展潜力，但目前仍处于从技术探索向规范化临床研究过渡的阶段。未来应以个体化刺激、安全性与疗效评价、规范化临床研究为重点，在进一步明确作用机制的基础上，逐步推动TI由探索性应用向精准神经调控和临床转化发展。就目前的实践基础而言，也应由单纯的技术实施逐步转向规范化、个体化和科研化发展。

[参 考 文 献]

[1] Roozenbeek B, Maas A I R, Menon D K. Changing patterns in the epidemiology of traumatic brain injury [J]. Nature Reviews Neurology, 2013, 9: 231–236.

[2] Giacino J T, Katz D I, Schiff N D, et al. Practice guideline update recommendations summary: disorders of consciousness [J]. Neurology, 2018, 91(10): 450–460.

[3] Eapen B C, Georgekutty J, Subbarao B, et al. Disorders of consciousness [J]. Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America, 2017, 28(2): 245–258.

[4] Schiff N D. Central thalamic contributions to arousal regulation and neurological disorders of consciousness [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2008, 1129(1): 105–118.

[5] Edlow B L, Claassen J, Schiff N D, et al. Recovery from disorders of consciousness: mechanisms, prognosis and emerging therapies [J]. Nature Reviews Neurology, 2021, 17: 135–156.

[6] Edlow B L, Massimini M. Are disorders of consciousness 'dis' connection or 'dys' connection syndromes? [J]. Brain Communications, 2023, 5(6): fcad328.

[7] Dmochowski J, Bikson M. Noninvasive neuromodulation goes deep [J]. Cell, 2017, 169(6): 977–978.

[8] Grossman N, Bono D, Dedic N, et al. Noninvasive deep brain stimulation via temporally interfering electric fields [J]. Cell, 2017, 169(6): 1029–1041, e16.

[9] Violante I R, Alania K, Cassarà A M, et al. Non–invasive temporal interference electrical stimulation of the human hippocampus [J]. Nat Neurosci, 2023, 26: 1994–2004.

[10] Esmaeilpour Z, Kronberg G, Reato D, et al. Temporal interference stimulation targets deep brain regions by modulating neural oscillations [J]. Brain Stimulation, 2021, 14(1): 55–65.

[11] Buzsáki G, Draguhn A. Neuronal oscillations in cortical networks [J]. Science, 2004, 304(5679): 1926–1929.

[12] Fries P. Rhythms for cognition: communication through coherence [J]. Neuron, 2015, 88(1): 220–235.

[13] Fang Z, Dang Y, Ping A, et al. Human high–order thalamic nuclei gate conscious perception through the thalamofrontal loop [J]. Science, 2025, 388(6742): eadr3675.

[14] Giacino J T, Whyte J, Bagiella E, et al. Placebo–controlled trial of amantadine for severe traumatic brain injury [J]. New England Journal of Medicine, 2012, 366(9): 819–826.

[15] Takeuchi, N, Izumi S I. Noninvasive brain stimulation for motor recovery after stroke: mechanisms and future views [J]. Stroke Research and Treatment, 2012(12): 584727.

[16] Fischer Q S, Kalikulov D, Viana Di Prisco G, et al. Synaptic plasticity in the injured brain depends on the temporal pattern of stimulation [J]. Journal of Neurotrauma, 2024, 41(21–22): 2455–2477.

[17] Beanato E, Moon H J, Windel F, et al. Noninvasive modulation of the hippocampal–entorhinal complex during spatial navigation in humans [J]. Science Advances, 2024, 10(44): eado4103.

[18] Wang Y, Zhu C, Zhou J, et al. 20 Hz temporal interference stimulation can more effectively enhance motor evoked potentials in the primary motor cortex [J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2025, 19: 1524485.

[19] Demchenko I, Tailor I, Chegini S, et al. Human applications of transcranial temporal interference stimulation: a systematic review [J]. Brain Stimulation, 2025, 18(6): 2054–2066.

[20] Cai J Z, King B, Cameron P, et al. In search of the lost arch in dialogue: a dependency dialogue acts corpus for multi–party dialogues [M]//Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2025. Vienna: Association for Computational Linguistics, 2025: 20135–20149.

[21] Semenov I, Kim V, Silkuniene G, et al. Excitation and polarization of isolated neurons by high–frequency sine waves for temporal interference stimulation [J]. Cell Reports Physical Science, 2025, 6(7): 102660.

[22] Lee S, Lee C, Park J, et al. Individually customized transcranial temporal interference stimulation for focused modulation of deep brain structures: a simulation study with different head models [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 11730.

[23] Thielscher A, Weise K, Madsen K H, et al. A flexible optimization framework for transcranial electric stimulation, temporal interference stimulation and tumor treating fields [J]. Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation, 2025, 18(1): 452.

[24] Zrenner C, Ziemann U. Closed–loop brain stimulation [J]. Biol Psychiatry, 2024, 95(6): 545–552.

[25] Jin W, Zhu X, Qian L, et al. Electroencephalogram–based adaptive closed–loop brain–computer interface in neurorehabilitation: a review [J]. Front Comput Neurosci, 2024, 18: 1431815.

[26] Keser Z, Ikramuddin S, Shekhar S, et al. Neuromodulation for post–Stroke motor recovery: a narrative review of invasive and non-invasive tools [J]. Curr Neurol Neurosci Rep, 2023, 23: 893–906.