PIBB 生物化学与生物物理进展
Progress in Biochemistry and Biophysics
2026,53(1):105~116
www.pibb.ac.cn

基于经颅电刺激的群脑刺激对社会互动的调控*

陈翰林[1)] 李 琦[1)] 李媛媛[1)] 潘亚峰[1,2,3)**]

([1)] 浙江大学心理与行为科学系，杭州 310058；[2)] 浙江大学脑机智能全国重点实验室，杭州 310058；
[3)] 浙江大学全省脑智发展与心理健康重点实验室，杭州 310058)

摘要 传统的超扫描技术无法直接揭示社会互动与脑间同步之间的因果关系。群脑刺激技术通过对交互个体特定脑区实施同步的非侵入性经颅电刺激（transcranial electrical stimulation，tES），主动操纵脑间同步水平，为因果机制的解析提供了全新的实验途径。群脑刺激中，经颅交流电刺激（transcranial alternating current stimulation，tACS）基于“跨脑夹带”机制，通过特定频率和相位施加交流电直接诱导多脑振荡的协同活动，从而优化跨脑信息传递，经颅直流电刺激（transcranial direct current stimulation，tDCS）则通过调节社会脑区的兴奋性，间接调控神经信息处理与行为协同。实证研究表明，群脑刺激能有效提升社会协作中的行为同步性、优化人际沟通效率以及增强社会学习效果，在多项研究中显示出对各类互动表现的改善作用。群脑刺激通过多层级机制影响社会互动：首先调节脑间同步水平，继而促进表征对齐、降低预测误差，并最终驱动互动行为。未来研究应致力于推动刺激参数标准化，提升复杂社会互动情境下的生态效度，并加速相关技术在教育优化、临床干预和组织管理等领域的应用转化，推动人际神经科学迈向因果解析与精准干预的新阶段。

关键词 群脑刺激，社会互动，经颅电刺激，脑间同步，超扫描
中图分类号 Q344，B845 **DOI**：10.3724/j.pibb.2025.0402 **CSTR**：32369.14.pibb.20250402

社会互动作为人类社会关系的核心载体，贯穿个体发展与群体演化的全过程。传统社会认知研究多采用“孤立脑”（isolated brain）范式，通过实验室情境下的单人神经影像数据推断社会互动的神经机制[1]。然而，由于社会互动具有多主体交互性和实时动态特征，该范式难以揭示真实社会情境中多主体神经系统动态耦合机制[2-3]。超扫描技术（hyperscanning）为上述问题提供了初步解决方案。该技术通过同步记录双人或多人脑活动信号（如基于脑电图、功能性近红外光谱成像），量化分析神经活动在时间、空间和频域维度的协同模式，从而深化对社会互动背后群脑协同机制的理解[4]。大量实证研究表明，脑间同步（inter-brain synchrony，IBS）与社会互动质量密切相关[5-7]。这些发现从群脑协同机制角度揭示了社会互动的神经基础，即高质量的社会互动依赖于多脑神经系统的共变模式[8]。然而，超扫描研究本质上具有“观察性”，主要在操控社会行为的基础上揭示IBS，难以直接确证IBS与社会互动之间的因果关系[9-13]。因此，IBS究竟是社会互动的驱动因素（即，发挥因果性作用），抑或仅是社会互动的伴随现象（epiphenomenon），仍有待基于主动干预范式的实验设计予以深入验证。

群脑刺激（multibrain stimulation，MBS）技术的出现和发展为探究IBS与社会互动的因果机制提供了前所未有的契机。该技术主要利用非侵入性脑刺激（如经颅电刺激（transcranial electrical stimulation，tES））同步调控多个交互个体的特定脑区，从而操控脑间同步水平，并进一步揭示其与行为表现的因果关系[14-15]。本文所探讨的“因果关系”遵循科学哲学中的“干预主义”因果观（interventionist account of causation）[16]，其核心主张为：若通过对变量X（本文中为IBS）进行理想

* 国家自然科学基金（62577047，62207025），中央高校基本科研业务费专项资金（226-2025-00127）和浙江省自然科学基金（LMS25C090002）资助项目。
** 通讯联系人。
Tel：0571-88273337，E-mail：yafeng.pan@zju.edu.cn
收稿日期：2025-09-09，接受日期：2025-12-10

化的、外源性操控，能够引起变量Y（本文中为社会互动）发生系统性改变，且这一因果路径不受混淆因素的影响，则可认为X是Y的原因。MBS可实时操控脑间相位耦合，通过频段特异性调节揭示神经振荡的功能机制，进一步助力解析IBS的驱动因素与生理基础。然而，关于MBS的原理及其如何对社会互动进行调控仍缺少翔实论述。本文旨在系统梳理MBS技术在社会互动研究中的实施原理及应用领域，剖析其在社会互动调控中的干预路径，并探讨该技术的局限性与未来发展方向。

1 群脑刺激原理

MBS最早由Novembre等[17]应用于联合手指敲击任务（joint finger-tapping task）研究中。该研究首次采用经颅交流电刺激（transcranial alternating current stimulation，tACS）同步调控两名被试的左侧运动皮层，发现当双脑同时接收20 Hz（β频段）刺激时，被试在任务中的行为同步性显著提升，且该效应依赖于β频段IBS的增强。在多种非侵入性脑刺激技术中，tES被视为群脑研究的优选方案，主要基于以下考量。首先，tES，尤其是tACS，能够以频率与相位特异的方式精准调控脑电节律，这对于直接操控脑间神经耦合至关重要，而经颅磁刺激（transcranial magnetic stimulation）等技术目前尚难以实现相位锁定的双脑同步操控，其可行性尚待实证验证。其次，tES施加过程无操作噪声，可最大限度减少对自然社交互动的干扰。最后，电刺激设备轻便、易于多通道同步触发，便于在多被试实时互动情境下实现高精度的群脑刺激。除了电刺激外，脑间神经反馈（interbrain neurofeedback）亦被视为促进IBS增强的潜在有效途径[18-19]。然而，与电刺激能够通过外源性能量实现直接、可控的因果操控不同，神经反馈依赖于个体的自我调节过程，其对IBS与行为变化之间因果关系的验证目前在国际上仍存在争议[10，13-14]。

1.1 技术基础

tES是一种利用头皮电极施加微弱电流，以非侵入性方式调节大脑神经活动的技术。其基本原理在于电流穿透颅骨后作用于目标脑区，通过调节神经元膜电位或神经振荡模式，从而影响神经网络的兴奋性与可塑性[20]。根据电流波形特征的不同，tES可进一步分为tACS、经颅直流电刺激（transcranial direct current stimulation，tDCS）和经颅随机噪声刺激（transcranial random noise stimulation，tRNS）3种类型。其中，tACS和tDCS是群脑刺激研究中常用的技术手段。tACS采用正弦交流电，其核心机制为“夹带效应”（entrainment effect），即通过施加与内源性神经振荡频率匹配的外源性电流，增强特定频段的振荡同步性，以提高特定频段振荡的功率谱密度[21-22]。tDCS通过阳极与阴极施加恒定的低强度直流电，形成局部电场梯度。阳极刺激通过去极化效应促进神经元放电以增强目标脑区的兴奋性；阴极刺激则通过超极化效应降低目标脑区的兴奋性[23]。

1.2 作用机制

群体互动中，大脑通过神经振荡（neural oscillation）的相位同步实现信息整合，这一过程涉及跨脑区及跨个体的神经夹带（neural entrainment）机制[24]。具体而言，神经振荡通过调节神经元群的兴奋性周期，控制信息传递的时间窗口[25]，而神经夹带则指外部节律性刺激（如他人行为或tES电流）与内源性振荡产生锁相，从而增强神经集群的协同性[26]。tACS的群脑刺激机制核心在于“跨脑夹带”（cross-brain entrainment），即当多个个体接受相同频率的tACS时，外源性电流可同步调节其内源性振荡的相位与振幅，从而促成跨脑神经振荡的协同模式[17]。因此，通过精确设计tACS的频率与相位参数，可直接操纵多人神经网络的动态耦合。tDCS的群脑刺激机制则在于皮层兴奋性的调控，通过极性特异性调节（阳极增强/阴极抑制）影响个体在社会互动中的神经信息处理模式。相比tACS，tDCS的群脑刺激模式对IBS的调控更为间接。具体而言，其调控主要包括两种方式：一是在社会互动前同步调节互动者的相关脑区，使其处于相似的兴奋水平，以促进社会性同步[27]；二是仅对互动群体中一部分成员实施定向刺激，使个体间相关脑区的兴奋水平产生差异，从而影响社会互动过程[28]。

以上作用机制可总结为两点：一是通过同质性刺激输入诱发IBS，二是对社会互动相关脑区实施靶向调控。前者依赖时空一致的外部节律调制，直接促进脑间同步；后者则通过调节社会认知核心网络的功能状态，间接影响群体互动中的行为协同。两类机制有时也可整合，以优化调控效果。具体而言，根据同质刺激输入诱发机制，tES施加时间节律一致的电流刺激，以模拟自然情境中共享感觉输入所引发的神经同步效应。当群体成员接受相同频

率的tACS时，电流的周期性波动通过相位重置（phase resetting）调节神经元集群的兴奋性时间窗口，促使不同大脑的内源性振荡趋于相位锁定[29]，进而调控IBS水平，影响社会互动。另一方面，基于社会脑区靶向调控机制，MBS可通过定向调控社会互动相关的神经环路，调节合作行为并影响IBS。这一调控机制主要作用于两个核心神经系统：镜像神经元系统（mirror neuron system）和心智系统（mentalizing system）。前者涉及前运动皮层、顶下小叶等脑区，其主要基于“内部模拟”（internal simulation）机制解码他人动作意图[27, 30]；后者包括内侧前额叶皮层、颞顶联合区等区域，其支持对他人心理状态的推断与社会情境的整合[31-32]。二者协同作用，共同构成社会互动的关键神经基础。通过对上述脑区进行群体定向刺激，可直接影响群体在社会情境中的神经状态，从而调节社会互动表现。

1.3 技术特点

在上述作用机制的支持下，MBS展现出区别于超扫描技术与单脑刺激的独特优势。相较于超扫描技术，MBS具有更强的主动调控性。前者主要通过观测和量化社会互动过程中自发产生的IBS现象，回答“当人们进行互动时，他们的大脑之间发生了什么？”这一描述性问题；而MBS则能够通过对互动者IBS水平的外源性操控，进一步探讨IBS与社会互动行为间的因果关系，揭示特定同步模式所蕴含的功能意义，从而回答“若改变IBS，人们的互动行为将如何变化？”这一机制性问题。相较于单脑刺激，MBS则具有更强的同步交互性。前者主要调节个体神经活动状态，以间接影响其在社会情境中的行为表现，然而这一方式无法直接操控个体间神经活动的实时耦合关系。而MBS可在多主体层面上实施同步性干预，从而实现对社会互动过程中跨个体神经动态机制的直接探查，建立“IBS-社会互动”的因果链。此外，与新兴的多脑神经反馈相比，MBS的特点在于其外源性强制调控。多脑神经反馈通过实时反馈IBS等信息，引导互动者有意识地、内源性地调节自身神经活动以实现同步，其本质是一种基于学习的“自我调控”范式。而MBS则是一种外源性物理干预方式，通过施加电流直接改变神经元群体的电生理环境，不依赖于被试的主观意图与学习过程。正因如此，MBS能够实现更高精度的时空调控，并有效排除认知策略等潜在混淆因素，为解析IBS的底层生理机制提供了独特途径。

2 MBS应用

已有研究表明，运用MBS技术诱发IBS可以增强社会协作、人际沟通与社会学习等互动行为（表1）。这项技术可同时塑造社会互动的内源和外源成分：外源成分依赖实时感官输入与行为输出同步，其时间尺度短，主要包括动作协调（需要外部环境和活动对象的配合）与信息沟通（依赖外部渠道和工具传递信息）；内源成分更多涉及社会互动者间的内部认知状态改变，时间尺度较长，主要包括知识技能学习（个体通过内化外部信息提升能力）。内外源成分差异化地涵盖在不同的社会互动中。社会协作强调实时行为同步，外源成分对齐占主导；人际沟通涉及外部的表达与内部的认知，其内外源成分紧密结合；社会学习须实现内部认知状态的持久改变，内源成分是其关键。这些实证研究推动了MBS技术从机制探索向实际应用的转化，为应对复杂社会系统中的“群体认知增强”问题提供了潜在操作方案。

2.1 社会协作

社会协作（social coordination）指两个或以上个体为实现共同目标而进行的协调性行为[33]。这一过程不仅涉及外显行为的动态匹配（如动作节律同步），更依赖基于镜像神经元系统的IBS机制。

Novembre等[17]采用双人tACS技术，于30对健康成人的左侧运动皮层（left primary motor cortex，l-M1）施加β频段（20 Hz）的同相位（0°）或反相位（180°）刺激，并要求被试完成手指同步敲击任务。结果显示，在任务初始阶段，同相位刺激组的同步表现显著高于其他条件，而反相位刺激组及α（10 Hz）、δ（2 Hz）频段刺激组均未表现出类似效应。这表明β频段脑间相位同步可能通过优化运动准备期的神经过程，促进协作双方动作启动同步性。相比之下，Szymanski等[34]在θ频段的MBS研究中得到了不同的结论。该研究运用双人多通道tACS技术，同步调控双人击鼓任务中的右侧额叶（fronto-central，F4）和右侧顶叶（parieto-central，P4）两个脑区。然而，研究发现，与假刺激组相比，同相位刺激组的行为异步性反而增加。研究者推测，这一现象可能源于θ频段主要涉及意图推断等社会认知加工，而非直接作用于动

作执行系统。刺激靶区与任务核心脑区（运动皮层）之间的功能匹配度较低，或许导致干预效果受限。这些研究提示，MBS的干预存在相位、阶段和靶区依赖性。

结合功能性近红外光谱成像（functional near-infrared spectroscopy，fNIRS）技术，Lu等[27]考察了多模态神经调控对社会协作的影响。研究发现，对右侧额下回（right inferior frontal gyrus，rIFG）施加20 Hz tACS或阳极tDCS后，被试的行为同步性显著提升，且前额叶的IBS强度与任务表现呈正相关。此外，刺激期间额下回区域的氧合血红蛋白浓度降低，表明神经效率（neural efficiency）提升，且该指标与行为改善水平密切相关。值得注意的是，IBS效应在刺激结束后仍可持续一段时间，而局部神经效率的提升仅限于刺激期内。该课题组进一步研究发现，与单次干预相比，连续10次的高剂量MBS能诱发更强的协作行为提升，且该累积效益在干预结束一周后依然显著[35]。该研究特别比较了在线刺激与离线刺激两种模式：前者指在任务执行过程中同步施加脑刺激，以实时调控与任务相关的神经活动；后者则是在任务开始之前施加刺激，旨在调节大脑的基础兴奋性，从而对后续的任务表现产生预备性优化。研究结果明确了多次离线实施的群脑tDCS在诱发这种长期行为改善和神经效率提升方面效果显著，而群脑tACS的效益则高度依赖于在线同步刺激，提示不同刺激模式的效果可能依赖于干预的时机与累积剂量。

除了初级协调性行为，也有研究者关注了高级合作策略。Zheng等[36]首次探索了MBS对社会合作（social cooperation）的影响。该研究采用同步双脑tDCS刺激了互动者在进行囚徒困境任务时的右侧颞顶联合区（right temporoparietal junction，rTPJ）。结果揭示，同步刺激显著增强了互动者颞顶联合区-颞叶皮质（temporoparietal junction-temporal cortex）的神经同步性，促进了合作策略（合作增加，背叛减少）并提升了合作经济收益。

2.2　人际沟通

人际沟通（interpersonal communication）指个体间通过语言、动作或符号系统传递意图与交换信息的动态过程[37]。Chen等[38]使用双人tACS技术探讨γ频段（40 Hz）IBS在概念对齐（conceptual alignment）中的作用。实验要求陌生被试通过协调符号游戏（coordination semiotic game）建立共享符号映射系统。结果发现，在成功建立概念对齐的组别，左侧颞顶区（left superior temporal gyrus，lSTG）的γ频段IBS显著高于失败组，且同步强度与任务准确率呈正相关。此外，研究进一步利用同相位tACS刺激lSTG，发现仅成功组的沟通准确性显著提升，表明增强γ频段IBS可特异性、因果性优化已建立的概念对齐过程。来自同一团队的Liu等[39]则揭示了共享意图性（shared intentionality，SI）通过增强IBS水平促进新沟通系统建立的机制。在协调符号沟通游戏中，高SI组在右侧颞上回（right superior temporal gyrus，rSTG）的IBS水平显著高于低SI组，且该同步水平在SI与沟通准确性间起部分中介作用。为验证因果关系，研究进一步运用双人tACS干预rSTG：同相位刺激可提升IBS水平并提高沟通准确性，而反相位刺激则削弱二者的关联。值得注意的是，该效应仅在沟通系统形成初期存在，系统成熟后SI对IBS水平的调节作用趋于消失。这一结果表明，MBS的干预时机需要与沟通的动态发展阶段相匹配，早期增强IBS可能有助于“锚定”共享心理表征的建立。

也有研究采用tDCS实施MBS，揭示IBS水平与内部心理过程的复杂关联[28]。研究者为探讨人际沟通的群体特性，将高精度经颅直流电刺激（high-definition tDCS）应用于情侣的右侧前颞叶（right anterior temporal lobe，rATL）。研究发现，在互动前对女性rATL进行阳极刺激可显著降低互动期间其与男性感觉运动皮层（sensorimotor cortex，SMC）的同步水平，并减少情感共情（emotional empathy）水平。这可能是由于对互动对象中个别个体调控引发的非对称性脑活动兴奋性会降低随后的互动个体IBS。中介分析表明，非言语行为在IBS水平变化与共情降低间起部分中介作用。该研究提示，MBS可通过调控个体间特定脑区的同步强度，间接影响高阶社会认知，并揭示了IBS效应的层级特异性（如rATL-SMC脑间通路优先关联共情，而非外显行为）。

2.3　社会学习

社会学习（social learning）是指个体通过观察、模仿或互动，从他人处获取新知识、技能或价值观的过程，其本质依赖于社会互动中的实时信息传递与动态协调[40]。Pan等[41]在自然音乐教学情境中验证了MBS对社会学习的因果促进作用。研究采用同步tACS靶向调控师生间左侧额下回皮层

（left inferior frontal cortex，lIFC）的θ频段（6 Hz）神经振荡相位对齐。实验要求师生配对完成歌曲教学任务，并通过专家盲评与动作能量分析评估学习效果。结果显示，6 Hz同相位刺激显著提升了学习者的音准（intonation）表现和师生间自发性动作同步，且这一效应具有频率与相位特异性：10 Hz或6 Hz反相位刺激均未产生类似效果。此外，基于计算机视觉的动作能量分析进一步揭示，同相位刺激增强了师生间的自发身体动作同步，动作同步在MBS对学习表现的提升效应中发挥了部分中介作用。

2.4 其他互动

除前述高频探讨的互动类型外，MBS技术正拓展至更广泛的人类社会互动研究领域。Takeuchi和Terui[42]则将MBS应用到了社会触摸（social touch）上，以检验其是否能提升触摸带来的镇痛效果。实验成对地招募了疼痛接受者（接受电刺激疼痛）与触摸给予者（轻触对方前臂），并于右侧初级躯体感觉皮层（primary somatosensory cortex，S1）施加了差异化的tACS刺激。结果发现，10 Hz同步双脑tACS刺激可特异性增强低共情个体的社交触摸镇痛效应，为优化临床疼痛管理中的医患互动提供了新路径。

2.5 动物互动

MBS的社会互动调控效果已有跨物种验证。动物互动（animal interaction）指动物个体间通过行为信号传递信息并调节群体动态的过程，其核心功能包括资源竞争、合作捕猎、交配与亲子抚育等[43]。Yang等[44]通过无线光遗传设备（wireless optogenetic devices）在小鼠内侧前额叶皮层（medial prefrontal cortex，mPFC）诱导IBS，实证验证了IBS对动物社会互动与社会偏好的因果调控作用。实验通过无线同步激活多只小鼠mPFC的兴奋性神经元，诱导群体内神经元活动同步，并考察其在开放环境中的社交行为变化。在2只小鼠互动的简易社会情境中，5 Hz的mPFC同步刺激显著增加小鼠的社交行为（理毛与嗅探）与互动持续时间；在3只小鼠互动的复杂社会情境中，接收同步刺激（5 Hz）的两只小鼠比另外一只小鼠（25 Hz）有更多的社会互动。

2.6 小结

总体来看，基于MBS外源性地建立群脑之间的协同性（即IBS），在多项任务中能有效提升社会性物种（包括人类和动物）行为、认知、情感过程以及社会功能的同步性。相关应用研究给出以下重要启示：首先，MBS的干预效果具有阶段、靶区、频率、相位等参数特异性（这些参数受任务类型影响），因此MBS的个体化设计是提升调控效果的关键；其次，MBS可能诱发了IBS的短时可塑性，互动后的IBS效应仍可持续一段时间，进一步的研究可深入探讨这种可塑性的持续时程；最后，MBS对社会互动的调控存在一条间接干预通路，可能是建立了共同表征（co-representation）来影响社会互动。

此外，MBS类研究需要一系列的实验操作，以确保从IBS水平的变化至社会互动行为改变的因果推断具备有效性。其中，严谨的组间实验设计是实现因果推断的关键环节。通过对真实刺激组与控制对照组（如接受假刺激、非目标频段刺激，或刺激条件相同但未真实互动）进行系统比较，有助于有效排除社会互动范式本身引起的IBS变化，从而强化因果推理的内部效度。另外，精细的统计建模亦是因果推断的重要保障。例如，采用贝叶斯结构方程模型（Bayesian structural equation modeling）[45]等方法，可从数据层面更为严谨地评估IBS与行为改变之间因果关系的强度与方向性。

在具体实施中，MBS参数的精准设置对于调控效应的实现以及社会互动机制的理解至关重要。首先，神经振荡频率的选择应基于目标社会互动类型所依赖的核心认知功能来确定。例如，θ频段（4~8 Hz）多涉及听觉处理和学习等认知过程[41, 46]，在调控音乐学习等涵盖听觉类认知过程的社会互动时则需要着重考虑该频段。其次，MBS的相位关系（使用tACS刺激时）亦具有关键作用。根据“协调支持通讯”（communication through coherence，CTC）假说，神经振荡的相位一致性程度对于脑间信号传递具有决定性影响[25]。tACS能够有效重置内源性振荡相位以影响社会互动行为。当设置同相位（0°）时，能最大化提升跨脑信息传递效率，模拟自然互动中的“最优耦合”状态，从而提升社会互动效率。相反，设置反相位（180°）则干扰信息传递过程，为IBS对行为的因果作用提供对照条件。最后，还需根据不同社会互动类型所涉及的关键脑网络节点，确定适宜的刺激靶区与参数配置，以实现对特定社会认知机制的精准干预与机制探查。

Table1　An overview of multibrain stimulation research

表1　群脑刺激研究一览

领域	实验范式	刺激手段	观测工具	被试量	脑区	频段/Hz	参考文献
社会协作	双人手指敲击任务	tACS	/	60（30对）	l-M1	20、10、2	[17]
	双人击鼓任务	tACS	/	76（38对）	F4/P4	5、6、7	[34]
	双人同步按键任务	tES	fNIRS	124（62对）	rIFG	20	[27]
	囚徒困境任务	tDCS	fNIRS	162（81对）	rTPJ	/	[36]
	联合按键任务/协调飞行游戏	tACS+tDCS	fNIRS	272（136对）	rIFG	20	[35]
人际沟通	符号协调游戏	tACS	/	54（27对）	lSTG	40	[38]
	协调符号沟通游戏	tACS	fNIRS	140（70对）	rSTG	40	[39]
	自然交流任务	tDCS	fNIRS	60（30对）	rATL	/	[28]
社会学习	歌曲学习任务	tACS	/	28（24对）	lIFC	6、10	[41]
社会触摸	社交触摸任务	tACS	/	32（16对）	S1	10	[42]
动物互动	社会互动和偏好任务	无线光遗传学设备	/	98只	mPFC	5、25	[44]

l=左；r=右；l-M1：左侧初级运动皮层（left primary motor cortex）；F4/P4：参照10-20头皮电极定位系统，其中F4为额中央区（fronto-central）；P4为顶中央区（parieto-central）；rTPJ：左侧颞顶联合区（right temporoparietal junction）；rIFG：右侧额下回（right inferior frontal gyrus）；lSTG：左侧颞上回（left superior temporal gyrus）；rSTG：右侧颞上回（right superior temporal gyrus）；rATL：右侧前颞叶（right anterior temporal lobe）；lIFC：左侧额下皮层（left inferior frontal cortex）；S1：初级躯体感觉皮层（primary somatosensory cortex）；mPFC：内侧前额叶皮层（medial prefrontal cortex）。/：nothing。

3　MBS影响社会互动的潜在机制

MBS能够通过施加同质性（电）刺激和/或调控社会互动相关脑区操纵IBS水平，进而调控社会互动。然而，其具体影响路径尚不清晰。基于对现有实证的思考，我们认为MBS调控的IBS可能通过影响互动者的共同表征水平，从而干预社会互动。具体而言，共同表征是指在互动过程中，个体间在行为动作、认知状态和情感体验等层面动态形成并维持的一种对齐状态。它并非个体在孤立环境下独立学习形成的巧合或对同一刺激的平行反应，而是一种依托社会互动、通过双向实时塑造而不断更新的神经与心理耦合过程。共同表征不仅支撑社会互动的流畅性与协同效能，也为理解群脑层面的协同机制提供了重要理论基础。此外，将“共同表征”置于经典社会认知框架中有助于深化其内涵。共享意图定义了互动的共同目标（“为何协作”），而共同表征则体现了为实现该目标所需的多层次内容对齐（“如何协作”），从而构成共享意图的认知与神经实现途径。进一步地，心理理论能力为个体准确推断他人心理状态、建构共同表征提供了基础，而在互动中经由IBS形成的动态表征对齐，则标志着这些个体认知能力成功转化为协作性的群体功能。部分文献中亦采用共享表征（shared representation）一词[28, 38]，两者在内涵上并无本质区别，本文中不作严格区分。按照表征内容的不同，共同表征可划分为行为、认知与情感3个层面。

在行为层面，个体行为与社会互动紧密关联，个体的表情、言语等行为不仅是引发社会互动的起点，更是传递信息与影响互动的重要途径。MBS通过调控IBS水平，能够影响个体在社会互动中的行为表现，进而改变互动模式。研究表明，MBS分别间接调控感觉运动对齐（sensorimotor alignment）与人际运动同步性（interpersonal movement synchrony）等行为指标，促进了社会互动效能的提升[17, 41]。具体而言，通过提升特定皮层区域的神经振荡相位对齐程度，能够优化多脑间动作序列的时空预测编码精度与时序整合效率，进而降低个体间感觉运动加工过程中的时间延迟差异，增强行为层面的表征对齐。认知层面上，社会互动中的认知因素涵盖执行功能、心理理论及社会预测编码（social predictive coding）等核心维度。这些认知机制通过动态的信息加工，协调个体间的行为，对社会互动的质量有决定性的影响。已有研究表明，MBS通过间接影响共享概念空间（shared concept space）、合作策略和意图推断等认知指标，改变了社会互动的模式和效果[36, 38-39]。具体而言，提高社会认知相关脑区的神经同步水平，能够改善跨脑信息传递的效率和可靠性，并增强个体对社会相关信号的同步性神经加工，从而在认知层面促进更准确、更一致的共同表征的构建与

维系。情感在社会互动中扮演着关键角色，既是维系互动的纽带，也通过影响个体的微表情、语调等非语言线索，左右互动中的信息传递[47]。在情感层面，Long等[28]的研究也揭示MBS间接影响共情水平从而干预社会互动。具体而言，MBS可通过直接调节情感加工相关脑区的活动基线或IBS水平，使互动个体对情感刺激的神经响应模式更加趋同，并提高对细微情感线索的敏感性，从而促进情感层面的共鸣和协调。综合来看，IBS构成了MBS的直接神经生理表现，共同表征则是IBS变化在心理或行为层面产生的近端结果，二者共同作用于社会互动过程，最终驱动可观察的互动行为表现。当然，共同表征的3个层面并非孤立存在，社会互动背后的神经机制高度复杂，行为、认知与情感层面通常是相互依赖并共同作用的。各层面的具体影响权重有待未来进一步研究。

社会互动的顺利进行还离不开互动者间的相互预测（mutual prediction）[48-49]，个体需要基于对互动伙伴当前行为、意图线索和情境信息的理解，对其下一步行动或心理状态做出预测。成功的预测对于实现高效协调和避免误解具有关键作用。MBS，尤其是针对与社会认知过程（如意图推断、心理理论）相关的脑区（如TPJ、mPFC）及特定神经振荡频段（如γ、θ波）的干预，能够增强这些区域间的IBS，进而促进互动双方预测性编码过程的协同。具体而言，从时序层面，同相位MBS通过神经夹带效应提升互动双方的相位同步水平，为跨脑预测信号建立共享的时间窗口。当一方发出行为信号时，另一方神经系统处于高兴奋性相位的概率显著增加，甚至可提前完成相位调整，从而提高了预测信号传递的时间精度与可靠性。这种高水平的相位同步不仅优化了跨脑信息传递的时间结构，也促进了互动双方在社会情境建模与预测生成中的内部模型趋同。由此，预测误差得以最小化，预测内容的一致性增强。进一步地，有研究指出，这一过程符合大脑优化原则（brain's optimization principle），可能通过减少自我-他人表征间的不匹配，从而降低神经编码损耗，其核心目标在于最小化自由能（free energy），形成稳定的吸引子状态（attractor state），进而提升人际互动的整体效能与稳态协调性[50]。综上，MBS诱导的IBS，通过上述机制使得双方在基于共享情境线索进行预测更新时，表现出更高的时间一致性与内容一致性，从而提升预测的准确性和互动的整体质量（图1）。

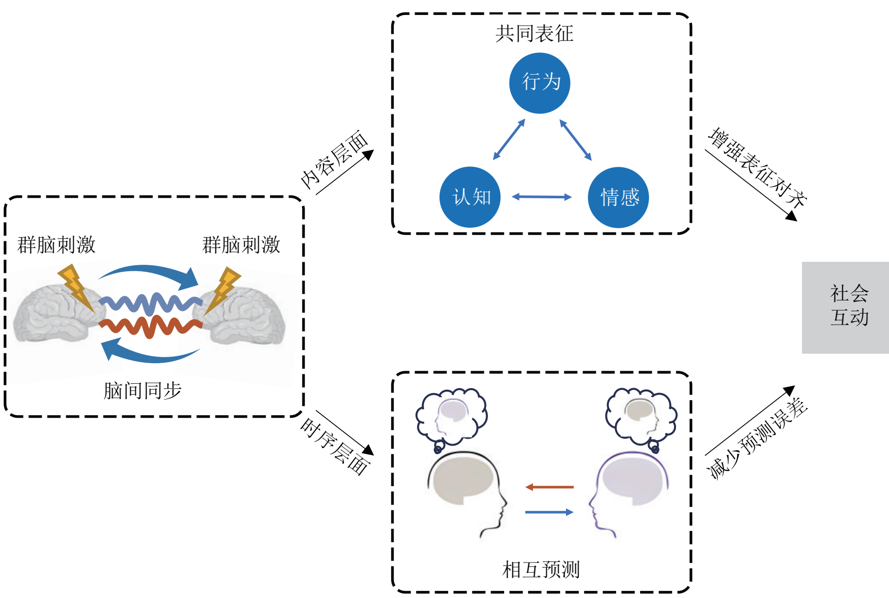


Fig. 1　Potential mechanisms of multibrain stimulation in modulating social interaction

图1　群脑刺激影响社会互动的潜在机制

4　总结和展望

MBS作为一种新兴技术，通过操纵IBS水平，为解析社会互动的因果神经机制提供了方法学突破。当前技术范式主要包括群脑tACS与tDCS：前者利用跨脑神经夹带机制实现个体间脑区振荡节律

的时空耦合；后者通过调节皮层兴奋性阈值影响被试间的脑活动同步。这两类技术主要通过两条路径发挥作用：一方面，施加同相位电刺激参数；另一方面，通过靶向调控与社会互动密切相关的核心脑网络。在实证研究层面，MBS技术已在社会协作、人际沟通、社会学习等领域得到初步探索与应用，并积累了一系列支持性证据。对这些应用进行综合分析发现，MBS通过多级级联机制影响社会互动：首先调控IBS水平，其次影响共同心理表征与相互预测，最终作用于外显互动行为。

然而，MBS技术尚处于发展初期，仍面临若干核心挑战与局限：

一是方法学挑战。tES研究普遍存在效应量较小、可重复性不足的问题。MBS的参数空间更为复杂，其稳健性亟需跨实验室、大样本研究的系统验证。此外，刺激效果可能受到个体差异（如年龄、性别、人格特质、基线脑功能等）的显著调节，忽视这些因素可能掩盖真实效应或导致研究结论不一致。

二是实验控制难题。现有研究观察到的行为改善在多大程度上特异于社会认知功能仍不明确。其效应可能部分源于对注意或执行功能等非社会性认知过程的普遍增强。因此，未来需通过严格的任务对照以识别其社会特异性。同时，社会互动中的安慰剂效应极为复杂，参与者对“同步”本身的信念就可能改变其神经响应与行为策略。

三是理论与机制不足。当前研究多为“黑箱式”干预，对tES如何影响神经群体活动、进而驱动IBS与行为改变的中介机制理解有限。此外，IBS与互动效能间可能呈现非线性关系（如倒U型），存在尚未被揭示的“最优同步区间”。

四是伦理考量。首先，技术可能在无意识层面改变互动的真实性与自主性。通过隐性提升合作性或顺从性，该技术所达成的“共识”可能并非完全基于真实意愿，形成神经层面的潜在“软性胁迫”，削弱社会互动中的自主与张力。其次，群体情境使知情同意与自主决策过程更加复杂。传统的个体知情同意框架需发展为可应对群体动力、权力不对称及社会压力的动态共识机制，以确保每位参与者的自主权。再者，若技术的效用获得验证，资源分配的不均可能导致新的“神经不平等”，因此应在政策层面规划普惠性的可及途径。最后，长期神经调控的未知风险要求秉持审慎原则。鉴于目前研究多聚焦短期效应，未来在迈向应用，尤其是面向发育中群体时，必须建立长期安全随访机制，从低强度干预起步，逐步验证其心理社会影响与长期安全性。

未来的研究可从技术、实验和应用3个层面进一步深化：

在技术层面，MBS的参数标准化是确保研究可重复和跨范式比较的前提。未来应系统构建涵盖刺激频率、作用时长、靶向脑区及电流强度的多维参数体系，并通过量化神经振荡相位响应曲线与行为增益函数，提升神经调控的时空精准度[14]。在tES技术基础上，后续研究应关注tDCS在皮层兴奋性调节方面的具体影响，并比较其与tACS的调控差异。此外，引入新的群脑神经调控技术，如面向群脑应用场景的经颅磁刺激（transcranial magnetic stimulation）与经颅超声刺激（transcranial ultrasound stimulation）等，有望拓宽群脑协同的刺激方式和准度。跨学科方法的结合，尤其是计算建模与群脑协同的整合[51]，将有助于进一步深化对MBS的认知。在数据分析上，目前的研究高度依赖相位锁定值（phase locking value）和小波变换相关性（wavelet transform coherence）等相位同步指标，其忽略了幅度同步、跨频段耦合等指标难以全面反映脑间耦合的复杂性。未来的研究可进一步整合幅值同步分析（amplitude-based synchrony analysis）、跨脑跨频耦合测量（cross-brain cross-frequency coupling metrics）等方法全面刻画耦合复杂性并厘清神经机制源头。

在实验层面，目前MBS的研究尚缺乏对社会互动过程的监测，多数研究仅聚焦于社会互动初期与末期。未来研究可结合脑电图、脑磁图等技术，补充社会互动过程中的实时脑活动变化；同时，建议收集社会互动过程中面部表情、眼动、心律等生理性指标，以全面解析社会互动[4, 52]。此外，复杂社会场景中实验的生态效度亟待提升，跨学科结合虚拟现实（virtual reality）等技术，有助于提升MBS实验场景的真实感。除了采用tES直接进行MBS，间接性的MBS方案也值得探究。例如，Leiva-Cisterna等[53]采用非侵入性感官节律刺激（视觉闪烁）实现了IBS的因果性调控，并增强了互动者的合作行为。应用此类同步性的感官节律刺激等间接性MBS能使得调控更加方便实施。目前所有的MBS研究均基于双人互动展开，将研究拓展到三人及以上的群体能进一步探究MBS的作用机制，也有助于深化对群体社会认知的本质的理

解。相较于二人互动，多人互动在神经层面可能呈现出无法由成对关系简单推断的高阶耦合模式；在行为层面则涉及联盟形成、角色分工与社会网络结构等更复杂的社会动力学。基于此，未来研究应结合参数化MBS策略，探索更具理论深度的科学问题。例如：在3人小组中，同步所有成员与仅同步其中2人，哪种模式对群体协作的促进效果更优？MBS能否主动塑造小组内部的关系结构（如中心-外围模式）？此外，未来可考虑利用多脑相位差（如对3人设计120°环形相位差）或异质靶区网络刺激等创新干预策略，从因果角度检验社会网络理论，进一步阐明群体智能的神经机制。

在应用层面，社会互动是一个复杂多元的概念，除了当前讨论的应用领域外，尚有许多未被探讨的社会互动类型值得进一步探索。例如，具有社会交往障碍，在社会注意、模仿行为等方面存在缺陷的特殊群体的社会互动调控[54]。MBS在临床应用方面尚处于空白阶段，后续研究应考虑实现基础研究和转化应用的有效对接，探索开发多元化的应用产品，满足实际社会互动中的需求。如，于教育领域开发相关的认知调控设备，优化真实课堂中师生间的互动情况与教学质量等。此外，应重视MBS与单脑刺激在现实应用中的互补性。单脑刺激因操作简便、成本较低且靶向性强，可能是当前阶段实现临床认知干预的更可行途径；而MBS则在群体认知与社会功能增强方面展现出独特潜力，为未来开发针对特定互动场景（如家庭沟通、小组合作）的群体认知增强技术提供理论支撑与方法学基础。

参 考 文 献

[1] Frith C D, Frith U. Social cognition in humans. Curr Biol, 2007, **17**(16): R724-R732

[2] Hasson U, Ghazanfar A A, Galantucci B, *et al*. Brain-to-brain coupling: a mechanism for creating and sharing a social world. Trends Cogn Sci, 2012, **16**(2): 114-121

[3] Hari R, Henriksson L, Malinen S, *et al*. Centrality of social interaction in human brain function. Neuron, 2015, **88**(1): 181-193

[4] De Felice S, Chand T, Croy I, *et al*. Relational neuroscience: insights from hyperscanning research. Neurosci Biobehav Rev, 2025, **169**: 105979

[5] Schilbach L, Redcay E. Synchrony across brains. Annu Rev Psychol, 2025, **76**(1): 883-911

[6] Hakim U, De Felice S, Pinti P, *et al*. Quantification of inter-brain coupling: a review of current methods used in haemodynamic and electrophysiological hyperscanning studies. Neuroimage, 2023, **280**: 120354

[7] Adel L, Moses L, Irvine E, *et al*. A systematic review of hyperscanning in clinical encounters. Neurosci Biobehav Rev, 2025, **176**: 106248

[8] 术鑫迪, 刘菡茵, 王瑾, 等. 脑间同步性的产生机制及其功能. 心理科学进展, 2025, **33**(3): 439-451
Shu X D, Liu H Y, Wang J, *et al*. Adv Psychol Sci, 2025, **33**(3): 439-451

[9] Holroyd C B. Interbrain synchrony: on wavy ground. Trends Neurosci, 2022, **45**(5): 346-357

[10] Novembre G, Iannetti G D. Hyperscanning alone cannot prove causality. multibrain stimulation can. Trends Cogn Sci, 2021, **25**(2): 96-99

[11] Carollo A, Esposito G. Hyperscanning literature after two decades of neuroscientific research: a scientometric review. Neuroscience, 2024, **551**: 345-354

[12] Lu K, Pan Y. A collective neuroscience lens on intergroup conflict. Trends Cogn Sci, 2023, **27**(11): 985-986

[13] Moreau Q, Dumas G. Beyond correlation versus causation: multi-brain neuroscience needs explanation. Trends Cogn Sci, 2021, **25**(7): 542-543

[14] Novembre G, Iannetti G D. Proving causality in hyperscanning: multibrain stimulation and other approaches: response to Moreau and Dumas. Trends Cogn Sci, 2021, **25**(7): 544-545

[15] Takeuchi N. A dual-brain therapeutic approach using noninvasive brain stimulation based on two-person neuroscience: a perspective review. Math Biosci Eng, 2024, **21**(4): 5118-5137

[16] Woodward J. Interventionist theories of causation in psychological perspective//Gopnik A, Schulz L. Causal Learning. Oxford: Oxford University Press, 2007: 19-36

[17] Novembre G, Knoblich G, Dunne L, *et al*. Interpersonal synchrony enhanced through 20 Hz phase-coupled dual brain stimulation. Soc Cogn Affect Neurosci, 2017, **12**(4): 662-670

[18] Dikker S, Michalareas G, Oostrik M, *et al*. Crowdsourcing neuroscience: inter-brain coupling during face-to-face interactions outside the laboratory. Neuroimage, 2021, **227**: 117436

[19] Müller V, Perdikis D, Mende M A, *et al*. Interacting brains coming in sync through their minds: an interbrain neurofeedback study. Ann N Y Acad Sci, 2021, **1500**(1): 48-68

[20] Reed T, Cohen Kadosh R. Transcranial electrical stimulation (tES) mechanisms and its effects on cortical excitability and connectivity. J Inherit Metab Dis, 2018, **41**(6): 1123-1130

[21] Antal A, Herrmann C S. Transcranial alternating current and random noise stimulation: possible mechanisms. Neural Plast, 2016, **2016**: 3616807

[22] Nasr K, Haslacher D, Dayan E, *et al*. Breaking the boundaries of interacting with the human brain using adaptive closed-loop stimulation. Prog Neurobiol, 2022, **216**: 102311

[23] Pisoni A, Mattavelli G, Papagno C, *et al*. Cognitive enhancement induced by anodal tDCS drives circuit-specific cortical plasticity. Cereb Cortex, 2018, **28**(4): 1132-1140

[24] Duecker K, Doelling K B, Breska A, *et al*. Challenges and approaches in the study of neural entrainment. J Neurosci, 2024, **44**(40): e1234242024

[25] Fries P. Rhythms for cognition: communication through coherence. Neuron, 2015, **88**(1): 220-235

[26] Obleser J, Kayser C. Neural entrainment and attentional selection in the listening brain. Trends Cogn Sci, 2019, **23**(11): 913-926

[27] Lu H, Wang X, Zhang Y, *et al*. Increased interbrain synchronization and neural efficiency of the frontal cortex to enhance human coordinative behavior: a combined hyper-tES and fNIRS study. Neuroimage, 2023, **282**: 120385

[28] Long Y, Zhong M, Aili R, *et al*. Transcranial direct current stimulation of the right anterior temporal lobe changes interpersonal neural synchronization and shared mental processes. Brain Stimul, 2023, **16**(1): 28-39

[29] Calderone D J, Lakatos P, Butler P D, *et al*. Entrainment of neural oscillations as a modifiable substrate of attention. Trends Cogn Sci, 2014, **18**(6): 300-309

[30] Antonioni A, Raho E M, Straudi S, *et al*. The cerebellum and the mirror neuron system: a matter of inhibition? From neurophysiological evidence to neuromodulatory implications. a narrative review. Neurosci Biobehav Rev, 2024, **164**: 105830

[31] Schurz M, Radua J, Tholen M G, *et al*. Toward a hierarchical model of social cognition: a neuroimaging meta-analysis and integrative review of empathy and theory of mind. Psychol Bull, 2021, **147**(3): 293-327

[32] Van O F. Social and emotional learning in the cerebellum. Nat Rev Neurosci, 2024, **25**(12): 776-791

[33] Redcay E, Schilbach L. Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction. Nat Rev Neurosci, 2019, **20**(8): 495-505

[34] Szymanski C, Müller V, Brick T R, *et al*. Hyper-transcranial alternating current stimulation: experimental manipulation of inter-brain synchrony. Front Hum Neurosci, 2017, **11**: 539

[35] Lu H, Zhang Y, Zhang M, *et al*. Dose-dependent enhancement of coordination through multibrain transcranial stimulation: a fNIRS hyperscanning study. Brain Res Bull, 2025, **232**: 111579

[36] Zheng L, Lu C. Non-invasive dual-brain stimulation facilitates social cooperation through enhancing interpersonal neural synchronization. Neuroimage, 2025, **317**: 121326

[37] Wrench J S, Punyanunt-Carter N M, Thweatt K S. Interpersonal Communication: A Mindful Approach to Relationships. Geneseo, NY: Open SUNY, 2020:73-83

[38] Chen D, Zhang R, Liu J, *et al*. Gamma-band neural coupling during conceptual alignment. Hum Brain Mapp, 2022, **43**(9): 2992-3006

[39] Liu J, Zhang R, Xie E, *et al*. Shared intentionality modulates interpersonal neural synchronization at the establishment of communication system. Commun Biol, 2023, **6**(1): 832

[40] Pan Y, Dikker S, Goldstein P, *et al*. Instructor-learner brain coupling discriminates between instructional approaches and predicts learning. Neuroimage, 2020, **211**: 116657

[41] Pan Y, Novembre G, Song B, *et al*. Dual brain stimulation enhances interpersonal learning through spontaneous movement synchrony. Soc Cogn Affect Neurosci, 2021, **16**(1/2): 210-221

[42] Takeuchi N, Terui Y. Synchronal dual brain stimulation over the somatosensory cortex modulated social touch-induced analgesia depending on empathy. J Pain, 2025, **36**: 105483

[43] Chen Y, Matheson L E, Sakata J T. Mechanisms underlying the social enhancement of vocal learning in songbirds. Proc Natl Acad Sci USA, 2016, **113**(24): 6641-6646

[44] Yang Y, Wu M, Vázquez-Guardado A, *et al*. Wireless multilateral devices for optogenetic studies of individual and social behaviors. Nat Neurosci, 2021, **24**(7): 1035-1045

[45] von Hardenberg A, Gonzalez-Voyer A. PhyBaSE: a Bayesian structural equation model approach to causal inference in phylogenetic comparative analyses. Meth Ecol Evol, 2025, **16**(6): 1136-1148

[46] Assaneo M F, Ripollés P, Orpella J, *et al*. Spontaneous synchronization to speech reveals neural mechanisms facilitating language learning. Nat Neurosci, 2019, **22**(4): 627-632

[47] Pi Z, Liu W, Ling H, *et al*. Does an instructor's facial expressions override their body gestures in video lectures?. Comput Educ, 2023, **193**: 104679

[48] de C Hamilton A F. Hyperscanning: beyond the hype. Neuron, 2021, **109**(3): 404-407

[49] Shamay-Tsoory S G, Saporta N, Marton-Alper I Z, *et al*. Herding brains: a core neural mechanism for social alignment. Trends Cogn Sci, 2019, **23**(3): 174-186

[50] Koban L, Ramamoorthy A, Konvalinka I. Why do we fall into sync with others? Interpersonal synchronization and the brain's optimization principle. Soc Neurosci, 2019, **14**(1): 1-9

[51] Lockwood P L, Apps M A J, Chang S W C. Is there a 'social' brain? Implementations and algorithms. Trends Cogn Sci, 2020, **24**(10): 802-813

[52] Van Hoornweder S, Stagg C J, Wischnewski M. Personalizing transcranial electrical stimulation. Trends Neurosci, 2025, **48**(9): 663-678

[53] Leiva-Cisterna I, Barraza P, Rodríguez E, *et al*. Sensory multi-brain stimulation enhances dyadic cooperative behavior. Soc Cogn Affect Neurosci, 2025, **20**(1): nsaf104

[54] Lu H, Xing C, Huang P, *et al*. Enhancing human cooperative behavior: a new perspective on treatment for social dysfunction. Asian J Psychiatr, 2023, **89**: 103786

Regulation of Social Interaction Through Transcranial Electrical Stimulation−based Multibrain Stimulation*

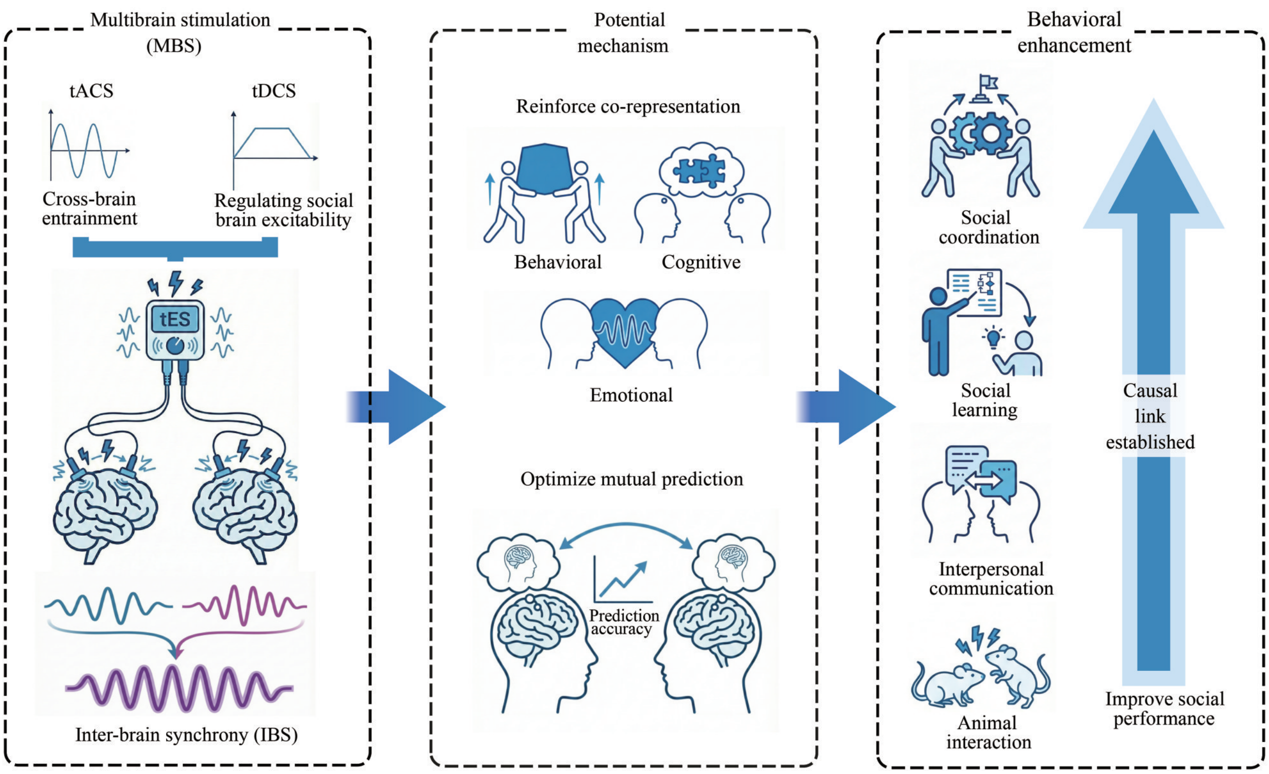
CHEN Han-Lin[1)], LI Qi[1)], LI Yuan-Yuan[1)], PAN Ya-Feng[1,2,3)]**

([1)]*Department of Psychology and Behavioral Sciences, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, China;

[2)]*The State Key Laboratory of Brain−Machine Intelligence, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, China;

[3)]*Zhejiang Key Laboratory of Neurocognitive Development and Mental Health, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, China)

Graphical abstract



Abstract Deciphering how the brain enables humans to interact, coordinate, and learn from one another remains one of the most compelling challenges in contemporary cognitive neuroscience. Social interaction is a dynamic, reciprocal process. Over the past decade, hyperscanning research has consistently identified inter-brain synchronization (IBS) as a neural signature accompanying successful cooperation, communication, joint attention, and social learning. However, the correlational nature of these findings leaves a critical question unresolved: does

* This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (62577047, 62207025), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (226-2025-00127), and the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LMS25C090002).

** Corresponding author.

Tel：86-571-88273337，E-mail：yafeng.pan@zju.edu.cn

Received：September 9，2025 Accepted：December 10，2025

IBS cause better social interaction, or does it merely reflect it? While traditional hyperscanning paradigms are powerful in revealing inter-brain neural dynamics "in the wild", they cannot on their own determine the direction of causality. This gap has motivated the emergence of multibrain stimulation (MBS)—a new generation of causal inference tools designed to actively manipulate neural coupling across individuals. MBS leverages non-invasive transcranial electrical stimulation (tES) to modulate neural activity simultaneously in two or more interacting brains. Unlike conventional tES applied to a single individual, MBS employs coordinated stimulation parameters, such as synchronized waveforms or matched frequencies, to directly perturb the neural mechanisms underlying social interaction. By providing an exogenous, precisely controlled intervention on IBS, MBS satisfies interventionist criteria for establishing causal relationships: researchers can test whether modifying inter-brain synchrony leads to predictable changes in behavior, communication, or shared understanding. This capability represents a fundamental methodological shift, transforming interpersonal neuroscience from a largely descriptive discipline into one capable of mechanistic inquiry. The biophysical underpinnings of MBS vary depending on the specific modality used. Transcranial alternating current stimulation (tACS) functions through cross-brain entrainment: when two individuals receive oscillatory currents matched in frequency and phase (*e.g.*, theta-, beta-, or gamma-band stimulation), their endogenous neural rhythms tend to align with the exogenous signal and, consequently, with each other. This alignment effectively instantiates principles of the communication through coherence (CTC) framework, which posits that coherent oscillations optimize information exchange by synchronizing periods of excitability across neural populations. Meanwhile, transcranial direct current stimulation (tDCS) exerts its influence by altering the excitability of targeted cortical regions in a polarity-dependent manner, thereby tuning the computational readiness of social-cognitive hubs such as the temporoparietal junction, superior temporal cortex, or inferior frontal gyrus. A growing body of empirical evidence demonstrates that such manipulations yield robust behavioral effects. In joint motor tasks, in-phase tACS enhances interpersonal coordination by aligning motor preparation dynamics, reducing temporal variability, and enabling individuals to anticipate each other's actions more effectively. In communication and social learning contexts, MBS targeting high-order integrative regions promotes conceptual alignment, accelerates knowledge transfer, and supports more efficient encoding of shared representations. Notably, the effects of MBS often persist beyond the stimulation period, suggesting short-term plasticity in cross-brain networks. Post-stimulation improvements in synchronization and coordination indicate that MBS may temporarily recalibrate the neural architecture underlying social interaction. However, these benefits exhibit strong parameter specificity—precise phase relationships (*e. g.*, 0° in-phase versus 180° anti-phase) and frequency matching are essential for generating reliable behavioral outcomes. Taken together, MBS represents a transformative step toward establishing the causal principles of human sociality and offers a new avenue for probing how multiple brains become functionally aligned during interaction.

Key words multibrain stimulation, social interaction, transcranial electrical stimulation, inter-brain synchronization, hyperscanning

DOI：10.3724/j.pibb.2025.0402 **CSTR**：32369.14.pibb.20250402