



社会互动中脑间同步的灵活性*

张 曼^{1,2)} 潘亚峰^{2,3)**}⁽¹⁾ 安徽农业大学人文社会科学学院心理学系, 合肥 230036; ⁽²⁾ 浙江大学心理与行为科学系, 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 社会互动中的人际协调既要根据当前需求动态调整, 也受到既往互动经验的影响。脑间同步 (inter-brain synchrony, IBS) 为考察这一过程的神经机制提供了重要窗口。本文系统梳理了社会互动中 IBS 随互动需求和既往经验发生变化的相关证据及其与行为协调和互动结果的关系, 并从适应性与经验性两个维度阐述 IBS 灵活性的概念框架。二者主要依据 IBS 变化所依赖的因素加以区分: 适应性指 IBS 根据当前互动目标、任务阶段、角色分工、策略和反馈进行动态调整, 可表现为同步增强、减弱或状态切换; 经验性指既往互动经验或外部干预对后续 IBS 的影响, 可表现为任务后残留、后续互动中的变化或跨时间保持。围绕这一框架, 本文进一步综述相关经验证据、潜在作用机制和量化方法, 并讨论现有研究在因果识别、跨时间追踪和功能解释方面的局限。未来研究应结合动态分析、多时间点追踪与实验操纵, 检验 IBS 灵活性与互动需求及行为结果之间的关系, 进一步考察相关变化的保持、重现、迁移及其功能意义, 从而深化对动态人际协调潜在神经机制的理解, 并为教育和临床等领域的研究与应用提供理论参考。

关键词 社会互动, 脑间同步, 灵活性, 适应性, 经验性**中图分类号** Q189, Q42, B845.1**DOI:** 10.3724/j.pibb.2026.0510**CSTR:** 32369.14.pibb.20260510

社会互动是个体建立社会关系、完成协同任务和实现社会学习的重要途径。揭示社会互动的神经基础, 不仅需要考察个体自身的神经活动, 还需要关注互动双方神经活动如何通过行为交换与感觉反馈形成动态关联^[1-2]。脑间同步 (inter-brain synchrony, IBS) 通常指社会互动过程中不同个体脑活动在时间维度上的协同变化, 为考察跨个体协调提供了重要窗口^[3-4]。目前, 研究者主要采用基于脑电图 (electroencephalography, EEG)、功能性近红外光谱成像 (functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 和功能性磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 的超扫描方法, 同步记录多个个体的脑活动, 并通过相关 (correlation)、相干 (coherence)、对齐 (alignment)、耦合 (coupling) 或相位同步 (phase synchrony) 等指标对 IBS 进行量化^[5]。既有研究发现, IBS 随任务目标、角色分工和外部干预而变化, 并与信息共享、社会联结和社会学习等过程相关^[6-11]。这些发现提示, IBS 不仅能够表征互动双

方的跨脑协调, 还对社会互动的具体情境具有敏感性。

然而, 社会互动并非静态的神经协调状态, 而是随时间持续演变的动态人际协调过程。互动双方通过言语和动作持续交换信息, 并依据感觉反馈协调行为时序、调整互动策略^[12-14]。相应地, IBS 既可能随当前互动中的目标、阶段、角色分工和反馈而动态变化, 也可能受到既往互动所形成的伙伴预期、关系表征和协同经验的影响^[15]。近年来, 研究者开始关注 IBS 在互动过程中的动态调整、互动结束后的延续, 以及既往互动经验对后续 IBS 的影响, 初步揭示了 IBS 在不同时间尺度上的变化特征^[16-19]。这些研究为从动态视角理解社会互动的

* 载人航天工程航天医学实验领域项目 (HYZHXMN01020), 国家自然科学基金 (62577047), 浙江省自然科学基金 (LMS25C090002), 浙江大学基本科研业务费项目 (226-2025-00127) 和安徽省教育厅科研项目 (2025AHGXSK40137) 资助。

** 通讯联系人。

Tel: 0571-88273337, E-mail: yafeng.pan@zju.edu.cn

收稿日期: 2026-09-03, 接受日期: 2026-10-14

神经机制提供了新的实证依据。然而, 现有研究多聚焦于特定类型的变化或单一时间尺度, 尚缺乏能够整合互动过程中的动态调整、互动结束后的持续效应, 以及后续互动中变化的统一解释框架。

综上, 为系统揭示IBS在社会互动中的变化规律及其功能意义, 本文从“适应性”(adaptability)和“经验性”(experientiality)两个相互关联的维度出发, 阐述IBS的灵活性特征。适应性关注IBS如何随当前互动中的目标、阶段、角色分工、策略和反馈而调整, 以及这种调整与行为调节和互动结果之间的关系; 经验性则关注既往互动经验或外部干预是否引发超出原有互动或干预时段的IBS变化, 包括互动结束后的残留、跨时间保持, 以及相关变化在后续互动中的重现, 并进一步考察这些变化与后续人际协调之间的关系。两个维度主要依据IBS变化所涉及的影响因素及其时间特征加以区分: 前者侧重当前互动需求对IBS的动态调节, 后者侧重既往经验或外部干预对IBS的持续影响。与此同时, 既往经验也可能改变IBS对当前互动需求的响应方式, 因而两个维度并非相互独立, 而是存在潜在的交互关系。基于这一框架, 本文将系统梳理相关实证证据, 分析IBS灵活性的潜在机制, 总结其主要量化方法, 并展望未来研究方向, 以期深化对社会互动神经机制及其动态调节规律的理解, 并为IBS在教育与临床场景中的应用提供理论参考。

1 脑间同步的灵活性框架

1.1 适应性

1.1.1 情境敏感性

既有超扫描研究发现, IBS并非跨情境稳定不变的神经耦合现象, 其平均强度和空间分布会随互动目标、交流方式、关系属性及个体状态而改变。总体而言, 言语交流通常比非言语交流涉及更广泛的IBS分布^[20-24], 合作互动也通常伴随更强的IBS^[25-27], 提示信息交换和共同目标可能促进跨个体神经活动的协调。然而, 情境因素对IBS的影响并非总是表现为同步水平的单向升高: 竞争情境下既可能出现IBS减弱, 也可能出现局部增强或同步范围扩大^[28-31]; 与健康对照组相比, 特殊状态个体或临床群体的IBS也可能表现为升高、降低或无显著差异等不同模式^[28, 32-34]。此外, 教学方式、信息呈现方式、关系亲密度和角色分工等因素也会影响互动过程中的IBS^[8, 16, 35-36]。总体来看, 这些发

现表明, IBS对互动任务的要求及社会关系特征具有情境敏感性, 能够表征不同互动条件下跨个体神经协调的差异。不过, IBS的变化是否具有特定的功能意义, 仍需结合具体任务要求、行为过程及适当的对照条件加以判断^[37]。

上述研究揭示了IBS对不同互动情境的敏感性, 但多数研究主要考察特定时间窗口内的平均同步强度或空间分布, 因而难以揭示跨脑协调在互动过程中的动态组织方式。相同的平均IBS水平可能对应不同的时间演变模式, 如相对稳定的维持、持续增强或减弱、阶段性波动以及状态转换; 不同模式也可能具有不同的方向性和时滞特征。因此, 要进一步理解动态人际协调的神经基础, 不仅需要比较不同互动条件下IBS的总体差异, 还需考察IBS能否随互动进程而动态调整, 尤其是在任务阶段转换、关键事件发生或协调需求变化时, 其变化是否与双方的行为调整及互动结果相匹配。本文将IBS随当前互动需求而发生动态调节的特征界定为“适应性”, 并进一步结合其与行为调整及互动结果的关系, 探讨其潜在功能意义。

1.1.2 阶段轨迹与事件相关动态

近年来, 一些超扫描研究开始采用分时段比较、滑动时间窗等方法, 考察互动过程中IBS的时间演变轨迹。研究发现, 互动双方的脑活动并非始终维持稳定的耦合水平, 而是会随互动进程发生动态变化。例如, 在创造性问题解决任务中, 团队合作行为随任务推进而增加, 但前额叶和颞顶区域的IBS总体呈下降趋势^[38], 表明合作行为的增加并不必然伴随IBS的持续增强。研究者推测, 陌生搭档在互动初期需要理解彼此意图、建立共同目标并形成协调策略, 因此可能表现出较强的跨脑耦合; 随着共同理解和协作模式逐渐形成, 对高水平跨脑耦合的需求可能随之降低。

近期研究进一步揭示了合作学习中跨脑协调的阶段性变化和角色差异。在一项持续6 min的双人合作学习研究中, 基于格兰杰因果分析估计的领导者至跟随者的信息流主要出现在左侧颞中回, 而跟随者至领导者的信息流则主要分布于左侧感觉运动皮层; 两个方向的信息流均呈现先增强后减弱的时间轨迹^[39]。多人教学研究也发现, 跨脑协调的时间特征与教学片段及师生角色有关: 在讲授新知识的片段中, 学生间alpha频段同步最高; 当教师脑活动领先学生约300 ms时, 师生同步最为显著, 且同步强度与一周后的学习增益相关^[40]。该研究

采用以教师讲授为主的模拟课堂设计, 尚难以区分共同感觉输入与社会互动对同步的相对贡献。因此, 其结果更适合被视为跨脑协调与教学过程及后续学习表现相关的证据, 而不足以证明同步本身能够促进学习。

综上, 考察 IBS 随任务进程和关键事件发生的动态变化, 有助于揭示跨脑协调在互动过程中如何形成、维持、减弱或转换, 以及其可能具有的方向性和时滞特征。这一视角将研究从不同互动情境下 IBS 的总体差异推进到跨脑协调的时间组织方式, 并为理解互动双方如何围绕共同注意、信息交换和行为配合进行动态协调提供了线索。然而, 动态变化、方向性或时间领先本身均不足以证明 IBS 具有积极的功能或因果作用。对其功能意义的判断, 还需考察 IBS 的变化是否与当前互动需求相匹配、是否与行为调节及互动结果相关, 并排除共同输入等替代解释。

1.1.3 脑间同步状态转换

时间轨迹分析主要刻画 IBS 随互动进程发生的连续变化。而状态分析则从跨脑网络的整体配置出发, 识别互动过程中反复出现的 IBS 模式, 并通过状态出现比例、平均驻留时间和转换次数等指标描述其时间组织特征^[17, 41-42]。Wang 等^[42]发现, 与非创造性沟通相比, 创造性沟通中两类拓扑效率较高状态具有更高的出现比例, 转换次数也更多; 其中, 拓扑效率最高状态的出现比例与合作行为及创造性表现呈正相关。这些结果提示, 互动表现可能与跨脑网络不同状态的出现及其转换方式有关。然而, 该研究仅纳入 27 对女性参与者, 采用限时 5 min、轮流报告想法的任务, 其研究情境与自然社会互动存在一定差异。因此, 相关发现的普适性仍需在更多样的参与者群体和更自然的交流情境中进一步检验。

互动决策研究也发现, IBS 状态会随刺激呈现、决策执行和反馈加工而变化, 其空间配置和时间组织受到提议公平性和反馈结果的影响, 并与互惠行为相关^[41]。研究者将早期后顶叶区域的状态配置解释为可能涉及视觉刺激的协调加工, 而将后续额叶及颞顶区域的同步与决策执行和反馈加工联系起来。这提示, 不同时间阶段出现的跨脑状态可能涉及不同的认知加工过程, 不能一概将其归因于互动特异的协调机制。另一项纳入 123 对大学生的研究发现, 具有较强前额叶-颞叶同步的特定状态与群体创造性表现呈正相关, 但状态转换频率与行

为表现不存在显著关联^[43]。综合两项创造性研究可见, 状态转换次数可能对任务条件具有一定敏感性, 但并非稳定的行为表现指标, 更不能单独作为 IBS 灵活性或适应性的证据。判断状态转换是否具有适应性意义, 还需考察转换发生的时机、转换前后的状态特征及驻留时间是否与具体任务阶段和行为调整相对应。即使状态特征与较好的行为表现相关, 也仍需区分状态变化究竟参与了有效协调的形成, 还是反映了行为调整的结果或与之共同变化的过程。

基于数据驱动提取的“状态”本质上是由特定分析方法识别出的 IBS 统计模式, 并不等同于可直接观测的离散神经生理状态。时间窗的长度和步长、滤波方式、状态数量及其确定标准、聚类算法等因素均可能影响状态划分^[44-45]。此外, 对于 fNIRS 研究, 其测量的是相对缓慢且滞后于神经活动的血流动力学反应, 这也会限制对短时间尺度状态转换的解释^[46]。后续研究需检验 IBS 状态能否在不同参数设定、分析方法和独立样本中稳定重现, 并将其在时间上与任务事件及行为过程对齐。

1.2 经验性

1.2.1 任务内形成与任务后残留

互动经验对跨脑协调的影响可能首先表现为互动过程中 IBS 的逐渐形成。Atias 等^[47]采用 fNIRS 超扫描记录了 53 对陌生参与者首次进行 5 min 自然交谈时的脑活动, 发现运动同步, 以及左侧背外侧前额叶皮层-额下回、右侧前运动皮层-额下回的 IBS, 均随交谈进程逐渐增强。研究者将这些变化解释为互动过程中快速形成的经验依赖性耦合。研究还发现, 在交谈的最后一分钟, 右侧前运动皮层-额下回的 IBS 呈现显著的双向统计预测关系, 提示跨脑耦合与运动协调可能存在动态关联。但这种双向预测关系尚不足以确定二者之间的因果方向。此外, 该研究未对交谈内容进行系统编码, 且仅考察了短时互动, 因此难以区分经验累积、当前互动需求及具体交谈内容对 IBS 变化的相对贡献。

相较于对任务内轨迹的考察, 比较互动前后的 IBS 则将观察窗口延伸至互动结束之后, 为考察跨脑协调的持续效应提供了线索。Shamay-Tsoory 等^[48]发现, 参与者完成运动同步互动后, 涉及额下回和背内侧前额叶的特定脑间连接较互动前增强; 任务后右侧额下回的耦合水平还能预测个体建立社会联结的动机。研究者认为, 这种变化可能反映了互动结束后对先前节律、动作及社会信息的持

续加工。另一项研究发现,母亲与青少年进行积极互动后,双方共同在场时的静息态额颞IBS高于互动前,且任务后IBS与互动过程中的行为同步相关^[19]。类似地,Pan等^[49]考察了朋友间负性与中性情绪分享前、分享中及分享后的脑间耦合,发现与中性情绪分享相比,负性情绪分享期间右侧额下皮层耦合较低,而分享结束后则较高。此外,从分享期间到分享结束后的耦合变化量与倾听者前后测的愤怒及沮丧变化呈负相关。这些结果初步表明,互动期间的IBS动态变化与互动后的情绪变化存在关联,但尚不能据此认定耦合降低具有积极的情绪缓冲作用,或任务后耦合增强能够直接促进情绪改善。

总体而言,任务内IBS逐渐增强及任务后IBS升高,为理解互动经验相关的跨脑协调变化提供了初步线索。然而,这些现象仍存在多种可能的解释:任务内IBS增强既可能反映互动经验的逐渐积累,也可能体现IBS对当前互动需求的适应性调整;任务后IBS增强则可能与先前互动的持续影响有关,也可能受到情绪状态延续、共同在场或后续互动情境等因素的影响。因此,仅凭任务内变化或任务前后的差异,尚难以判断经验效应是否独立于当前互动过程而存在。进一步采用延迟测量、重复互动或外部干预等设计,考察IBS的变化能否跨越时间间隔保持,或在后续互动中再次出现,将有助于更严格地检验既往经验对跨脑协调的持续影响。

1.2.2 重复互动后的跨次变化与外部干预

跨次研究为考察重复互动过程中IBS的动态变化及其持续影响提供了证据。一项针对8例考试焦虑患者的概念验证研究发现,随着治疗会谈的推进,患者与治疗师之间的IBS逐渐增强,并与患者症状减轻、幸福感提升及会谈质量改善相关,但与治疗联盟的变化无显著关联^[50]。研究者将这一随治疗进程出现的IBS增强解释为“脑间可塑性”(inter-brain plasticity),并提出,重复的治疗互动可能逐步改变双方的神经协调,进而参与治疗效果的形成。然而,这种变化并未延伸至治疗结束后患者与另一名访谈者的互动。作者也指出,IBS增强既可能参与治疗改变,也可能是其他治疗过程的伴随指标。因此,该研究初步揭示了IBS随重复治疗互动发生变化的现象,但尚不能确定这种变化是否促进了治疗改善,也无法据此推断其形成了可迁移至其他互动对象的协调能力。

除重复互动过程中逐渐形成的变化外,先前经

验还可能影响后续不同任务中的IBS。Nozawa等^[51]在教学沟通任务前安排参与者进行同步或异步运动,发现与异步运动相比,同步运动增强了随后教学过程中的左侧外侧前额叶IBS,并提升了参与者的融洽感。该研究将经验操纵与后续IBS测量分离,为检验先前互动经验对后续跨脑协调的影响提供了较直接的证据。然而,同步运动并未显著提高词汇记忆成绩,表明IBS与关系体验的增强并不必然转化为学习收益。与这种跨任务影响相呼应,既往互动形成的神经协调模式也可能在经验回放时再次出现。Schwartz等^[52]发现,母亲-青少年和陌生人二人组在现场互动及随后分处不同房间观看互动录像时,均表现出额颞脑间网络同步;现场互动与录像回放阶段的同步水平彼此相关,并与行为同步有关。其中,现场互动的同步水平高于录像回放的现象主要出现在母亲-青少年组,而陌生人组未表现出相同的阶段差异。但该研究属于小样本探索性研究,尚需进一步检验现场互动中形成的个体神经活动模式,是否会在回放过程中重现,以及这种重现与IBS之间存在何种关系。

外部神经刺激则为实验性地考察IBS的可调节性及其与互动行为的关系提供了另一条路径。Lu等^[53]发现,对互动双方的右侧额下回施加20 Hz同相经颅交流电刺激后,参与者在随后的协调任务中表现出更强的前额叶IBS和行为协调;刺激后的短暂静息阶段也观察到较高的右侧额下回IBS。然而,刺激并不必然增强同步。Long等^[54]发现,与假刺激及控制脑区刺激相比,对情侣中一方的右侧前额叶施加阳极经颅直流电刺激,降低了随后交流中特定连接的IBS和情感共情,但未显著改变言语或非言语互动行为。这些发现表明,外部神经刺激能够调节随后互动中的跨脑协调,但其影响方向可能因刺激方式、靶区及任务情境而异。鉴于两项研究在上述方面存在差异,不能仅依据IBS的增强或降低,直接判断刺激的功能效应孰优孰劣。

多脑神经反馈进一步将双人或多人之间的脑间耦合转化为实时反馈信号,为直接训练IBS提供了可能。有研究发现,当参与者被告知视觉反馈反映双方的同步状态时,互动后半程的IBS有所增强^[55]。近期一项采用实时EEG多人脑机接口的随机对照研究,在单次12 min训练中设置了6轮反馈。结果显示,真实反馈组在训练期间表现出更强的脑间耦合,社会联结感的提升幅度也更大^[56]。该研究中,社会联结仅通过自我报告测量,反馈呈

现方式及同步指令本身也可能影响主观体验;此外,中介变量与社会联结在同一训练后时间点测量,限制了对两者作用顺序及因果关系的判断。另一项研究让陌生人两人组在一周内完成3次真实反馈或伪反馈训练,发现真实反馈组直至第3次训练时才出现额下回 IBS 增强,并伴随社会联结感提升^[57]。值得注意的是,该增强主要出现在反馈训练期间,静息基线中未观察到相应效应。因此,跨次训练中的变化尚不能等同于脱离反馈后的持续保持,也不能据此确定 IBS 增强是社会联结提升的原因。

总体而言,上述研究分别从重复互动、跨任务影响、经验回放、外部神经刺激及多脑神经反馈等角度,为经验相关的 IBS 变化提供了证据。然而,不同研究对跨次变化、经验重现、跨任务迁移及干预后保持的支持程度并不相同。未来研究需要进一步考察 IBS 的变化能否在经验形成或干预结束后持续存在,以及这种变化能否迁移至不同任务或互动对象。与此同时,还应区分 IBS 变化在互动改善中的作用。IBS 可能是促进互动改善的因素,也可能是互动改善的结果,或与反馈体验、行为策略及其他互动过程共同变化的伴随现象。通过结合延迟测量、重复测量、适当的对照条件及对中介过程的时间序列考察,才能更准确地揭示既往经验如何塑造跨脑协调,以及这种协调变化是否具有持续的行为意义。

1.2.3 长期关系及发展相关的同步倾向

在更长时间尺度上,共同互动历史与个体的发展经历可能与特定情境中的跨脑协调模式相关。横断面研究为此提供了初步证据。例如,情侣与朋友或陌生人之间表现出不同的 IBS 模式^[58],篮球运动员与缺乏团队运动训练经验的个体之间也存在 IBS 差异^[59]。亲子互动研究同样观察到较为稳健的 IBS 增强效应,且儿童年龄能够显著预测不同研究中亲子 IBS 效应量的大小^[9],但这种年龄关联来自不同研究之间的比较,可能同时受到任务设计、样本特征及测量方法等因素的影响,因而不能直接解释为同一亲子关系中的 IBS 随儿童成长而发生的变化。

纵向研究进一步提供了关系发展和早期经历与后续 IBS 之间的跨时证据。Wang 等^[60]发现,与初次相识时相比,同一批两人组相识7个月后,在非言语社会情感互动中的情感共享能力以及额叶、顶叶和左侧颞顶区域的 gamma 频段 IBS 均有所增强。

这一结果表明,关系发展过程中,行为层面的情感共享与神经层面的跨脑协调均可能发生变化,但仅凭两次测量尚难以揭示其变化轨迹,也无法确定二者之间的作用关系。Schwartz 等^[61]则发现,婴儿3~4个月时母亲的敏感性照料与约12年后母亲-青少年互动中的右侧额颞脑间网络同步呈正相关,而侵入性照料与该网络同步呈负相关。由于研究未在婴儿期测量 IBS,该结果反映的是早期照料行为与青春期 IBS 之间的长期关联,尚不能揭示跨脑协调在此期间的形成过程,也不足以将观察到的关联归因于早期照料的独立因果作用。

长期经验的影响可能不仅体现为 IBS 水平的差异,还可能涉及跨脑协调对情境需求的调节方式,体现 IBS 经验性与适应性的强交互。Konrad 和 Puetz^[62]在关于童年虐待后适应性发展的理论模型中提出,生物行为同步的灵活性体现为个体能够根据具体情境及其适应价值,与他人的认知-情感、行为和生理状态建立同步,或在适当时与之分离。尽管该模型并非专门针对 IBS,但它提示,同步的适应性价值并不取决于同步是否持续增强,而在于同步与分离能否随情境需求得到恰当调节。由此推测,长期关系经历与发展经验可能不仅与 IBS 的总体水平有关,还可能塑造个体在不同互动对象及情境下调整跨脑协调的倾向。

1.3 小结

综合现有证据(表1),适应性与经验性这两个维度在合作、学习、沟通及亲子互动等多种情境中均有所体现。两者的核心区别在于 IBS 变化所依赖的因素及其发生的时间窗口。“适应性”是指 IBS 对当前互动需求的在线调节,主要表现为一次互动过程中同步强度、动态状态或网络配置随互动情境变化而调整,通常可在秒至分钟的时间尺度上观察。“经验性”则是指既往互动经验或外部干预对后续 IBS 模式产生的影响,表现为相关变化在经验形成或干预阶段结束后仍可被观察到,或在后续互动中再次出现,其考察时间尺度可从数分钟延伸至数天、数月乃至更长时间。两者并非相互排斥的类别,而是描述 IBS 动态变化的不同维度:适应性强调 IBS 如何响应当前互动需求,经验性则关注既往经历是否影响后续的跨脑协调。

时间尺度与测量窗口有助于区分这两个维度,但不能单独作为判定依据,关键在于 IBS 变化与当前互动需求或既往经验之间的关系。适应性调节可以贯穿较长的互动过程,而经验相关的变化也可能

在短时互动中开始形成^[47]。因此,连续互动中的IBS增强或减弱,既可能反映对当前需求的适应性调整,也可能涉及互动经验的逐渐累积,单凭任务内变化通常难以区分两者。基于此,本文将任务内可能与经验累积有关的IBS变化视为经验形成的初步线索,而不直接将其判定为经验性效应。按照本文的操作化标准,经验性效应需通过经验形成或干预阶段结束后的独立测量加以确认。例如,可在经验形成或干预结束后设置延迟测量、静息基线或后续互动任务,并在尽可能匹配当前任务条件的情况下,比较具有不同先前经历的参与者在IBS上的差异。对于这类比较,还需结合适当的对照条件及信号质量控制,尽可能排除重复测量、共同输入、生理波动及测量噪声等替代解释。需要指出的是,经

验性效应在后续互动中再次出现,并不意味着其在两次测量之间持续存在;同样,任务结束后短暂出现的IBS变化,也不必然表明形成了稳定的经验效应。

此外,适应性与经验性可能相互作用。当前互动中的在线调节可能参与经验的形成,而既往经验也可能改变后续IBS对互动需求的响应方式,例如影响其调节速度、变化幅度或网络配置。因此,后续研究除考察IBS是否在先前经验或干预结束后发生变化外,还应进一步检验这种变化是否会影响IBS对不同互动需求的响应。通过结合任务内动态测量、任务结束后的独立测量及后续互动中的重复测量,有望进一步揭示适应性与经验性各自的作用及其相互关系。

表1 脑间同步适应性与经验性的代表性研究总结

Table 1 Summary of representative studies on adaptability and experientiality of inter-brain synchrony (IBS)

灵活性维度	作者(年份)	被试	实验范式	测量与分析	IBS主要发现	行为或功能关联
适应性: 情境敏感性	Pan等 (2020) ^[8]	24对教师-学习者,均为女性,共48人	概念学习任务;比较支架式与解释式教学,并操纵教学是否个性化	fNIRS超扫描;小波变换相干;教学行为编码与机器学习分类	支架式教学较解释式教	支架式教学的学习增益更高;前额叶IBS仅在
					学诱发更强的前额叶	支架式教学中与学习增益正相关,颞上皮层IBS仅在个性化支架式教学中与学习增益正相关
适应性: 阶段性轨迹	Mayseless等 (2019) ^[38]	15对健康成年人	团队真实情境创造性设计任务	fNIRS超扫描;小波变换相干和分时段分析	随任务推进,前额叶及颞顶区IBS总体下降	合作行为增加伴随IBS下降;两者的因果关系未检验
适应性: 阶段性轨迹与方向性重组	Li等 (2025) ^[39]	90名大学生(45对)	6 min双人合作学习;共同分析古诗,自发形成领导者-跟随者角色	fNIRS超扫描;格兰杰因果分析、逐分钟轨迹分析及言语行为编码	领导者至跟随者的左侧颞中回信息流较强,跟随者至领导者的左侧感觉运动皮层信息流较强;两个方向均在第4分钟达到峰值后减弱	双方累计话语得分在前4分钟增加后趋于稳定;方向性信息流与话语得分或同伴支持的关联均未通过多重比较校正
适应性: 事件相关变化	Davidesco等 (2023) ^[40]	9个教学组,每组1名教师和4名学生,共45人	小组科学课程讲授及即时、延迟测验	EEG超扫描;8~12 Hz alpha频段IBS、片段对应分析和跨时滞分析	与学生后来正确作答内容对应的讲授片段中,学生间IBS较高;教师脑活动领先学生约300 ms时师生IBS最显著	学生间IBS预测即时和延迟测验成绩;约300 ms教师领先的师生IBS与延迟学习成绩正相关
适应性: 状态转换	Wang等 (2022) ^[42]	54人(27对)	创造性沟通(替代用途任务)与非创造性沟通(物体特征任务)	fNIRS超扫描;WTC、滑动时间窗、k均值聚类及图论分析	IBS状态交替出现;创造性沟通中两个高效状态的出现率及状态转换次数均增加	最高效状态的出现率与合作行为及群体原创性正相关;低效状态与较弱互动相对应

续表

灵活性维度	作者 (年份)	被试	实验范式	测量与分析	IBS主要发现	行为或功能关联
适应性: 状态转换 与耦合-解耦	Cheng等 (2026) ^[17]	102人 (51对)	面对面、视频或文字媒介下的协作创造任务及非创造性讨论任务	fNIRS超扫描; 多尺度滑动窗口、动态IBS聚类及网络拓扑分析	识别低效状态、支持独立构思的低耦合状态和支持信息整合的高整合状态; 面对面互动更能灵活切换耦合与解耦, 视频互动偏向持续高整合	低效状态的较高出现率或较长驻留与较低创造表现及较少轮流发言相关
适应性: 事件相关 状态重组	Li等 (2026) ^[41]	144人 (72对陌生人)	重复最后通牒博弈, 区分提议呈现、回应和反馈阶段	EEG超扫描; 源定位WTC、动态跨脑网络和k均值聚类	早期状态以顶后部模块化连接为主, 后期决策-反馈状态重组至额叶和颞顶网络; 公平提议或接受反馈诱发更活跃、更高效的IBS状态	较强IBS与更多互惠行为相关; 有利结果下动态网络效率更高
适应性与 经验性的 交界: 任务内形成	Atias等 (2026) ^[47]	106名陌生人 (53对)	首次5 min自然相识交谈	fNIRS超扫描; WTC及逐分钟轨迹分析	左侧dlPFC-IFG和右侧PMC-IFG的IBS随交谈推进逐渐增强	运动同步随交谈推进增强并预测联结感; 末段右侧PMC-IFG同步显著预测运动同步
经验性: 任务后残留	Shamay-Tsoory等 (2024) ^[48]	64人 (32对陌生人)	互动前后背对背自由运动基线, 中间进行2 min面对面同步运动	fNIRS超扫描; O ₂ Hb信号WTC及真实-伪配对比较	互动后rIFG-rIFG、rIFG-lIFG和rIFG-dmPFC耦合较互动前增强, rIFG为共同枢纽	互动后上述连接的同步水平正向预测未来继续交谈的动机; 未检验长期保持
经验性: 任务后残留	Schwartz等 (2025) ^[19]	研究1: 55对母亲和青少年; 研究2: 24名陌生人	共同在场静息-积极面对面互动-共同在场静息	EEG超扫描; beta频段额颞网络wPLI及前后变化、中介分析	母亲-青少年互动后额颞IBS显著增强; 陌生人组未出现相同的任务后增强	互动中的行为同步与任务后IBS增量正相关并构成中介; 青少年催产素增量可在行为同步之外进一步预测IBS增量
经验性: 跨任务改变	Nozawa等 (2019) ^[51]	64人 (32对)	同步或异步节律性手臂运动, 随后轮换开展生词教学-学习	fNIRS超扫描; 前额叶O ₂ Hb信号WTC; 被试内条件比较	先前同步运动相较异步运动增强随后教学交流中的左侧外侧PFC IBS	IBS增量与关系融洽度增量正相关
经验性: 跨次变化 (概念验证研究)	Sened等 (2026) ^[50]	8名考试焦虑来访者、1名治疗师	考试焦虑心理治疗, 隔次会谈中进行fNIRS超扫描	fNIRS超扫描; 会谈内WTC及跨疗程线性混合效应分析	患者-治疗师IBS随治疗进程逐渐增强	IBS增强与症状减轻、幸福感提升和会谈质量改善相关, 但与治疗联盟变化无显著关系
经验性: 外部神经刺激	Lu等 (2023) ^[53]	124名健康青年 (62对)	双人同步按键协调; 右侧IFG接受20 Hz同相hyper-tACS、hyper-tDCS或伪刺激	hyper-tES结合fNIRS超扫描; PFC IBS及右侧IFG神经效率分析	hyper-tACS主要增强刺激后的PFC IBS, hyper-tDCS主要提高右侧IFG神经效率	PFC IBS增强伴随更好的双人协调表现, 并表现出行为后效应
经验性: 神经反馈训练	Cheng等 (2025) ^[56]	114名大学生 (57对陌生人; 真实反馈28对、伪反馈29对)	实时EEG神经反馈; 6轮训练, 每轮100 s, 比较真实反馈与随机信号生成的伪反馈	实时EEG超扫描; 在线相干、离线圆相关、训练前后问卷及探索性链式中介分析	真实反馈组的在线脑间耦合高于伪反馈组; 离线分析显示21~23 Hz耦合更强, 其中22 Hz差异通过FDR校正	真实反馈组的社会联结感、共享意向和感知相似性提高; 探索性分析提示联合控制感和共享意向可能构成中介; 仅检验即时效应
经验性: 神经反馈训练	Francis等 (2026) ^[57]	92人 (有效IBS分析44对)	一周内3次真实或伪双人fNIRS神经反馈训练	实时fNIRS双人神经反馈; WTC、跨次变化及全网络离线分析	真实反馈组并未逐次线性增强, 而是在第3次训练才出现显著IBS增强, 且效应扩展至非训练连接	IBS增强伴随联结感提高; 具体调节策略及更长期保持未检验

续表

灵活性维度	作者 (年份)	被试	实验范式	测量与分析	IBS主要发现	行为或功能关联
经验性: 重复互动的纵向变化	Moffat等 (2026) [18]	31对代际搭档和 30对同代青年搭档	6次创造性共同绘画计划; 每次包括共同绘画与独立绘画	fNIRS超扫描; 跨次IBS轨迹和脑区连接-社会指标分析	共同绘画时IBS高于独立绘画; 跨6次互动, 代际组IBS逐渐减弱, 同代组则逐渐增强	孤独感和社会亲近感随会次改善; 两者与rIFG-rTPJ及rIFG-rIFG同步的关系受到任务和代际组别调节
经验性: 长期关系倾向	Pan等 (2017) [58]	恋人、异性朋友和陌生男女各16对, 共96人	双人合作按键任务	fNIRS超扫描; 右侧额顶区WTC和Granger因果分析	恋人相较朋友和陌生人表现出更强右侧额上回IBS; 恋人中女性至男性的方向性同步更强	恋人合作表现更好; 右侧额上回IBS与合作成绩正相关
经验性: 发展相关倾向	Schwartz等 (2024) [61]	29对母亲-青少年	婴儿3~4月龄时观察母婴互动; 约12年后记录母亲-青少年积极自然互动	纵向观察; 青春期EEG超扫描; beta频段额颞网络wPLI	母子积极互动时, 真实母子配对在beta频段额颞网络的IBS显著高于伪配对基线	婴儿期母亲敏感性与约12年后母子右侧额颞网络IBS增强呈正相关, 而母亲侵入性与之呈负相关

表中对适应性经验性的划分, 仅为依据概念界定作出的建议性分类; 在实际研究中, 这两种属性很可能相互交织, 并非完全独立。WTC: 小波变换相干 (wavelet transform coherence); dlPFC: 背外侧前额叶皮层 (dorsolateral prefrontal cortex); IFG: 额下回 (inferior frontal gyrus); PMC: 运动前皮层 (premotor cortex); O₂Hb: 含氧血红蛋白 (oxygenated hemoglobin); rIFG: 右侧额下回 (right inferior frontal gyrus); lIFG: 左侧额下回 (left inferior frontal gyrus); dmPFC: 背内侧前额叶皮层 (dorsomedial prefrontal cortex); wPLI: 加权相位滞后指数 (weighted phase lag index); PFC: 前额叶皮层 (prefrontal cortex); hyper-tACS: 双人经颅交流电刺激 (hyper-transcranial alternating current stimulation); hyper-tDCS: 双人经颅直流电刺激 (hyper-transcranial direct current stimulation); hyper-tES: 双人经颅电刺激 (hyper-transcranial electrical stimulation); rTPJ: 右侧颞顶联合区 (right temporoparietal junction)。

2 灵活脑间同步的多层次发生机制

2.1 适应性的系统动力学基础: 元稳态与预测编码

从协调动力学 (coordination dynamics) 的视角来看, 大脑并非在完全整合与完全分离两种极端状态之间机械切换, 而是可能处于一种称为“元稳态” (metastability) 的动力学状态。Tognoli 和 Kelso [63] 指出, 元稳态的关键在于系统同时保留整合与自主的倾向: 不同功能单元既能够维持相对独立性, 又能够在需要时形成暂时性的协同。将这一观点拓展至社会互动层面, IBS 的适应性可能体现为互动系统中整合与自主两种倾向的动态平衡。一方面, 跨脑协调有助于共同注意、信息整合与行为协调; 另一方面, 同步减弱、阶段性解耦及任务后的自主加工, 则可能为个体保留独立的信息处理空间。因此, IBS 的适应性并不意味着同步程度持续增强, 而在于跨脑系统能够根据互动需求, 在不同耦合状态之间进行灵活调整, 以支持具有情境针对性的互动过程。

如果说元稳态为理解 IBS 为何能够在耦合与解耦之间动态变化提供了系统动力学视角, 那么预测

编码 (predictive coding) 则为理解这些变化可能如何产生提供了另一种理论解释。根据预测编码及自由能原理相关理论, 个体大脑持续利用内部生成模型预测即将到来的感觉输入, 并通过更新预测或采取行动来减少预测与实际输入之间的偏差, 从而支持知觉、行动与学习 [64-65]。在单脑层面, 预测误差反映内部模型的预测与实际感觉输入之间的不匹配; 在社会互动中, 预测对象还可能包括互动伙伴的动作、注意、意图及情绪线索等 [15, 66-67]。据此, 社会互动可以被理解为参与者持续预测彼此行为, 并依据实际互动结果调整自身预期与行为策略的过程。当一方的行为偏离另一方的预期时, 互动双方可能需要重新分配注意力、调整动作时序或改变表达与协作策略, 以应对由此产生的预测偏差。在这一框架下, IBS 的增强、减弱或状态转换可能反映互动双方在持续预测与调整过程中形成的跨脑协调变化。然而, IBS 并不等同于预测误差, 也不能仅凭其变化推断预测误差已经减小; 更谨慎的解释是, IBS 可能反映互动双方在相互预测与在线调整过程中形成的阶段性神经协调状态。

这一解释思路与近年来有关 IBS 机制的理论反思相呼应。Hamilton [37] 指出, 仅凭跨脑相干或一

致性指标, 难以区分互动特异性的神经协调与共同刺激、共同任务所引起的相似加工, 因此需要将互动行为、身体信号及参与者对彼此行为的预测纳入统一的解释框架。基于相互预测理论 (mutual prediction theory)^[37], 互动中的个体不仅需要表征自身行为, 还可能持续预测同伴的行为及其后续变化; 这种自我行为控制与他人行为预测的并行加工, 可能共同参与跨脑协调的形成。然而, 跨脑相干本身并不能证明双方正在进行相互预测, 也不能排除共同输入等其他解释。动物研究为这一思路提供了进一步的机制线索: 一项社会互动小鼠研究发现, 小鼠前额叶中存在分别编码自身行为与同伴行为的神经元群, 同时观察到跨脑神经活动相关^[68]。这一结果提示, 个体内部的自我-他人双重表征可能参与跨脑协调的形成, 但尚不能单独确定这种表征如何产生或维持 IBS。在人类研究中, Kayhan 等^[69]发现, 在自然化的“石头-剪刀-布”互动中加入显式预测指令, 并未进一步增强 IBS。这表明, 显式预测策略并不必然导致更强的 IBS; 互动中的 IBS 可能还取决于自发的相互预测、行为协调及其随互动进程发生的调整。

综上, 元稳态与预测编码分别从系统动力学和信息处理的角度, 为理解 IBS 的适应性提供了互补的理论视角: 前者强调互动系统如何在整合与自主之间保持动态平衡, 后者则提出, 参与者对彼此行为的持续预测及其更新, 可能参与驱动跨脑协调的实时变化。两者的结合提示, 适应性的关键不在于 IBS 是否持续增强, 而在于其能否随互动需求变化而灵活调整。然而, 目前将预测编码与 IBS 适应性直接联系起来的证据, 仍主要来自理论推演及与之相一致的间接研究结果。未来研究可通过操纵互动伙伴的行为可预测性、引入预期违背或虚假反馈等范式, 改变参与者对对方行为的预期, 并结合行为追踪、生理指标及 IBS 的时变分析, 检验预期偏差与 IBS 动态变化之间的时间关联。进一步结合适当的对照条件和方向性分析, 可以考察预测偏差的变化是否先于 IBS 调整, 以及这种关系能否排除共同输入等替代解释, 从而为预测过程参与 IBS 适应性调节提供更直接的证据。

2.2 经验性的候选机制: 再激活、巩固与社会学习

Sened 等^[70]将“脑间可塑性”界定为脑间耦合随短期或长期经验发生的依赖性变化, 为理解 IBS 从任务内形成、任务后残留到长期改变提供了

概念基础。本文所讨论的“经验性”与“脑间可塑性”在关注的问题上存在重叠, 均涉及既往经验相关的 IBS 变化, 但两者的概念定位有所不同。本文将经验性视为 IBS 灵活性的一个描述性维度, 重点关注互动经验或外部干预所引起的 IBS 变化能否在任务结束后持续存在、跨时间保持、在后续互动中重现或迁移, 以及这些变化与后续人际协调之间的关系, 而不预设其底层神经可塑性机制已得到直接验证。从神经生物学层面看, 如果 IBS 的经验相关变化能够长期保持, 其形成可能涉及互动者个体内的突触可塑性、神经回路重组及离线巩固等过程。然而, 现有超扫描研究直接观察到的主要是跨个体神经耦合的变化, 而非上述细胞与回路层面的机制。因此, 本文主要借鉴单脑学习与可塑性研究提出的理论框架, 对 IBS 的经验相关变化及其可能机制进行探讨, 并将这些解释视为有待检验的候选假说。

单脑学习研究表明, 训练或任务过程中被激活的神经活动模式, 可能在随后的静息或睡眠阶段再次出现或得到进一步加工, 并通过再激活 (reactivation) 与离线巩固 (offline consolidation) 等过程促进记忆保持及后续表现^[71-72]。借鉴这一思路可以推测, 互动过程中逐渐形成的经验相关 IBS 模式, 可能在互动结束后继续发生变化或在后续阶段再次出现; 如果这种变化能够跨越一定时间间隔保持, 并与后续协调表现相关, 则可能涉及经验的持续加工与巩固。与此相呼应, Mayo 和 Shamay-Tsoory^[15]在社会学习的动态互相预测模型 (dynamic mutual predictions during social learning) 中提出, 互动过程中获得的有关对方行为、心理状态及个体特质的信息, 可能在跨次互动之间经历“社会性巩固” (social consolidation), 使互动双方关于彼此的推断模型在反复交流中逐渐趋同, 从而促进相互理解与关系稳定。该框架为理解互动经验如何影响后续的社会预测及跨脑协调提供了理论线索, 但其所提出的社会性巩固过程仍需与 IBS 的具体动态变化相结合, 才能进一步检验其对跨脑协调的解释力。

现有研究为上述候选机制提供了初步线索。Schwartz 等^[52]采用 EEG 超扫描发现, 现场互动与随后分处不同房间观看互动录像时的额颞脑间网络同步相互关联。这一结果提示, 现场互动中形成的个体加工模式或双人协调特征, 可能与回放阶段的神经活动有关, 但尚不足以证明现场互动中的同一

神经模式在回放时发生了再激活。Shamay-Tsoory等^[48]比较了互动前后的IBS,发现涉及右侧额下回的连接在任务后较为稳定地表现出增强,而背内侧前额叶皮层-背内侧前额叶皮层以及左侧额下回-左侧额下回连接则在任务后减弱。研究者据此推测,部分任务后增强的IBS可能与社会相关信息的持续加工或巩固有关。然而,该研究直接揭示的是任务前后IBS的差异,并未直接测量再激活或离线巩固过程。未来研究可结合现场互动、延迟回放或回忆及再次互动范式,通过神经模式相似性分析检验互动中形成的特定神经模式是否在后续阶段重现;同时,可在尽可能匹配首次互动经历的基础上,操纵任务后的休息、干扰或睡眠条件,考察这些因素对延迟IBS及后续协调表现的影响,从而进一步区分任务后持续加工、模式再现与离线巩固等可能过程。

此外,任务前后不同脑间连接呈现增强或减弱并存的结果^[48],提示互动结束后并非所有任务期的IBS变化都会以相同方式延续。这种差异可能与不同脑区及连接在具体互动任务中的功能有关,但目前尚不能仅凭连接的变化方向确定其具体机制。上述研究采用共同节律化动作同步任务,涉及动作节律加工、动作观察及行为协调等过程;在这一任务背景下,右侧额下回相关连接的任务后增强,可能与部分互动信息的持续加工有关^[73]。相比之下,背内侧前额叶皮层通常与心智化、自我区分及意图推断等过程相关^[74-75],左侧额下回则参与动作理解、观察-执行映射以及语言或模仿相关加工^[21, 24]。一种可能的解释是,互动结束后,即时动作协调、意图监控及在线响应的需求发生变化,不同功能相关的脑间连接因而呈现不同的任务后轨迹。由此,任务后的同步增强与减弱不必被视为相互矛盾的现象,而可能反映互动结束后不同神经协调成分的差异化变化。

这种差异化变化可以借鉴单脑技能学习中的扩展-重整化模型(expansion-renormalization model)加以理解^[76]。该模型提出,学习初期神经系统可能出现较广泛的资源扩展,随后通过经验选择与效率优化,使部分与后续表现相关的神经成分得到保留,而其他成分则逐渐回落或重新组织。将这一思路类比到互动中的IBS,可以推测,在新任务或新关系形成的初期,跨脑耦合可能涉及共同注意、意图推断、时序协调及社会学习等多种过程;随着互动经验的积累,部分与关系形成、协作表现或学习

结果更为相关的协调模式可能持续存在,而另一些主要与即时任务要求相关的成分则可能随任务结束而减弱。需要注意的是,单脑技能学习中的神经资源扩展与重整化,涉及个体内神经活动及其组织方式的变化,与短时跨脑耦合在测量层级和时间尺度上均不相同,因此目前只能将该模型视为解释IBS差异化变化的类比性框架,而不能据此认定IBS已经历相同的重整化过程。未来研究可在重复互动中连续追踪任务期IBS的动态配置、任务后变化及延迟测量中的模式重现,并检验持续保留的协调模式是否能够预测后续行为表现,从而评估IBS是否存在与功能结果相关的选择性保留。

除再激活与巩固、扩展-重整化等解释路径外,关系学习理论也为理解IBS的经验性提供了另一种视角。Sened等^[70]在其脑间可塑性整合模型中,借鉴赫布可塑性(Hebbian neuroplasticity)及脉冲时序依赖可塑性(spike-timing-dependent plasticity, STDP)的思想,提出当互动双方相关脑区的活动在反复互动中以特定的时间关系共同出现时,双方的协调倾向或协同能力可能逐渐增强,并在一定条件下延伸至其他关系情境。该观点强调了重复共现、经验依赖性变化及潜在跨情境迁移之间的联系:互动中的同步可能不仅反映当下的协同过程,还可能随着重复互动而形成较为持久的关系相关协调倾向。但Hebbian可塑性与STDP的经典机制主要涉及个体内神经连接的变化,将其用于解释跨脑耦合的形成,仍属于跨层级的理论类比。后续心理治疗超扫描研究发现,患者-治疗师IBS随治疗进程逐渐增强,并与部分治疗结果相关^[50],为重复互动过程中IBS发生跨次变化提供了初步证据,但尚未直接验证Hebbian/STDP机制,也未证明相关变化在治疗结束后仍然保持或能够迁移至新的互动关系。未来研究可操纵重复互动中伙伴行为与反馈之间的对应关系,结合个体内神经活动与IBS的同步测量,并设置延迟测验及新伙伴互动,以检验协调变化的形成、保持与迁移。至于Hebbian/STDP是否参与这一过程,则仍需借助能够直接检验个体内神经可塑性的测量或干预加以验证。

综上,IBS的经验性可能涉及互动经验累积过程中形成的历史依赖性变化,其候选机制包括互动相关神经模式的再激活与巩固、不同协调成分的差异化保留,以及重复互动所支持的关系学习与协调倾向形成。这些机制并非彼此排斥,也不必然构成固定的先后链条。更重要的是,经验相关的IBS变

化并不意味着互动系统脱离了整合与自主之间的元稳态平衡;相反,既往互动经验或外部干预可能改变系统后续的耦合倾向、状态转换方式及协调模式的稳定性,从而影响其不同互动需求下的动态调节。需要强调的是,再激活与巩固假说、社会性巩固框架、扩展-重整化模型以及基于Hebbian/STDP的类比性解释,目前均应被视为理解IBS经验性的候选机制,而非已经得到直接验证的神经生物学机制。

2.3 脑间同步灵活性的神经生物学约束

近年来,研究者开始尝试将IBS与神经递质系统、细胞类型及基因表达模式联系起来^[77-79]。Gordon等^[80]提出的灵活多模态同步框架也强调,社会互动中的同步与解耦并非由单一层级的机制决定,而是个体差异、关系变量及情景属性等多个层面的因素共同作用的结果,反映了促进同步与促进分离的不同力量之间的动态平衡。从这一视角来看,IBS的灵活性既可以被理解为元稳态系统在宏观层面的动态组织,也可能受到分子、细胞及基因等个体生物学因素的约束。

然而,现有研究主要揭示了神经生物学因素与IBS本身或其个体差异之间的关联,尚未直接阐明这些因素如何影响IBS的适应性与经验性。例如,催产素受体基因(oxytocin receptor gene, *OXTR*)的甲基化水平与亲子竞争任务中的IBS相关,提示与社会行为相关的表观遗传差异可能与特定互动情境下的跨脑协调有关^[78]。此外,有研究者整合超扫描元分析、功能连接分析与分子数据库,发现IBS的空间分布与 γ -氨基丁酸能(γ -aminobutyric acid, GABA)神经传递、皮层第IV/V层神经元回路、发育相关基因表达模式及神经发育障碍相关基因富集存在关联^[77]。这些发现为理解IBS的神经生物学基础提供了线索,但尚不能直接说明相关因素如何影响IBS对当前互动需求的响应,或如何塑造既往经验对后续跨脑协调的影响。

尽管上述生物学因素未必直接决定IBS的灵活性,但更广泛的社会神经科学研究为提出相关机制假说提供了依据^[81-84]。例如,多巴胺系统参与奖赏预测误差、社会强化学习及动机更新,因此可能通过影响个体对互动结果的评估、协作动机及行为策略调整,间接参与IBS的适应性调节;血清素系统则与情绪调节、抑制控制及行为灵活性等过程有关,因而可能通过影响个体对社会线索的反应及其行为选择,改变互动中维持同步或转向相对独立加

工的倾向。需要强调的是,这些推论目前主要建立在神经递质系统与一般社会认知、情绪及行为调节之间的研究基础上,尚缺乏直接证据证明多巴胺或血清素系统特异性地调节IBS的适应性或经验性。因此,更审慎的观点是,这些生物学因素可能通过影响社会知觉、奖赏加工、情绪调节及学习等基础过程,为IBS灵活性的形成与表达提供下位约束条件。未来研究可结合多模态超扫描、神经生物学指标及行为测量,进一步检验这些因素是否通过上述过程影响IBS的在线调节、任务后保持及跨次变化,并明确其作用发生的层级与时间尺度。

综上,适应性体现了IBS对当前互动需求的在线调节,经验性则体现了既往互动经验或外部干预对后续耦合倾向与协同模式的潜在重塑。元稳态为理解这两类变化提供了上位动力学视角,即系统如何在整合与自主性之间动态权衡,并据此调整其协调状态及状态转换。神经生物学因素则可能通过影响个体的社会感知、行为调节与学习过程,为这种灵活性在不同个体、关系及发展阶段中的差异提供底层约束。鉴于现有解释仍主要基于理论整合与间接证据,未来需要结合实验操纵、纵向追踪及多层次测量,进一步检验这些机制及其相互关系。

3 脑间同步灵活性的量化

IBS灵活性的量化首先需要明确研究所检验的效应及其判定依据。对于适应性,应围绕互动需求变化、角色转换或关键反馈等事件设置时间窗口,考察IBS是否随当前互动需求发生相应变化,并结合行为调整与互动结果评估其功能意义。一般性的时间波动、条件间均值差异或状态转换频率增加,均不足以单独证明IBS具有适应性。对于经验性,则需区分经验形成阶段与效应检验阶段:在设置可比的前测与对照条件后,应于经验形成或干预结束后进行独立测量,以检验既往经验是否改变后续IBS,并尽可能排除共同输入、生理变化及信号分析窗口跨越阶段边界等因素的影响。任务内IBS的变化可为经验形成提供初步线索,即时残留可支持短时经验相关效应,但均不能单独证明改变的长期保持、离线巩固或特定可塑性机制。进一步结合延迟测量、重复互动及更换任务或伙伴后的测试,可分别考察效应的跨时保持、先前同步模式的再次出现,以及经验效应向新情境的迁移。在明确实验设计与效应判定标准后,可根据研究问题选择相应的分析方法与量化指标(表2)。适应性主要可通过

IBS的连续时间轨迹、状态转换、方向性关系及网络结构重组等指标加以刻画；经验性则可通过前后测IBS差值、跨次变化轨迹，以及后续互动中先前

同步模式的重现程度等指标进行评估。需要强调的是，指标本身并不直接决定其所反映的灵活性维度。

表2 脑间同步灵活性的潜在量化指标

Table 2 Potential quantitative measures of inter-brain synchrony flexibility

维度	量化焦点	主要指标/方法	适用设计与注意事项
适应性	任务内轨迹与波动	滑动窗口IBS；斜率；方差/变异系数；递归/分形指标	适合连续互动任务；需将IBS轨迹与任务阶段、互动事件或行为表现对齐
	状态切换	同步状态种类；状态出现率；状态转换率；驻留时间	适合阶段性互动、策略转换和群体协作任务；需避免过度解释数据驱动状态
	方向性、时滞与动态网络	格兰杰因果；相位传递熵；互相关时滞；网络强度、模块化、中心性、跨脑枢纽	适合教师-学生、说话者-听话者、领导-追随等多人互动情境
经验性	形成性增强与即时残留	增长斜率；前段-后段比较；任务后残留耦合；前后测基线差值	任务内增强本身不等于经验性改变；需证明先前互动经验改变了随后同步或行为关联
	再激活	模式相似性；状态重现率；跨次网络相似度	适合重复互动、相同对象再次互动
	跨时间保留与纵向维持	延迟后测差值；保留变化量；纵向增长斜率；维持斜率	适合训练、干预、心理治疗和发展追踪；需控制基线差异

3.1 适应性的量化

3.1.1 连续时间轨迹与动态波动指标

适应性的量化首先需要从连续神经信号中提取任务内IBS时间序列。根据数据模态、目标频段及研究问题，可在连续或滑动时间窗内计算相关、相干、小波相干或相位同步等指标，并将所得IBS轨迹与任务阶段、互动事件、策略变化及行为表现进行时间对齐^[42, 85-86]。时间窗的设置需要综合考虑目标频率在窗口内所包含的周期数、同步估计的稳定性及目标过程的时间尺度，以权衡时间分辨率与频率分辨率^[87-89]。EEG和MEG支持较高时间分辨率的动态分析，但对低频同步的估计仍需要足够长的时间窗；采用fNIRS或fMRI时，则需考虑血流动力学反应的迟滞及其相对缓慢的变化特征^[90]。

获得IBS时间序列后，可进一步考察同步变化的方向、速度及阶段性趋势，以描述同步水平是在增强、减弱还是相对稳定。具体而言，相邻时间窗的IBS差值可用于刻画局部变化幅度，局部斜率则可通过对一段连续时间窗内的IBS轨迹进行拟合，描述特定时段内同步变化的总体趋势。已有研究开始将斜率作为IBS时间动态的重要特征之一^[91]。这些指标反映的是同步变化的幅度与速度，其数值还会受到时间窗长度、步长及信号噪声等因素影响。因此，只有将其与具体互动事件或需求变化相联系，才能进一步判断这些动态变化是否体现了对当前互动需求的调节。

除变化方向与速度外，还可通过标准差、方差

等指标描述IBS时间序列的波动幅度；在均值适宜且具有明确解释意义时，也可使用变异系数衡量相对波动程度。Gordon等^[80]提出的滑动窗口交叉相关（windowed cross-correlation, WCC）体现了这一思路：该方法通过在连续滑动窗口内计算互动双方神经信号的交叉相关，得到随时间变化的相关系数序列。其平均值可反映整体同步水平，而方差或标准差则可刻画同步水平的波动性。IBS波动较小可能意味着同步水平相对稳定，波动较大则表明同步水平随时间发生了更明显的变化，但二者本身均不能直接判定系统是否具有适应性。Gordon等^[80]的再分析发现，WCC方差在平均同步水平之外，还能预测群体凝聚力，提示波动性指标可能提供传统平均同步指标无法充分揭示的信息。当然，这一结果并不意味着波动越大，互动适应性就越强；波动的功能意义仍需结合具体情境及行为结果加以判断。

进一步而言，适应性不仅涉及同步水平变化多少、变化多快，还可能涉及这些变化是否具有一定的时间组织结构。递归量化分析及其分形扩展方法可用于考察IBS时间序列中的状态重复、动态规律性及跨时间尺度的组织特征。Gordon等^[80]采用分形递归量化分析（fractal-based recurrence quantification analysis, fARQA），通过递归率（percentage recurrence, %REC）及其随时间尺度变化的幂律特征，刻画同步时间序列的递归结构与分形动态特征。其中，%REC表示系统状态重复出

现的程度; 分形指数或颜色噪声特征则可用于描述时间序列在不同时间尺度上的波动组织方式。相关指标有助于区分不同类型的动态结构, 但其具体含义取决于分析方法及参照模型, 不能简单地将某一种分形特征等同于最优的适应状态。

近期, Réveillé 等^[91]使用了递归量化分析中的确定性比例 (percentage determinism, %DET), 以表征 IBS 时间序列中递归模式的组织程度。具体而言, %DET 表示递归图中构成对角线结构的递归点占全部递归点的比例; 较高的 %DET 通常表明相似状态沿时间轨迹持续出现, 形成较为连续的递归结构, 而较低的 %DET 则表明此类结构所占比例较低。需要强调的是, %DET 衡量的是时间序列的递归确定性, 而非适应能力本身。高度确定的动态模式既可能反映稳定、有组织的协调, 也可能反映缺乏灵活性的重复模式。因此, 要将递归或分形指标用于 IBS 适应性的评估, 还需进一步检验这些动态组织特征能否随互动需求变化而调整, 以及这种调整是否与有效的行为协调或互动结果相关。

3.1.2 状态转换指标

状态分析通过将连续 IBS 特征划分为若干可重复识别的离散状态, 考察不同同步状态的出现、维持及转换规律。当研究聚焦于单一脑区对或特定频段时, 可将各时间窗内的同步值作为观测变量; 当涉及多个脑区、频段或多人互动时, 则可将多个脑区对或网络边的同步值整合为特征向量, 以表征每个时间窗内的整体脑间耦合模式^[42]。随后, 可采用 k 均值聚类数据驱动方法识别具有代表性的状态, 并结合轮廓系数、聚类稳定性及结果的可解释性确定状态数^[17, 42, 85]。例如, 一项研究结合动态 IBS、 k 均值聚类与图论分析, 识别出群体协作创意生成过程中的低效态、低耦合态和高整合态 3 种脑间状态^[17]。

识别状态后, 可进一步提取状态出现率、状态转换率和驻留时间等指标^[17, 42], 分别刻画不同状态在任务中的相对占比、状态序列的转换频率, 以及系统连续维持某一状态的时长。这些指标从不同侧面描述 IBS 的动态组织特征, 为分析其适应性提供量化依据。首先, 状态出现率反映某一状态在整个任务过程中所占的比例。例如, 高同步态或高整合态的出现率较高, 说明系统在观测期间较多地处于该状态; 低同步态或低耦合态占比较高, 则表明系统更多处于相对弱耦合的状态。但状态的功能意义取决于任务要求, 较高同步或整合并不必然意味

着更有效的互动。其次, 状态转换率反映状态序列中发生转换的频率, 可用于描述同步模式的动态变化程度。较高的转换率可能反映系统能够灵活切换协调模式, 也可能反映状态不稳定或受到噪声干扰; 较低的转换率则可能反映有效协调模式的稳定维持, 也可能意味着系统难以根据互动需求调整。因此, 转换率本身不能直接等同于适应性。最后, 驻留时间反映系统连续维持某一状态的时长, 通常可根据该状态连续出现的窗口数及窗口步长进行估算。较长的驻留时间可能表明某一协调模式得到持续维持, 较短的驻留时间则表明系统较快离开该状态。两者的适应性意义同样取决于具体状态的功能, 以及其持续时间是否与当前任务需求相匹配。

一项基于 EEG 超扫描的研究发现, 在社会决策过程中, 公平或接受等有利互动条件与有效脑间状态出现率较高、状态转换率较低相关, 而不公平或拒绝等不利条件则呈现相反的模式^[41]。这一结果提示, 互动情境可能影响脑间状态的分布及转换规律, 且在特定任务中, 较稳定地维持有效协调状态可能与更有利的互动过程相联系。该发现并不意味着减少状态转换普遍有益, 也不能单凭这些指标确定脑间状态变化对合作表现或收益的因果作用。要进一步将状态动力学解释为适应性, 还需考察状态转换是否与关键互动事件相对应、状态变化能否预测后续行为, 以及系统能否根据任务要求在不同协调模式之间进行适当切换。

3.1.3 方向性、时滞与动态网络指标

关系神经科学的研究视角正从双人之间的 IBS 扩展至多人互动中的跨脑关系及其群体组织结构, 包括个体间的耦合、个体与群体之间的关系, 以及群体内部不同角色之间的动态联系^[92-93]。因此, 除同步强度与状态转换外, 还需要引入能够刻画时序先后、方向性预测关系及网络结构变化的指标, 以进一步考察不同脑间状态如何形成和转换, 以及互动双方或群体成员之间的神经耦合如何随角色分工和互动进程而变化。在具有明确角色分工的互动中, 可以重点分析双方神经活动的时序关系及其方向性预测关系。例如, 格兰杰因果 (Granger causality) 用于检验一方神经活动的过去值是否能够在另一方神经活动历史信息的基础上, 进一步提高对后者当前活动的预测能力, 从而刻画时间序列之间的方向性预测关系^[5]; 相位传递熵 (phase transfer entropy) 则可基于相位时间序列估计不同方向上的信息传递关系, 为分析脑间相位动态的方

向性提供补充^[93]；互相关时滞（cross-correlation lag）通过确定互相关函数达到峰值时对应的时间滞后，描述两方神经活动在时间上的相对领先或滞后关系^[93]。这些指标有助于刻画教师与学生、说话者与听话者，以及领导者与追随者之间的时序协调关系^[39]，并进一步探索角色分工与互动进程是否与脑间状态转换的方向性特征相关。需要强调的是，方向性预测、信息传递与时间领先并不等同于真实的因果驱动，其解释还需考虑共同输入、信号自相关、非平稳性及其他潜在混杂因素。

对于多人互动，IBS灵活性的量化还可扩展至跨脑网络的动态重构。通过整合多个互动者之间的脑间连接，可构建超脑网络，并运用图论指标从整体及局部层面刻画网络组织随时间的变化^[94-95]。常用指标包括网络强度、模块化、节点中心性及跨脑枢纽节点等，分别反映网络连接的总体水平、功能分组特征、节点在网络中的相对重要性，以及跨越不同互动者或网络模块的关键连接位置。这些指标可用于检验互动情境变化是否伴随群体神经协调结构的重新组织。例如，一项研究采用EEG超扫描同步记录4名专业吉他手与4名观众的神经活动，构建超脑网络并结合图论分析，比较音乐演奏与鼓掌条件下的网络动态^[96]。研究发现，音乐结构与超脑网络动态之间存在双向格兰杰预测关系，且网络模块化在演奏期间相对稳定、在鼓掌期间则表现出更大的变化。该结果提示，群体神经网络的组织方式可能随互动情境而改变。

3.2 经验性的量化

3.2.1 形成性增强与即时残留

经验性的量化首先需要区分两个层面：一是互动过程中随经验累积而逐步形成的同步倾向，二是互动结束后仍可检测到的同步变化。前者发生于任务内部，但其关注点并非一般性的任务内波动，而是IBS是否随互动推进呈现持续增强、后段高于前段，或其早期变化能否预测后续的行为同步、合作表现及关系结果^[47]。此类变化可借鉴适应性量化中的连续时间轨迹分析，但解释重点应从同步对当前互动需求的即时响应，转向同步模式是否可能随互动经验的积累而逐步形成。例如，可比较互动前后不同阶段的IBS水平、估计同步轨迹的增长斜率，或检验早期IBS特征能否预测后续行为同步与互动质量，以评估任务内同步增强是否呈现经验累积的特征。

相比之下，任务后即时残留旨在检验互动诱发

的IBS变化是否延续至当前互动时段之外。根据研究设计，可通过任务后残留耦合（post-task residual coupling）或前后测差值（pre-post difference）进行量化。前者关注任务结束后IBS相对于任务期间或任务前参照水平的变化，侧重描述互动结束后的即时残留；后者则比较任务后与任务前基线的IBS水平，考察互动前后基线状态是否发生改变^[48]。例如，一项EEG超扫描研究采用“前测静息态-积极面对面互动-后测静息态”的设计，发现母亲与青少年互动后额颞网络的静息态IBS高于互动前基线，提示积极互动后存在短时的IBS残留效应^[19]。

在做出IBS经验性推断的结论前，还需要注意，前后测基线差异并不必然意味着形成了稳定的经验性改变。如果任务后测量紧接互动进行，观察到的差异仍可能反映情绪延续、共同情境的持续影响或生理状态变化。此外，若研究未明确区分任务结束后的动态恢复期与相对稳定的后测基线期，任务后残留耦合与前后测基线差值在操作上可能重合。因此，研究应明确测量时点、参照条件及信号分析窗口，并结合适当的对照设计，审慎判断互动后IBS变化所能支持的经验性推断。

3.2.2 跨时间保留与纵向维持

若要进一步检验IBS经验性效应能否跨时间保持，需要在延迟后测或追踪测量中考察先前观察到的同步变化是否仍然存在。因此，相关研究除前测与即时后测外，还应设置延迟后测或多次追踪测量^[5]。一种方法是比较延迟后测与前测的IBS水平，以检验一段时间后同步水平是否仍偏离初始基线；另一种方法是比较即时后测与延迟后测之间的变化，以考察即时效应在后续测量中是否减弱。但需注意，仅凭即时后测与延迟后测的差异，尚不能确定变化保留的程度，还需结合前测基线、对照条件及测量误差进行综合判断。例如，若延迟后测的IBS仍高于前测，且这一差异相对于对照条件更为明显，则可为经验相关变化的跨时间保持提供更有力的证据。

在更长的时间尺度上，还可通过纵向增长轨迹与维持趋势刻画IBS随互动经验或训练进程的变化。研究者可以在多次互动、训练或干预阶段重复测量IBS，并采用线性混合模型或潜在增长曲线模型估计其随时间或互动轮次变化的轨迹。若IBS随时间呈持续上升趋势，可能反映同步倾向逐渐增强；若增长趋于平缓，则可能提示变化进入平台

期;若同步水平下降,则可能反映初期变化未能持续,也可能与任务熟练化、策略自动化或后续互动对同步的需求降低有关。因此,纵向斜率应结合任务阶段、互动条件及行为表现进行解释,而不能仅凭斜率的正负判断经验性效应的强弱。对于经验性的检验,尤其需要区分同步水平随互动进程的变化与互动结束后同步变化的维持,避免将任务内增长直接视为跨时间保持的证据。

除同步水平的持续保持外,经验性还可能表现为先前形成的同步模式在后续互动中更容易再次出现。这一思路与记忆研究中的神经再激活及表征重现框架相呼应,即先前经验中形成的神经活动模式可能在之后的提取或相似情境中再次表达^[97-98]。已有研究发现,先前的同步经验能够增强随后教学互动中的IBS^[51],为互动经验影响后续脑间协调提供了初步证据。未来研究可进一步比较初次互动与后续互动中IBS的建立速度、特定同步状态的重现概率,以及跨脑连接模式的相似程度,以检验既往经验是否改变特定协调模式在后续互动中的出现倾向。

在多脑区或多人协作研究中,经验性效应也不一定表现为某一条跨脑连接的持续增强,还可能体现为跨脑网络组织方式的保持或重构。例如,某一跨脑枢纽节点在延迟测量中仍保持相对较高的中心性,某一网络模块在再次互动时更容易重现,或网络整体效率在训练后持续发生变化。因此,可结合节点中心性、网络效率、模块结构及枢纽节点的跨时稳定性等指标,区分单一连接强度的变化与整体跨脑网络组织方式的持续改变。这一分析视角有助于考察不同脑区间的协调关系是否具有不同的保持轨迹,并为理解经验相关的跨脑网络变化提供更丰富的量化依据。

3.3 小结

IBS灵活性的量化不仅取决于所选指标,还受到数据特征、分析参数及研究设计的共同制约。分析窗口长度、频率功率与信噪比的差异均可能影响IBS估计^[99]。例如,共同输入或相似的信号节律可能产生表观耦合^[100];即使真实耦合关系未发生变化,有限窗口内的采样波动及信号频谱特征也可能导致连接估计随时间出现表观变化^[44, 101]。此外,不同方法在时间分辨率、频率特异性、噪声敏感度及计算复杂度等方面各有特点(表3),其适用性取决于研究问题、数据模态及目标效应的时间尺度。例如,连续时间轨迹和状态转换分析有助于

刻画任务内动态变化,但对窗口设置、状态划分及信号质量较为敏感;方向性与动态网络分析能够进一步描述跨脑关系的时序组织及群体网络重构,但通常需要更复杂的参数估计与模型验证;跨次模式比较和纵向建模则有助于检验经验相关变化的保持与重现,但其解释依赖测量时点、对照条件及跨次数据的可比性。

更重要的是,现有量化方法大多直接刻画IBS的变化幅度、波动程度、状态转换或网络组织,尚不能单凭这些指标判定系统是否具有适应性或经验性。时间波动可能源于噪声、共同输入或非平稳信号特征;状态转换增加既可能反映灵活调节,也可能反映协调不稳定;跨时模式相似则不必然意味着既往神经模式得到再激活。因此,IBS灵活性的识别需要将量化指标与具体互动事件、行为表现及经验形成后的独立测量相结合,并依据研究问题区分在线调节、短时残留、跨时间保持与跨情境迁移等不同效应。在方法选择与统计分析中,还应综合考虑时间分辨率、估计可靠性和计算资源,尽可能控制共同输入及生理混淆,恰当处理信号非平稳性,并结合与零假设相匹配的替代数据检验及参数稳健性分析^[44, 99],从而提高IBS灵活性研究的可靠性与可解释性。

4 总结与展望

社会互动中的跨脑协调并非稳定维持在某一水平,而是受到当前互动需求与既往互动经验的共同影响。本文以IBS灵活性为框架,从不同时间尺度上的表现、候选机制和量化路径3个方面进行了系统讨论。现有研究表明,IBS的强度、时滞及空间配置会随互动目标、任务阶段、角色分工、策略和反馈而变化^[17, 40-41];单次互动、前置同步、重复训练和神经刺激也可能影响任务结束后或后续互动中的IBS^[48, 51, 57],而关系发展与早期照料经历则与长期同步倾向相关^[60-61]。这些发现提示,IBS所反映的跨脑协调具有互动需求依赖性和互动历史依赖性,不能被视为脱离具体情境而固定不变的关系属性,也不能简单归结为“互动越深入,同步越强”。在共同目标建立、信息整合或误差修正阶段,较强耦合可能有助于共享加工;而在独立生成、互补分工或协作逐渐熟练后,较弱耦合或暂时解耦也可能具有适应性功能^[17, 38]。因此,理解IBS的功能意义,关键不在于同步水平或状态转换频率本身,而在于跨脑协调能否随互动需求进行恰

表3 脑间同步灵活性主要量化方法的比较

Table 3 Comparison of major methods for quantifying inter-brain synchrony flexibility

量化方法及代表指标	时间分辨率/测量时间尺度	频率特异性	噪声敏感性
连续轨迹与波动分析：滑动窗口 IBS、局部斜率、方差及标准差 ^[44, 102]	受IBS估计窗口及趋势拟合时段限制；减小步长增加轨迹采样密度，需考虑窗口及平滑所限定的有效分辨率	由基础IBS估计及其频段设置决定	估计误差与漂移可造成表观波动；短窗估计可能不稳定
递归量化及分形扩展分析：递归率、确定性及递归线结构 ^[103]	由输入序列的采样时间、嵌入延迟及分析时段决定	本身不分解频率；由输入信号或IBS序列的频段决定	噪声可改变递归点及线结构；结果对递归阈值及嵌入参数敏感
状态识别与转换分析：状态出现率、转换率及驻留时间 ^[41, 104]	受输入特征的有效分辨率及状态赋值间隔限制	本身不分解频率；由输入信号或IBS序列的频段决定	估计误差可影响状态划分及转换率；结果对状态数及划分方法敏感
时滞相关分析：互相关峰值及对时滞 ^[40, 102]	时滞网格通常由采样间隔决定；动态分辨率受估计窗口限制	本身不分解频率；可分析预先提取的频段信号	噪声可扰动峰值及位置；共同趋势、自相关及周期性可干扰时滞识别
格兰杰因果分析：方向性增量预测及其变化 ^[105]	动态分辨率受拟合窗口限制；历史信息范围由采样间隔及模型阶数决定	时域实现不分解频率；频域实现可区分频率	观测噪声可影响方向性估计；平稳性及模型失配可造成偏差
相位传递熵分析：方向性相位依赖及其变化 ^[106]	受相位提取及估计窗口限制；概率估计需足够样本	由相位提取所针对的频率或频段决定	相位估计误差及有限样本可影响方向性估计
动态网络分析：网络强度、模块化、节点中心性及模块结构变化 ^[96, 107]	受基础连接估计的有效分辨率及网络更新间隔限制	由连接估计方法及频段设置决定	连接误差可传播至网络指标；结果对阈值、网络密度及节点定义敏感
残留与保持分析：前后测、延迟测量差值 ^[48]	由测量阶段及延迟间隔决定；阶段内估计受IBS窗口限制	由基础IBS估计及频段设置决定	差值包含各次测量误差；跨次数据质量变化可影响结果
跨阶段/跨次模式比较：跨次模式相似性、网络相似度及状态重现率 ^[96, 108]	比较间隔决定检验时间尺度；模式定位受基础IBS估计限制	由输入模式所包含的频段特征决定	测量噪声及跨次特征不一致可影响相似性；状态定义变化可影响重现率
纵向轨迹建模：跨次变化斜率及轨迹形态 ^[18, 109]	由测量次数、间隔及追踪时长决定	模型本身不分解频率；可对频段分别建模	测量误差、异常值及跨次数据质量变化可影响轨迹估计

当调整，以及互动中形成的经验能否影响后续协调及其行为结果。

尽管如此，现有证据仍不足以明确IBS动态变化的功能及其作用机制。IBS究竟是互动调节的原因、结果，还是与互动过程共同变化的伴随现象，目前尚无一致结论^[5, 37, 110]。多数研究仍以条件均值、同期相关或有限时间点的比较为主，任务内动态、任务后残留、跨次变化和长期同步倾向等证据则主要来自不同样本与实验范式，尚难据此重建跨时间尺度的连续变化轨迹^[40, 47, 57, 110]。此外，IBS本质上是双方神经信号之间的统计关系，共同刺激、共同动作、语音节律、生理波动及测量噪声均可能产生表观耦合；数据驱动方法识别的状态也不等同于可直接观察的离散神经生理状态^[5, 44-45]。时滞、方向性统计及中介分析能够为机制解释提供线索，但仍不足以单独排除共同输入、自相关等混杂因素，因而不能仅凭统计关联确定IBS与行为变化之间的因果方向。未来研究需要结合互动过程的连

续追踪、针对关键变量的实验操纵及多模态测量控制，提高机制推断的可靠性，并进一步整合不同时间尺度上的动态证据。在此基础上，应分别检验IBS的适应性与经验性，并评估该框架在教育 and 临床等领域的潜在应用价值。

在适应性方面，未来研究应重点考察IBS如何响应当前互动需求、这种响应是否与双方的行为调整相对应，以及需求匹配程度是否与互动结果相关。研究设计可在尽可能控制刺激内容和行为输出差异的条件下，于同一配对内交替设置共享加工、独立加工和互补分工等阶段，并通过角色交换、伙伴行为偏差或反馈时延等操纵引入可控的互动需求变化。通过比较不同条件下IBS的动态轨迹、状态转换及其与行为表现的关系，可以进一步检验跨脑协调是否随互动需求发生相应调整，以及这种调整是否与互动绩效相关。对于多人互动而言，关键问题不仅是个体之间“是否同步”，还包括“谁与谁同步”“谁的活动在时间上领先”以及同步关系是

否随角色和群体结构而重组^[39, 111]。因此, 未来可借助多人超扫描技术, 在课堂互动、团队协作和群体决策等情境中, 考察个体如何根据群体动态调整同步对象、协调模式和时滞, 进一步揭示群体层面跨脑协调的动态组织规律。

在经验性方面, 未来研究应考察互动中形成的、与成功协调相关的IBS模式是否会影响后续互动, 以及这种影响能否带来相应的行为收益。可采用“互动前基线-首次互动-互动后测量-延迟测量-后续互动”的多阶段设计, 结合即时、延迟及跨次测量, 区分互动结束后的短时残留、跨时间保持、既有模式的再次出现和向新情境的迁移。例如, 可在首次互动后立即测量IBS, 并于24 h后或数周后安排延迟测量与再次互动; 若关注睡眠巩固相关过程, 还可根据研究问题设置睡眠前后的测量时点。通过比较不同时间点的IBS水平、动态模式及相应行为表现, 可进一步检验经验相关变化的持续性与情境适用范围。发展研究也不应仅比较不同年龄组的平均同步水平, 还应关注IBS对互动需求的响应速度、状态转换特征及其随发展变化的规律。例如, IBS的需求依赖性调整是否随年龄增长而发生变化, 以及儿童和青少年时期的互动经验是否与后续IBS调节方式存在关联, 均值得进一步检验。此类研究有助于描绘IBS灵活性的发展轨迹, 并在纵向设计和适当控制条件下, 进一步区分神经成熟、互动经验及二者相互作用的可能贡献。

在应用层面, IBS灵活性可为优化教育互动与社会学习提供理论参照。已有研究发现, IBS与共同注意、理解对齐、学习投入及知识传递等过程相关^[8, 40, 112], 但IBS增强并不必然带来更好的学习成绩^[51]。因此, 教育情境中的IBS研究不应局限于比较不同教学条件下的平均同步水平, 还应关注跨脑协调如何随教学阶段和学习需求动态调整, 以及这种调整是否与即时理解、记忆和后续学习表现相关。具体而言, 可在标准化教学活动中设置讲授、提问、独立作答和反馈等阶段, 操纵材料难度或教师支持程度, 并同步记录教师言语、师生眼动、认知负荷及学习表现, 从而考察IBS模式如何随教学需求变化, 以及这种变化能否预测学习结果。鉴于师生IBS的跨时变化可能比单一时点的同步水平更能预测成绩进步^[113], 未来还可设置教学前、教学过程中及教学后的多阶段测量, 检验IBS动态变化与学习进步之间的关系。通过将跨脑协调的动态特征与具体教学过程及学习结果相联系,

IBS灵活性有望成为理解教学互动机制、优化协作学习设计的一个补充性指标, 但其增量预测价值与实际应用效用仍需进一步验证。

最后, 临床领域也为IBS灵活性框架的应用提供了值得探索的方向。现有超扫描研究多关注临床群体在社会互动中的IBS水平差异^[28, 34, 114], 对于互动困难具体发生在哪些环节, 以及这些困难是否涉及跨脑协调的动态调节或经验相关变化, 仍缺乏系统证据。基于IBS灵活性框架, 未来可探索区分适应性与经验性方面的潜在困难: 前者可能表现为难以根据互动需求恰当地进入、维持或退出某种耦合状态; 后者则可能表现为重复互动或训练引起的IBS变化难以保持、重现或迁移。针对不同的潜在困难, 可通过纵向追踪和对照干预, 评估神经反馈、社会协调训练及心理治疗对IBS动态特征的影响, 并检验这些变化是否伴随社会功能改善。近期提出的多脑神经反馈框架将训练目标区分为信号、功能和系统3个层级, 强调应根据目标社会功能选择相应的训练指标与反馈目标^[115]。这一思路提示, 干预目标不宜局限于普遍提高IBS水平, 而应进一步关注跨脑协调与具体互动需求的匹配程度。效果评估还应纳入社交技能、共情、关系质量和社会归属感等行为与社会功能指标, 以检验IBS灵活性相关变化是否与临床获益相关, 并进一步评估其作为干预靶点或疗效指标的可行性。

参考文献

- [1] Hasson U, Frith C D. Mirroring and beyond: coupled dynamics as a generalized framework for modelling social interactions. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2016, **371**(1693): 20150366
- [2] Redcay E, Schilbach L. Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction. *Nat Rev Neurosci*, 2019, **20**(8): 495-505
- [3] 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
- [4] Holroyd C B. Interbrain synchrony: on wavy ground. *Trends Neurosci*, 2022, **45**(5): 346-357
- [5] 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
- [6] Babiloni F, Astolfi L. Social neuroscience and hyperscanning techniques: past, present and future. *Neurosci Biobehav Rev*, 2014, **44**: 76-93
- [7] 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
- [8] Pan Y, Dikker S, Goldstein P, *et al.* Instructor-learner brain coupling discriminates between instructional approaches and predicts learning. *Neuroimage*, 2020, **211**: 116657
- [9] Zhao Q, Zhao W, Lu C, *et al.* Interpersonal neural synchronization during social interactions in close relationships: a systematic review and meta-analysis of fNIRS hyperscanning studies. *Neurosci Biobehav Rev*, 2024, **158**: 105565
- [10] 巩芳颖, 孙逸梵, 贺琴, 等. 教学互动中师生脑间同步性及其调节因素. *心理科学进展*, 2025, **33**(3): 452-464
- Gong F Y, Sun Y F, He Q, *et al.* *Adv Psychol Sci*, 2025, **33**(3): 452-464
- [11] Wang Y, Peng K, Zhang Y, *et al.* Neural mechanisms of role reversal in improvisational music psychodrama: an fNIRS hyperscanning study. *Brain Sci*, 2025, **15**(11): 1235
- [12] Pesquita A, Whitwell R L, Enns J T. Predictive joint-action model: a hierarchical predictive approach to human cooperation. *Psychon Bull Rev*, 2018, **25**(5): 1751-1769
- [13] Schmidt R C, Richardson M J. Dynamics of interpersonal coordination[M]//*Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 281-308
- [14] Tognoli E, Zhang M, Fuchs A, *et al.* Coordination dynamics: a foundation for understanding social behavior. *Front Hum Neurosci*, 2020, **14**: 317
- [15] Mayo O, Shamay-Tsoory S. Dynamic mutual predictions during social learning: a computational and interbrain model. *Neurosci Biobehav Rev*, 2024, **157**: 105513
- [16] Bevilacqua D, Davidesco I, Wan L, *et al.* Brain-to-brain synchrony and learning outcomes vary by student-teacher dynamics: evidence from a real-world classroom electroencephalography study. *J Cogn Neurosci*, 2019, **31**(3): 401-411
- [17] Cheng S, Zhang W, Xie C, *et al.* Communication modality modulates dynamic switching between neural coupling and decoupling during group creative ideation. *NeuroImage*, 2026, **326**: 121707
- [18] Moffat R, Dumas G, Cross E S. Social interactions between people of same and different generations shape longitudinal changes in interpersonal neural synchrony, loneliness, and social connection. *PLoS Biol*, 2026, **24**(8): e3003899
- [19] Schwartz L, Levy J, Salomonski C, *et al.* Social interactions between attachment partners increase inter-brain plasticity. *Brain Res*, 2025, **1865**: 149856
- [20] Hirsch J, Zhang X, Noah J A, *et al.* Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact. *Neuroimage*, 2017, **157**: 314-330
- [21] Jiang J, Dai B, Peng D, *et al.* Neural synchronization during face-to-face communication. *J Neurosci*, 2012, **32**(45): 16064-16069
- [22] Koul A, Ahmar D, Iannetti G D, *et al.* Spontaneous dyadic behavior predicts the emergence of interpersonal neural synchrony. *NeuroImage*, 2023, **277**: 120233
- [23] Nguyen T, Zimmer L, Hoehl S. Your turn, my turn. Neural synchrony in mother – infant proto-conversation. *Philos Trans R Soc B*, 2023, **378**(1875): 20210488
- [24] Ahn S, Cho H, Kwon M, *et al.* Interbrain phase synchronization during turn-taking verbal interaction—a hyperscanning study using simultaneous EEG/MEG. *Hum Brain Mapp*, 2018, **39**(1): 171-188
- [25] Cui X, Bryant D M, Reiss A L. NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *Neuroimage*, 2012, **59**(3): 2430-2437
- [26] Pan Y, Cheng X, Hu Y. Three heads are better than one: cooperative learning brains wire together when a consensus is reached. *Cereb Cortex*, 2023, **33**(4): 1155-1169
- [27] Xie H, Karipidis I I, Howell A, *et al.* Finding the neural correlates of collaboration using a three-person fMRI hyperscanning paradigm. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2020, **117**(37): 23066-23072
- [28] Kruppa J A, Reindl V, Gerloff C, *et al.* Brain and motor synchrony in children and adolescents with ASD—a fNIRS hyperscanning study. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2021, **16**(1/2): 103-116
- [29] Liu T, Saito H, Oi M. Role of the right inferior frontal gyrus in turn-based cooperation and competition: a near-infrared spectroscopy study. *Brain Cogn*, 2015, **99**: 17-23
- [30] Reindl V, Gerloff C, Scharke W, *et al.* Brain-to-brain synchrony in parent-child dyads and the relationship with emotion regulation revealed by fNIRS-based hyperscanning. *Neuroimage*, 2018, **178**: 493-502
- [31] Zhou X, Pan Y, Zhang R, *et al.* Mortality threat mitigates interpersonal competition: an EEG-based hyperscanning study. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2021, **16**(6): 621-631
- [32] Pan Y, Guyon C, Borragán G, *et al.* Interpersonal brain synchronization with instructor compensates for learner's sleep deprivation in interactive learning. *Biochem Pharmacol*, 2021, **191**: 114111
- [33] Quiñones-Camacho L E, Fishburn F A, Belardi K, *et al.* Dysfunction in interpersonal neural synchronization as a mechanism for social impairment in autism spectrum disorder. *Autism Res*, 2021, **14**(8): 1585-1596
- [34] Wang Y J, Wen Y, Zheng L, *et al.* A computational and multi-brain signature for aberrant social coordination in schizophrenia. *Prog Neuro Psychopharmacol Biol Psychiatry*, 2025, **136**: 111225
- [35] Gu C, Peng Y, Nastase S A, *et al.* Onscreen presence of instructors in video lectures affects learners' neural synchrony and visual attention during multimedia learning. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2024, **121**(12): e2309054121
- [36] Song X, Dong M, Feng K, *et al.* Influence of interpersonal distance on collaborative performance in the joint Simon task—An fNIRS-based hyperscanning study. *NeuroImage*, 2024, **285**: 120473
- [37] Hamilton A F D C. Hyperscanning: beyond the hype. *Neuron*, 2021, **109**(3): 404-407
- [38] Mayseless N, Hawthorne G, Reiss A L. Real-life creative problem solving in teams: fNIRS based hyperscanning study. *NeuroImage*, 2019, **203**: 116161
- [39] Li Y, Wang Y J, Su C, *et al.* Bidirectional information flow in cooperative learning reflects emergent leadership. *Commun Biol*, 2025, **8**: 1000

- [40] Davidesco I, Laurent E, Valk H, *et al.* The temporal dynamics of brain-to-brain synchrony between students and teachers predict learning outcomes. *Psychol Sci*, 2023, **34**(5): 633-643
- [41] Li Y, Si Y, Pang X, *et al.* EEG hyperscanning reveals dynamic interbrain network patterns during interactive social decision-making. *Commun Biol*, 2026, **9**(1): 595
- [42] Wang X, Zhang Y, He Y, *et al.* Dynamic inter-brain networks correspond with specific communication behaviors: using functional near-infrared spectroscopy hyperscanning during creative and non-creative communication. *Front Hum Neurosci*, 2022, **16**: 907332
- [43] Lu K, Wang X, Qiao X, *et al.* Group creativity emerges from triple ideation pathways: neurobehavioral evidence from an fNIRS hyperscanning study. *Cereb Cortex*, 2025, **35**(5): bhaf129
- [44] Hindriks R, Adhikari M H, Murayama Y, *et al.* Can sliding-window correlations reveal dynamic functional connectivity in resting-state fMRI? *NeuroImage*, 2016, **127**: 242-256
- [45] Shakil S, Lee C H, Keilholz S D. Evaluation of sliding window correlation performance for characterizing dynamic functional connectivity and brain states. *Neuroimage*, 2016, **133**: 111-128
- [46] Pinti P, Tachtsidis I, Hamilton A, *et al.* The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience. *Ann NY Acad Sci*, 2020, **1464**(1): 5-29
- [47] Atias D, Markus A, Shamay-Tsoory S. Short-term dynamic changes in interbrain synchrony during first social interaction between strangers. *NeuroImage*, 2026, **327**: 121752
- [48] Shamay-Tsoory S G, Marton-Alper I Z, Markus A. Post-interaction neuroplasticity of inter-brain networks underlies the development of social relationship. *iScience*, 2024, **27**(2): 108796
- [49] Pan Y, Porteous F, Rosenbaum D, *et al.* Inter-brain coupling tracks emotional co-regulation. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2026, **26**(5): 2167-2179
- [50] Sened H, Gorst Kaduri K, Nathan Gamliel H, *et al.* Inter-brain plasticity as a mechanism of change in psychotherapy: a proof of concept focusing on test anxiety. *Psychother Res*, 2026, **36**(1): 192-206
- [51] Nozawa T, Sakaki K, Ikeda S, *et al.* Prior physical synchrony enhances rapport and inter-brain synchronization during subsequent educational communication. *Sci Rep*, 2019, **9**(1): 12747
- [52] Schwartz L, Shilo C, Hayut O, *et al.* Inter-brain processes during Live and Represented social moments are inter-related and shaped by behavioral synchrony. *Commun Psychol*, 2026, **4**(1): 110
- [53] 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
- [54] 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
- [55] 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
- [56] Cheng X, Zhang R, Chen P, *et al.* Promoting social connectedness through interbrain neurofeedback. *Ann NY Acad Sci*, 2025, **1554**(1): 267-279
- [57] Francis M, Markus A, Stuhr-Wulff F, *et al.* Shaping inter-brain plasticity: a feasibility study of enhancing inter-brain synchrony with dyadic neurofeedback. *iScience*, 2026, **29**(3): 114894
- [58] Pan Y, Cheng X, Zhang Z, *et al.* Cooperation in lovers: an fNIRS-based hyperscanning study: Cooperation in Lovers. *Hum Brain Mapp*, 2017, **38**(2): 831-841
- [59] Li L, Wang H, Luo H, *et al.* Interpersonal neural synchronization during cooperative behavior of basketball players: a fNIRS-based hyperscanning study. *Front Hum Neurosci*, 2020, **14**: 169
- [60] Wang D, Ren Y, Chen W. Relationship evolution shapes inter-brain synchrony in affective sharing: The role of self-expansion. *Brain Struct Funct*, 2024, **229**(9): 2269-2283
- [61] Schwartz L, Hayut O, Levy J, *et al.* Sensitive infant care tunes a frontotemporal interbrain network in adolescence. *Sci Rep*, 2024, **14**(1): 22602
- [62] Konrad K, Puetz V B. A context-dependent model of resilient functioning after childhood maltreatment-the case for flexible biobehavioral synchrony. *Transl Psychiatry*, 2024, **14**(1): 388
- [63] Tognoli E, Kelso J A S. The metastable brain. *Neuron*, 2014, **81**(1): 35-48
- [64] Friston K. The free-energy principle: a unified brain theory? *Nat Rev Neurosci*, 2010, **11**(2): 127-138
- [65] Friston K. Is the free-energy principle neurocentric? *Nat Rev Neurosci*, 2010, **11**(8): 605
- [66] Nguyen M, Vanderwal T, Hasson U. Shared understanding of narratives is correlated with shared neural responses. *Neuroimage*, 2019, **184**: 161-170
- [67] den Ouden H E M, Kok P, de Lange F P. How prediction errors shape perception, attention, and motivation. *Front Psychol*, 2012, **3**: 548
- [68] Kingsbury L, Huang S, Wang J, *et al.* Correlated neural activity and encoding of behavior across brains of socially interacting animals. *Cell*, 2019, **178**(2): 429-446.e16
- [69] Kayhan E, Matthes D, Marriott Haresign I, *et al.* DEEP: a dual EEG pipeline for developmental hyperscanning studies. *Dev Cogn Neurosci*, 2022, **54**: 101104
- [70] Sened H, Zilcha-Mano S, Shamay-Tsoory S. Inter-brain plasticity as a biological mechanism of change in psychotherapy: a review and integrative model. *Front Hum Neurosci*, 2022, **16**: 955238
- [71] Maquet P, Laureys S, Peigneux P, *et al.* Experience-dependent changes in cerebral activation during human REM sleep. *Nat Neurosci*, 2000, **3**(8): 831-836
- [72] Tambini A, Ketz N, Davachi L. Enhanced brain correlations during rest are related to memory for recent experiences. *Neuron*, 2010, **65**(2): 280-290
- [73] Miyata K, Koike T, Nakagawa E, *et al.* Neural substrates for

- sharing intention in action during face-to-face imitation. *NeuroImage*, 2021, **233**: 117916
- [74] Decety J, Lamm C. The role of the right temporoparietal junction in social interaction: how low-level computational processes contribute to meta-cognition. *Neuroscientist*, 2007, **13**(6): 580-593
- [75] Van Overwalle F, Baetens K. Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: a meta-analysis. *Neuroimage*, 2009, **48**(3): 564-584
- [76] Wenger E, Brozzoli C, Lindenberger U, *et al.* Expansion and renormalization of human brain structure during skill acquisition. *Trends Cogn Sci*, 2017, **21**(12): 930-939
- [77] Lotter L D, Kohl S H, Gerloff C, *et al.* Revealing the neurobiology underlying interpersonal neural synchronization with multimodal data fusion. *Neurosci Biobehav Rev*, 2023, **146**: 105042
- [78] Marzoratti A, Liu M E, Krol K M, *et al.* Epigenetic modification of the oxytocin receptor gene is associated with child-parent neural synchrony during competition. *Dev Cogn Neurosci*, 2023, **63**: 101302
- [79] Mu Y, Guo C, Han S. Oxytocin enhances inter-brain synchrony during social coordination in male adults. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2016, **11**(12): 1882-1893
- [80] Gordon I, Tomashin A, Mayo O. A theory of flexible multimodal synchrony. *Psychol Rev*, 2025, **132**(3): 680-718
- [81] Glimcher P W. Understanding dopamine and reinforcement learning: the dopamine reward prediction error hypothesis. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2011, **108**(Suppl 3): 15647-15654
- [82] Roberts C, Sahakian B J, Robbins T W. Psychological mechanisms and functions of 5-HT and SSRIs in potential therapeutic change: Lessons from the serotonergic modulation of action selection, learning, affect, and social cognition. *Neurosci Biobehav Rev*, 2020, **119**: 138-167
- [83] Xie Y, Huang L, Corona A, *et al.* A dopaminergic reward prediction error signal shapes maternal behavior in mice. *Neuron*, 2023, **111**(4): 557-570.e7
- [84] Ebstein R P, Israel S, Chew S H, *et al.* Genetics of human social behavior. *Neuron*, 2010, **65**(6): 831-844
- [85] Li R, Mayseless N, Balters S, *et al.* Dynamic inter-brain synchrony in real-life inter-personal cooperation: a functional near-infrared spectroscopy hyperscanning study. *Neuroimage*, 2021, **238**: 118263
- [86] Réveillé C, Vergotte G, Dray G, *et al.* Trajectories of interbrain synchrony during teamwork: links with team composition and performance. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2025, **20**(1): nsaf081
- [87] Morales S, Bowers M E. Time-frequency analysis methods and their application in developmental EEG data. *Dev Cogn Neurosci*, 2022, **54**: 101067
- [88] Basti A, Chella F, Guidotti R, *et al.* Looking through the windows: a study about the dependency of phase-coupling estimates on the data length. *J Neural Eng*, 2022, **19**(1). DOI: 10.1088/1741-2552/ac542f
- [89] Lachaux J P, Lutz A, Rudrauf D, *et al.* Estimating the time-course of coherence between single-trial brain signals: an introduction to wavelet coherence. *Neurophysiol Clin*, 2002, **32**(3): 157-174
- [90] Kistorz K, Nguyen T, Pan Y, *et al.* Investigating short windows of interbrain synchrony: a step toward fNIRS-based hyperfeedback. *Imaging Neurosci (Camb)*, 2025, **3**: IMAG.a.43
- [91] Réveillé C, Vergotte G, Dray G, *et al.* Investigating interbrain synchrony under teamwork disruption: an fNIRS hyperscanning study. *Behav Brain Funct*, 2026, **22**(1): 12
- [92] De Felice S, Chand T, Croy I, *et al.* Relational neuroscience: Insights from hyperscanning research. *Neurosci Biobehav Rev*, 2025, **169**: 105979
- [93] Marriott Haresign I, Phillips E A M, Whitehorn M, *et al.* Measuring the temporal dynamics of inter-personal neural entrainment in continuous child-adult EEG hyperscanning data. *Dev Cogn Neurosci*, 2022, **54**: 101093
- [94] Kim H, Kim S, Jun S C, *et al.* Is what I think what you think? Multilayer network-based inter-brain synchrony approach. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2025, **20**(1): nsaf028
- [95] Oku A Y A, Barreto C, Bruneri G, *et al.* Applications of graph theory to the analysis of fNIRS data in hyperscanning paradigms. *Front Comput Neurosci*, 2022, **16**: 975743
- [96] Müller V, Lindenberger U. Intra- and interbrain synchrony and hyperbrain network dynamics of a guitarist quartet and its audience during a concert. *Ann NY Acad Sci*, 2023, **1523**(1): 74-90
- [97] Favila S E, Lee H, Kuhl B A. Transforming the concept of memory reactivation. *Trends Neurosci*, 2020, **43**(12): 939-950
- [98] Oedekoven C S H, Keidel J L, Berens S C, *et al.* Reinstatement of memory representations for lifelike events over the course of a week. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 14305
- [99] Zimmermann M, Schultz-Nielsen K, Dumas G, *et al.* Arbitrary methodological decisions skew inter-brain synchronization estimates in hyperscanning-EEG studies. *Imaging Neurosci (Camb)*, 2024, **2**: imag-ima2-00350
- [100] Burgess A P. On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies: a cautionary note. *Front Hum Neurosci*, 2013, **7**: 881
- [101] Leonardi N, Van De Ville D. On spurious and real fluctuations of dynamic functional connectivity during rest. *Neuroimage*, 2015, **104**: 430-436
- [102] Boker S M, Xu M, Rotondo J L, *et al.* Windowed cross-correlation and peak picking for the analysis of variability in the association between behavioral time series. *Psychol Methods*, 2002, **7**(3): 338-355
- [103] Marwan N, Carmen Romano M, Thiel M, *et al.* Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Phys Rep*, 2007, **438**(5/6): 237-329
- [104] Allen E A, Damaraju E, Plis S M, *et al.* Tracking whole-brain connectivity dynamics in the resting state. *Cereb Cortex*, 2014, **24**(3): 663-676
- [105] Seth A K, Barrett A B, Barnett L. Granger causality analysis in neuroscience and neuroimaging. *J Neurosci*, 2015, **35**(8): 3293-3297
- [106] Lobier M, Siebenhühner F, Palva S, *et al.* Phase transfer entropy: a

- novel phase-based measure for directed connectivity in networks coupled by oscillatory interactions. *NeuroImage*, 2014, 85: 853-872
- [107] Rubinov M, Sporns O. Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations. *Neuroimage*, 2010, **52**(3): 1059-1069
- [108] Walther A, Nili H, Ejaz N, *et al.* Reliability of dissimilarity measures for multi-voxel pattern analysis. *Neuroimage*, 2016, 137: 188-200
- [109] Singer J D, Willett J B. *Applied Longitudinal Data Analysis: Modeling Change and Event Occurrence*. Oxford: Oxford University Press, 2003
- [110] Markus A, Shamay-Tsoory S G. Hyperscanning: from inter-brain coupling to causality. *Front Hum Neurosci*, 2024, **18**: 1497034
- [111] Tomashin A, Gordon I, Leonardi G, *et al.* Lagged multidimensional recurrence quantification analysis for determining leader-follower relationships within multidimensional time series. *Psychol Methods*, 2024, DOI: 10.1037/met0000691
- [112] Meshulam M, Hasenfratz L, Hillman H, *et al.* Neural alignment predicts learning outcomes in students taking an introduction to computer science course. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 1922
- [113] Xu X, Zhang D, Zhang Y. Student teacher inter brain coupling forecast cross semester academic fluctuation in real world classrooms. *npj Sci Learn*, 2026, **11**: 30
- [114] Zhang A, Chen Y, Deng X. Cooperating under social anxiety: EEG hyperscanning reveals heightened interbrain synchrony and ERP responses in socially anxious adolescents. *Acta Psychol*, 2026, **268**: 107346
- [115] Pan Y, Cheng X, Dumas G, *et al.* Multi-brain neurofeedback: what are we training for? *Trends Cogn Sci*, 2026, **30**(8): 683-686

Flexibility of Inter-Brain Synchrony in Social Interaction*

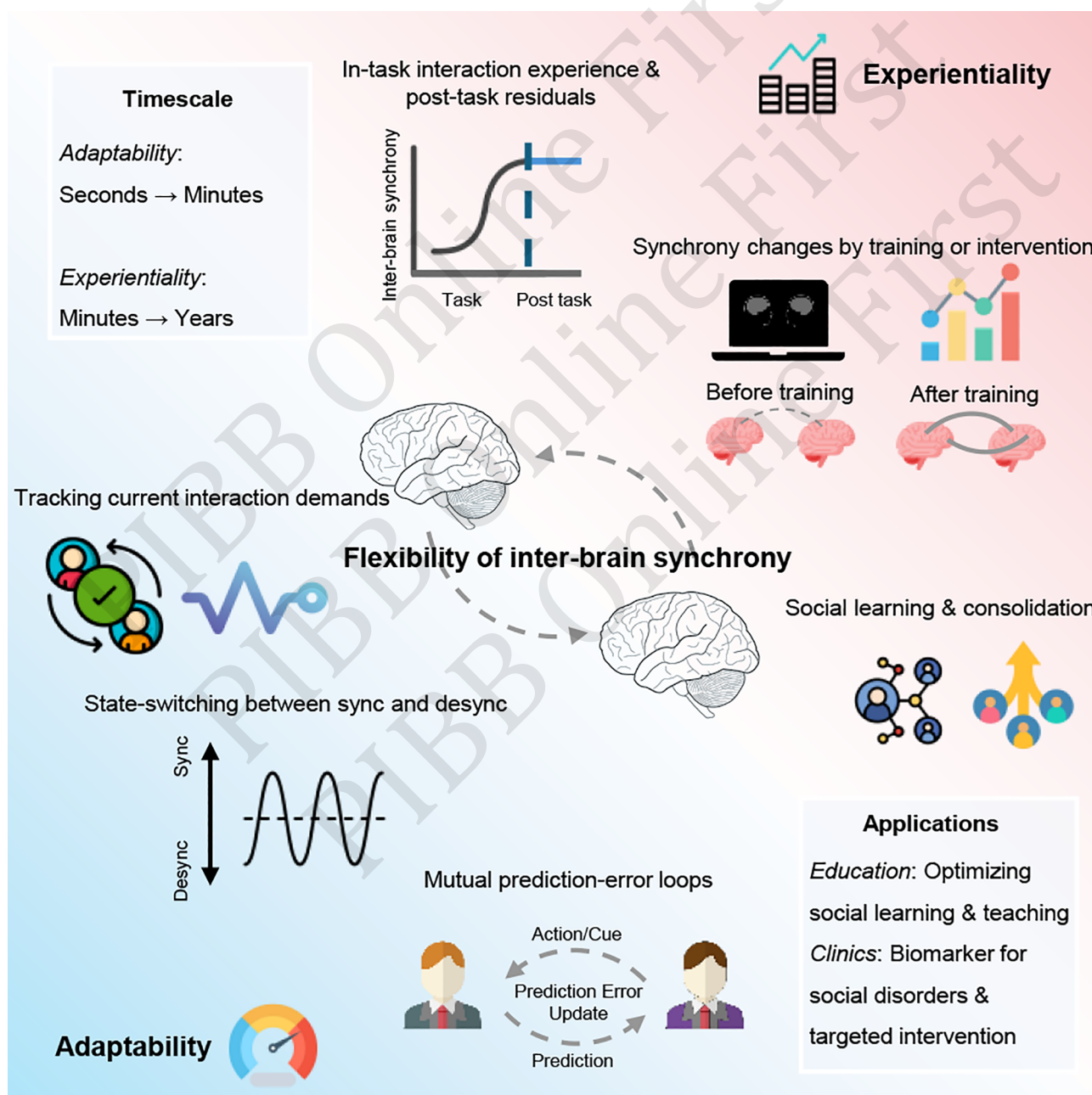
ZHANG Man^{1,2)}, PAN Ya-Feng^{2,3)**}

⁽¹⁾Department of Psychology, School of Humanities and Social Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

⁽²⁾Department of Psychology and Behavioral Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

⁽³⁾Zhejiang Key Laboratory of Neurocognitive Development and Mental Health, Hangzhou 310058, China)

Graphical abstract



Abstract Social interaction is a continuously unfolding process in which partners adjust their coordination in response to changing goals, task phases, roles, strategies, and ongoing feedback. Such coordination is also shaped

by prior interaction experience. Inter-brain synchrony (IBS), defined as the temporal coordination of neural activity across individuals during social interaction, provides an important window into the neural mechanisms underlying interpersonal coordination. Existing research shows that IBS varies across interaction contexts and changes over the course of an interaction. Prior interactions, repeated training, and external interventions may also influence subsequent patterns of IBS. This review synthesizes evidence for these changes and their relationships with behavioral coordination and interaction outcomes. It conceptualizes IBS flexibility along two interrelated dimensions —adaptability and experientiality—distinguished primarily by the factors on which IBS changes depend. Adaptability refers to dynamic adjustments in IBS in response to current interaction goals, task phases, role allocation, strategies, and feedback. These adjustments may manifest as increases or decreases in synchrony, transitions between distinct IBS states, or reconfiguration of inter-brain networks. Experientiality refers to the influence of prior interaction experience or external interventions on subsequent IBS. Such effects may manifest as post-task residual synchrony, changes across repeated interactions or training sessions, and alterations induced by noninvasive brain stimulation or multi-brain neurofeedback. Changes within an ongoing interaction may reflect both current interaction demands and accumulated experience. Identifying experience-dependent effects therefore requires distinguishing the phase in which experience is acquired from a subsequent assessment phase, while accounting for current interaction demands. Much of the available evidence comes from cross-sectional comparisons or assessments at only two time points; direct evidence of persistence, recurrence in later interactions, or generalization across partners and contexts remains limited. At the mechanistic level, several processes may contribute to these two dimensions of flexibility. Metastability may serve as an overarching dynamical principle, allowing interactive systems to shift between integration and segregation rather than remain in a fixed state of high synchrony. Within this framework, adaptability may be driven by mutual prediction and prediction-error updating, which support real-time changes in coupling strength and inter-brain state transitions. Experientiality may reflect history-dependent reconfiguration of this metastable system through accumulated co-occurrence, relational learning, reactivation, offline consolidation, and selective retention of functionally relevant coupling patterns, thereby reshaping subsequent coupling tendencies, state-transition patterns, and recurrent coordination configurations. It should be noted that these proposed mechanisms draw primarily on theoretical frameworks derived from research on learning and plasticity within individual brains and require validation in future hyperscanning studies. This review also summarizes quantitative measures relevant to the two dimensions of IBS flexibility. Adaptability can be captured by temporal-dynamic indices, such as sliding-window trajectories, variability, state transitions, directionality, time-lagged coupling, and dynamic network organization. Experientiality can be quantified using measures of post-task residual coupling, pre-post differences in IBS, delayed retention or reinstatement, and longitudinal trajectories of growth or maintenance. These measures provide statistical descriptions of IBS patterns but are insufficient, on their own, to support inferences about adaptability or experientiality. Such inferences require linking observed patterns of IBS change to specific interaction events and behavioral changes. Guided by this framework, future research should combine dynamic analyses, tracking at multiple time points, and experimental manipulations to examine how IBS flexibility relates to interaction demands, behavioral adjustments, and interaction outcomes, as well as whether experience-related effects are retained or transferred across different interaction contexts. Such work may deepen our understanding of the neural mechanisms underlying dynamic interpersonal coordination and provide a theoretical basis for research and applications in educational and clinical settings.

Key words social interaction, inter-brain synchrony, flexibility, adaptability, experientiality

DOI: 10.3724/j.pibb.2026.0510

CSTR: 32369.14.pibb.20260510

* This work was supported by grants from the Space Medical Experiment Project of CMSP (HYZHXMN01020), the National Natural Science Foundation of China (62577047), the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LMS25C090002), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (226-2025-00127), and the Scientific Research Project of the Anhui Provincial Department of Education (2025AHGXSK40137).

** Corresponding author.

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

Received: September 3, 2026 Accepted: October 14, 2026