

脑间同步性的产生机制及其功能*

术鑫迪¹ 刘菡茵¹ 王 瑾¹ 刘志远² 刘兰芳^{1,3}

(¹北京师范大学文理学院心理学系, 广东 珠海 519087) (²北京师范大学心理学部, 北京 100875)

(³北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室认知神经工效研究中心, 广东 珠海 519087)

摘 要 通过同时记录社会互动中多名个体的脑信号, 超扫描研究普遍观测到个体间脑活动信号的同步性(inter-brain synchronization, IBS)。通过共同表征和相互预测机制, 个体间相似的感觉输入、运动输出和注意唤醒等间接因素以及个体间信息传递活动会驱动 IBS 的产生。其中, 镜像神经元系统、心智系统和相互注意-脑间同步-奖赏环路发挥了重要作用。IBS 的强弱受互动类型与强度、任务情境、人际关系、个体特征与状态的调节。IBS 可能在人际动作协调、语言交流和建立社会联结方面具有功能性意义。后续研究可深入探究“共同表征”与“相互预测”机制的关系、人际“去同步”、跨脑可塑性和不同交互形式的异同等问题。

关键词 人际互动, 脑间同步性, 共同表征, 预测编码

分类号 B845

1 前言

与他人进行频繁的交流与互动是人类社会区别于其他物种生活形式的重要标志, 同时也是人类认知能力和大脑进化的关键驱动力。近几十年来, 社会认知神经科学在认识单个大脑如何参与社会信息加工和人际互动方面取得了重要进展。然而, 社会互动过程所涉及的是由两名或多名个体协同活动构成的复杂非线性系统, 难以使用孤立大脑所产生的效应的叠加进行推断(Konvalinka & Roepstorff, 2012)。近年来, 研究者运用超扫描技术(Hyperscanning)同时记录两名或多名个体的脑活动信号、分析脑间同步性, 为社会互动的脑机制提供了系列新的认识, 相关研究快速增长(图1)。目前, 国内外学者对脑间同步的分析方法(Burgess, 2013; Xu et al., 2024)、研究范式及实证研究结果(Czeszumski et al., 2020; Czeszumski et al., 2022; 李先春 等, 2018)进行了总结与评述。然而, 关于脑间同步的产生机制及其功能意义的

理论解释依然较为模糊。本文总结了脑间同步的定义与度量方式, 产生脑间同步的驱动因素、认知机制和神经基础, 并分析了影响脑间同步的关键变量以及脑间同步的潜在功能意义。在此基础上, 指出了当前研究的不足和后续研究方向。

2 脑间同步的含义与测量

2.1 脑间同步的含义

人际同步(Interpersonal synchronization)是人类社会中无处不在的现象, 包括行为同步、情绪同步、思维同步以及生理同步四种类型。其中, 生理同步又可进一步分为自主神经系统的同步、脑间同步以及荷尔蒙系统的同步(Mayo & Gordon, 2020)。通过行为观察与实验, 研究者对个体间的行为、情绪和思维同步开展了大量考察, 对其产生的机制以及功能意义已经取得了较为深入的认识。而近年来, 随着超扫描技术(Hyperscanning)的运用, 脑间同步才开始逐渐被认识。

脑间同步(Inter-brain synchronization, IBS)通常指的是互动过程中个体间大脑活动模式存在的相关性或同步, 即个体间神经活动的共变现象(Valencia & Froese, 2020)。另有学者对该术语进行了更严格的定义, 认为只有在实时互动中产生、对行为具有因果影响的个体间相关或同步神经活

收稿日期: 2024-06-15

* 广东省自然科学基金-青年提升项目(2024A1515030046)。

术鑫迪与刘菡茵为共同第一作者。

通信作者: 刘兰芳, E-mail: liulanfang21@bnu.edu.cn

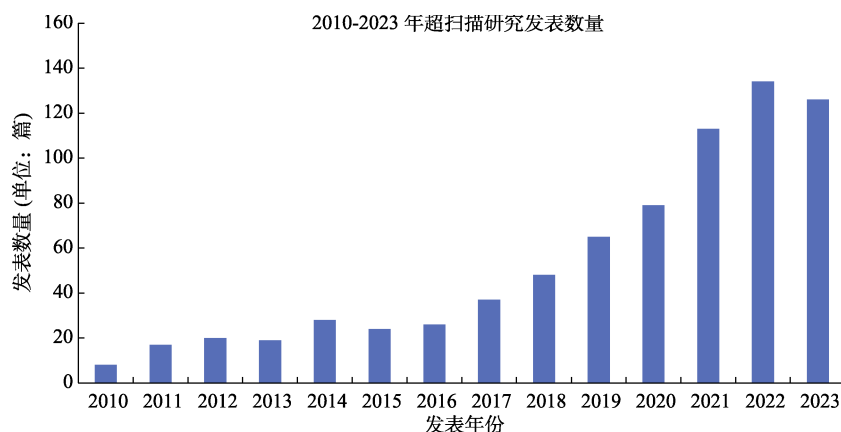


图1 近年来超扫描研究发展现状。数据来自以下数据库: Web of Science, pubmed, PsycINFO, PsycARTICLES, PsycARTICLES, Psychology and Behavioral Sciences Collection, ProQuest; 搜索使用的关键词包括: inter-brain coupling, inter-brain coherence, inter-brain connectivity, inter-brain correlation, inter-brain synchronization, interpersonal brain synchronization, hyperscanning; 文章总数量为 744 篇。

动才能被称为 IBS (Holroyd, 2022)。由于 IBS 与行为的因果关联难以证实, 目前大多数文献中报告的 IBS 指的是广义上的脑间同步现象, 本文也沿用该定义。与 IBS 经常交替使用的术语是脑间耦合(Inter-brain coupling, IBC), 指的是在信息发送者和接收者的大脑间具有规律性关系的神经过程, 包括相关性(即神经对齐, neural alignment)或互补的活动, 以及其他影响和约束发送者和接收者神经反应的规律性变换和动态交互过程(Hasson & Frith, 2016)。当前超扫描领域对脑间同步和脑间耦合未做严格区分, 故本文中这两个术语交替出现, 其指代的含义相同。

从时间角度来看, 人际同步性可以分为趋势同步、并发同步和滞后同步。趋势同步是指个体间在很长一段时间内行为、神经、生理等方面的相关趋势; 并发同步是指个体间在同一时间内的相关趋势; 滞后同步是指某一个体的测量结果与其他个体在前一个时间点测量结果的相关(Sened et al., 2022)。目前大多数超扫描研究关注的脑间同步属于并发同步或滞后同步。此外, 从相位角度来看, 人际同步可以分为同相同步(in-phase synchrony)和反相同步(anti-phase synchrony)。同相同步指的是个体间的测量结果呈正相关, 反相同步则意味着当一个被试的测量指标上升时, 在同一时刻另一被试的指标则下降(Sened et al., 2022)。由于导致反相同步的因素过于复杂, 当前大部分研究关注的脑间同步属于同相同步。

2.2 IBS 的度量

从数据层面, IBS 反映的是两列(或多列)信号的相关或相似。因此, 其测量方法与测量个体内不同脑区间信号关系的方法基本一致。根据所利用的信息类型差异, IBS 指标可分为基于时域和基于频域两大类。根据信息在脑间流动的方向性, IBS 可分为有向连接和无向连接两类。除了这些方面的差异, 不同 IBS 指标所依赖的统计原理也存在诸多差异。综合这些分类标准, 可将当前文献中常用的 IBS 度量方法分为以下 5 类(Hakim et al., 2023)。

第一类度量方法是被试间相关系数(Inter-subject correlation, ISC), 反映的是被试间脑信号的幅度或功率随时间的共变(covariance)。常用的方法包括皮尔逊相关、交叉相关(cross-correlation)、偏相关。这些指标描述的是信号间对称、线性关系。对于非线性共变关系, 可采用斯皮尔曼相关或动态时间规整(Dynamic time warping)方法。该 ISC 分析适用于多种脑成像数据。

第二类度量方法是回归(regression)分析。在回归分析中, 常利用广义线性模型(General Linear Model, GLM), 根据他人脑活动以及其他数据来建模个体的脑活动。相比 ISC 方法, 回归分析允许包含多模态数据, 具有更高的灵活性。例如, 可将他人同步、滞后以及超前出现的脑信号都纳入预测变量。此外, 在交互过程中实时出现的声音、面部表情等外部环境变量也可纳入预测

变量。在多人互动任务中,还可将多名被试的脑信号纳入预测变量,用以考察目标被试与群体之间脑活动的关联。由于自变量的多样性,该类分析方法也被称为 xGLM (Hamilton, 2021)。回归分析适用于多种脑成像数据。

第三类 IBS 度量方法是相干(coherence)分析。该方法旨在度量两列信号在特定频段功率密度上的相似性,适用于具有高时间分辨率的信号。其背后的假设是,神经信号中不同频段信息反映了不同的认知功能;因此,交互个体神经信号在特定频率上的相干意味着他们共同卷入了某些认知功能。该类分析中最常用的方法是小波变换相干(wavelet transform coherence, WTC),可估计两列信号的频域关系随时间的动态演化情况,常见于功能性近红外光谱成像数据(fNIRS)分析。

第四类 IBS 度量方法是相位同步性(phase synchrony)。与相干分析类似,相位同步性也是针对特定频段信号,但不考虑信号的幅度差异。相位同步性常用的分析指标是锁相值(phase-locked value, PLV),反映两列信号在一段时间内相位差异的一致性程度。值得注意的是,相位同步可能产生于以下四种物理机制:(1)两个振荡子间存在相互影响(reciprocal synchronization);(2)两个振荡子都受到相同外部因素的驱动;(3)由其中一个振荡子驱动另外一个振荡子;(4)“巧合”,两个振荡子恰好以相同的频率进行摆动(Burgess, 2013)。只有在情况 1 和 3 中,两个振荡子之间才存在真正的信息传递,也就是超扫描研究值得关注的对象。相位同步性常用于分析脑电信号。

第五类 IBS 度量方法是因果分析(causality)。该类方法适用于分析时间序列数据,能够反映信息流动的方向性,例如,信息发送者大脑向接收者大脑的信息流动。因果分析方法基于两个前提假设:(1)原因出现在结果之前;(2)对原因的认识能提高对结果的预测(Hakim et al., 2023)。常用的有格兰杰因果分析(Granger Causality, GC)、部分定向相干(partial directed coherence, PDC)和传递熵(Transfer Entropy, TE)。其中传递熵作为一种无模型方法,非常适合于检测线性和非线性耦合关系(Ursino et al., 2020; Wang & Chen, 2020)。需要注意的是,这些方法本质上揭示的是变量间的定向预测关系,不一定具备生物学或物理学上的因果性。该方法需要较长的时间序列,常用于分析

时间分辨率较高的脑电信号或近红外成像信号。

3 IBS 的产生机制

3.1 IBS 的驱动因素分类

脑间同步被定义为交互情境下才出现的现象。然而,根据以上 IBS 的度量方法可知,即使个体间并未进行真正的信息交流或互动,仍有可能出现脑间信号的高度相关(Burgess, 2013; Holroyd, 2022)。根据个体间是否存在信息传递,IBS 的产生可分为两种情况:

(1)个体间不存在真正的信息传递,仅是因为受到相同因素驱动而产生 IBS。包括以下三类驱动因素:

①个体间接受相同的感受刺激而产生相似的神经反应。研究表明,个体接收外部周期性刺激时,特别是具有一定节律的感受信息时,刺激节律通过调整神经振荡的相位,使得神经元集群活动逐渐趋于同步,并与外界刺激的相位保持一致(即相位锁定)(Burgess, 2013; Calderone et al., 2014)。该过程称为神经振荡与外界节律同步化(neural entrainment)(Nozaradan et al., 2011)。通过该机制,即使不同个体间未进行直接交互甚至未处于同一空间内,只要他们接收了具有共同时间特征的刺激输入,便会出现较强的脑间信号同步性现象(Wass et al., 2020)。

②个体间通过共同的运动输出而产生脑间信号同步。为了诱发群体交流与互动,研究者往往需要被试完成外显任务,例如,基于特定节拍的按键任务。研究表明,执行相同或相似的简单动作序列时,例如,共同踏步(Miles et al., 2009)、手臂弯曲(Miles et al., 2011)等,个体间脑信号在特定频段功率密度上会产生较为显著的相干现象。

③个体间因注意力和唤醒度的共同增强而出现脑间信号同步。注意是社会认知的基础。注意力与唤醒度的整体增强使得群体处于相似的心理状态,从而产生脑信号的幅度或功率随时间的共变(Gvirts & Perlmutter, 2019)。研究通过度量被试间相关系数(ISC)发现,当群体均接受到相同外界刺激时,与令其感到“无聊”的刺激相比,唤醒度更高的刺激能诱发更强的 ISC (Schmälzle et al., 2015)。此外,精神病学与临床研究发现患有注意力相关缺陷的个体在社会互动中有着异常的同步性(Fitzpatrick et al., 2016)。

(2)个体间存在信息传递,通过共同的心理过程来诱发脑间神经同步性。根据信息传递的方向,可以分为两类:

①一对一或一对多的单向信息传递。典型的情境包括“领导者-跟随者”(Jiang et al., 2015; Kurihara et al., 2024)与“演讲者-观众”(Zheng et al., 2020)范式。在前者中,“领导者”对实验任务掌握有较多信息或负较多责任,“追随者”缺乏信息,因此,追随者必须依靠领导者的指引来采取应有的行动,从而达到自己的目标或群体的共同目标,信息传递与交流由此实现。通过相关分析等度量手段,可以显示在特定频段内脑信号的同步性。即使没有明确的目标任务,例如单纯的弹奏、演讲与倾听,个体间仍然存在信息的输出与自动化的接收。但由于追随者的目标导向较弱,此时两者间在特定频段内脑信号的同步性往往处于较低水平(Kourtis et al., 2014)。

②个体间存在双向信息传递。在该情境下,群体通常具有共同的任务目标,因此个体间需要进行双向、实时的信息交换。常见的任务包括群体合作(Li, Maysseless et al., 2021)、群际冲突(Yang, Zhang et al., 2020)、群体绩效提升(Xie et al., 2023)、劝服与从众(Li et al., 2023)、群体内部博弈(Tang et al., 2016)等。在这些任务中,个体不仅需要向他人展示自己的想法或行动,还需要及时根据他人的言语、面部微表情、肢体动作等反馈来调整自己的行为,从而实现双向的信息传递。

3.2 IBS 产生的认知机制

在认知层面,当前主要有两大理论解释脑间同步性的产生机制。

3.2.1 共同表征(co-representation)理论

无论信息流动是单向还是双向,IBS 的出现都需要建立在不同个体的心智系统对情境形成共同表征(Hasson et al., 2012; Jiang et al., 2021; Shamay-Tsoory et al., 2019)。在社会互动中,共同表征的对象既包括共享的外部客体、事件或动作,也包括行为主体的内部心智活动。这些表征可分为不同的层级,包括初级感知-运动类表征,中间认知层(例如,语义概念、世界知识、共同注意等),高级社会认知类表征(例如,意图、态度、信念等)以及情绪状态类表征。IBS 出现的脑区位置与任务中个体间所建立的共同表征内容密切相关。例如,元分析揭示,在动作同步任务中 IBS 常出现

在与运动控制相关的脑区(顶叶、前额叶)(Czeszumski et al., 2022)。在言语交流任务中,IBS 常出现在与语音、语法、语义加工相关的脑区(Liu et al., 2019; Liu et al., 2020)。当个体间建立共同表征的途径受阻时,例如,言语交流中倾听者无法理解说话人的语言时,IBS 则大幅度减弱(Liu et al., 2021; Novembre et al., 2016)。

3.2.2 相互预测(mutual prediction)理论

在社会互动中,个体间形成共同的心理表征并不足以让人际交互顺利进行,还需个体间进行相互预测。根据预测编码理论,个体大脑根据先验经验不断进行预测,当关于自身和环境的传入感官信息与预测不同时,就会产生预测误差。为了减少误差,大脑采取行动来改变传入的感官信息或者更新预测(Shamay-Tsoory et al., 2019; Spratling, 2017)。Hamilton (2021)将预测编码理论拓展到人际交互场景中,提出了相互预测理论。根据该理论,个体大脑编码自己的行为信息(A_{self})并通过预测机制编码他人的行为信息(A_{other})。同时,与之交互的另一个体大脑也编码自己的行为信息(B_{self})并预测编码他人的行为信息(B_{other})。当预测较为准确时, $A_{self} + A_{other}$ 的结果与 $B_{self} + B_{other}$ 的结果相近,因此这两个个体的大脑表现出近似的总体神经活动。该理论在动物实验中得到了较好的验证(Kingsbury et al., 2019)。

3.3 IBS 的神经生理学基础

对超扫描研究的元分析表明,前额叶、顶叶、颞叶、中央前回等多个脑区参与了社会互动并出现 IBS (Czeszumski et al., 2020; Wang et al., 2018; Zhao et al., 2024; Zhou et al., 2019)。根据这些脑区的潜在功能,可以分成三个系统。

(1)镜像神经元系统(Mirror Neuron System)。镜像神经元主要分布于腹侧前运动皮层(ventral premotor cortex)、额下回后部(posterior inferior frontal gyrus)、顶内沟前侧(rostral inferior parietal lobule)以及颞上回(superior temporal gyrus)。镜像神经元系统的典型特征是,当个体执行动作时或观察他人执行类似动作时,该系统都会出现类似且特异于该动作的激活模式(Iacoboni & Dapretto, 2006)。镜像神经元系统的个体间同步通常出现在涉及身体运动的任务中(例如,拍手或按键),对动作模仿和动作协同起着重要作用(Lu et al., 2023; Ménoret et al., 2014)。

(2)心智系统(Mentalizing System)。在社会互动中,镜像神经元系统主要负责动作模拟与协同,而心智系统则负责在没有外显运动信息输入时对他人的意图的推理(Begliomini et al., 2017; Van Overwalle & Baetens, 2009)。心智系统包括内侧前额叶(medial prefrontal cortex)、颞-顶联合区(temporo-parietal junction, TPJ)、楔前叶(precuneus)、扣带回后部(posterior cingulate cortex)和颞极(temporal pole)(Van Overwalle & Baetens, 2009)。其中前额叶负责计划、管理、信息整合及其他高级功能,颞-顶联合区负责诸如观点采择等更复杂的认知过程。心智系统中出现的被试间同步性,表现为脑信号幅度或功率随时间的共变或特定频段功率密度上的相似性,通常出现在涉及高级社会认知的交互任务中。例如,面对面的言语交流(Jiang et al., 2015; Kinreich et al., 2017)、劝服(Li et al., 2023)、群际冲突(Yang, Zhang et al., 2020)等。

(3)相互注意-脑间同步-奖赏环路。在现实生活中我们身边通常有多人出现,为何我们会选择性地与特定个体产生行为同步?有研究者认为,个体同他人产生脑神经和行为方面的同步可能与互动中达到对齐(alignment)而获得的潜在收益有关(Gvirts & Perlmutter, 2019; Shamay-Tsoory et al., 2019),例如,获得亲密感、促使任务成功等。根据 Gvirts 和 Perlmutter (2019)提出的“相互注意-同步-奖赏”环路(A loop of mutual attention, synchronization, and reward),相互注意系统中的脑间神经同步会促进个体间在行为、情感或认知上的社会对齐(social alignment),社会对齐又进一步激活奖赏系统。作为反馈,奖赏系统的激活与社会一致性又会导致 IBS 的增强。该模型能够解释催产素对社会互动任务中脑间同步的调节作用(Mu et al., 2016)。

3.4 小结

脑间同步性的产生机制,或者说两个(或多个)独立的大脑如何建立起联系,是超扫描研究者需解决的核心问题。我们从驱动因素、认知机理和神经生理基础三个方面分析总结了国内外研究对该问题的认识。然而,这三方面的因素与机制存在何种关联,目前尚不清楚,例如,哪种情境下“相互预测”机制对脑间同步的出现起主要作用?由“共同表征”机制产生的脑间同步是否主要依赖“镜像神经元”系统的功能,而“相互预测”机制产

生的同步则主要依赖“心智系统”?更进一步,探究脑间同步现象的产生机制,其最终目标是为了理解其在人际交流与互动中的作用。然而,当前实证研究对于脑间同步如何与行为建立关联的探索还较为匮乏。

4 IBS 的影响因素

前面部分总结了与 IBS 现象相关联的认知机理及其神经基础。那么,IBS 何时出现?受哪些因素的调节?通过分析实证研究,我们将影响 IBS 的因素大致划分为四类,并对其逐一展开讨论(见表 1)。

表 1 IBS 的影响因素

因素类型	具体变量
互动类型与强度	类型: 语言交流、非语言交流、肢体动作; 强度: 低、中、高
任务情境	合作、竞争、独立、任务收益
人际关系	依恋关系、群组身份、文化背景
个体特质与状态	性别、年龄、人格、共情、注意、情绪、 动机

4.1 互动类型与强度

社会互动的类型及其强度对 IBS 的脑区位置(或神经振荡的频率)和强弱产生显著影响。按照交互的内容,当前超扫描研究涉及的互动类型可分为语言交流、非言语交流(如微笑、对视)以及肢体动作三类。此外,也可从交互的自发性(spontaneity)、相互性(reciprocity)以及多模态性(multimodality)等角度区分不同互动类型。互动强度可理解为主观感知到的人际联结程度,受到互动任务的主观参与度影响。不同互动类型以及同一类型内的不同活动在互动强度上存在差异。例如,对话比对视的互动程度更强,而直视又比斜视有更强的互动性(Farroni et al., 2002)。互动的任务类型对 IBS 出现的脑区位置有重要影响(Zhao et al., 2024),而互动强度进一步影响 IBS 的强弱。例如,相比背对背条件,面对面语言交流条件下左下额叶皮层(IFC)产生了更高的跨脑相干(Jiang et al., 2012)。在情侣中,触摸比言语交流在感知运动区和心智系统上引发了更高的跨脑相干值(Long et al., 2020)。一项基于 EEG 的研究发现互动中身体运动和微笑诱发 γ 波幅值的脑间同步,而眼神接触则诱发 β 波幅值的脑间同步(Koul

et al., 2023)。

4.2 任务情境

社会认知任务可分成合作、独立、竞争三类情境,不同情境对IBS的影响也各不相同。相比独立完成任务或竞争任务,合作类任务下个体间IBS通常更强(Nguyen et al., 2021; Reindl et al., 2018; Reindl et al., 2022),且IBS强度与团队合作绩效呈正相关。该结果也从侧面证实了信息的有效传递在其中的重要作用(Réveillé et al., 2024)。然而,在竞争条件下却没有观察到显著的脑间同步。例如,在按键任务中要求参与者比他们的搭档更快地做出反应(Cui et al., 2012)、电脑乒乓球游戏中要求参与者分别控制球拍并竞争取胜(Sinha et al., 2016)、脑机接口游戏中要求参与者用有意识的脑活动控制跷跷板向自身方向倾斜(Susnoschi Luca et al., 2021)。这些互动任务中均未发现参与者间存在显著的IBS。当然,互动中IBS的强度也受任务的奖惩机制影响,对应的任务收益可以通过影响个体动机进而影响IBS。有研究者发现,合作获胜时的金钱收益更高时,个体间的合作次数以及IBS(α 、 θ 波的锁相值)都增加了(Hu et al., 2018)。总之,当参与者间的任务目的和利益一致时,参与者间会采用相似的加工策略,同时更容易理解彼此意图并将对方归为内群体成员,从而提高合作绩效并增强IBS;竞争条件下则反之。

4.3 人际关系

互动中组成员间的人际关系也能影响脑间同步性,主要表现在对IBS强度的调节。研究表明,合作任务中伴侣间的IBS总是要高于好友间、陌生人间IBS,表现为在右侧额上回有更高的小波相干;而好友间的跨脑相干性相较于陌生人间也更强(Pan et al., 2016)。此外,母子间也比陌生人间在背外侧前额叶和前额叶皮层上有更高的相干性(Reindl et al., 2018)。导致这些现象的原因可能在于伴侣、好友及母子间建立起的良好依恋关系(Zhou et al., 2019)。组成员身份也会影响IBS。在游戏中,相比外群体成员,人们倾向于跟内群体成员表现出更多的同步(Astolfi et al., 2010; Yang, Zhang et al., 2020)。在运动同步任务中,相同种族的搭档比不同种族搭档间具有更强的跨脑相关性(Gamliel et al., 2021)。综合上述研究,不难发现,无论是实验设置的合作情景,还是熟悉群

组间的配对,其共同特点都是参与者间彼此立场一致,属于内群体,进而产生了更强的IBS。

4.4 个体特质与状态

个体的特质,例如,人格、性别、年龄、共情能力等,以及个体参加实验时的心境状态也会影响IBS的强弱。研究表明,基于大五人格问卷测得的参与者外向性与宜人性格别和右侧额下回与左侧额下回的脑间小波相干性呈显著正相关,即有更强的神经耦合(Zhang et al., 2021)。在性别方面,当前研究较多关注性别配对的影响。在合作按键任务中,研究者发现异性配对组比同性配对组在前额叶区域的脑间相干性更强(Cheng et al., 2015)。然而,其他研究则得出了不一致甚至相反的结论(Baker et al., 2016; Li, Chen et al., 2021),说明IBS的强弱可能受到多重因素的调节。此外,研究者利用线性回归分析发现,合作任务中共情能力较强的个体更容易与搭档在额下回和后侧额上沟处产生神经耦合,表现为个体的共情得分正向预测脑间同步(Liu et al., 2017)。除了特质因素,互动中个体的注意、情绪和动机状态也会影响IBS的强度。相比积极情绪,消极情绪能诱发更强的IBS;同时,无论是积极还是消极情绪,情绪唤醒度都与IBS呈正相关(Nummenmaa et al., 2012; Nummenmaa et al., 2014)。这与前面部分提出的“唤醒度是IBS的主要驱动因素之一”观点一致。

4.5 小结

综上,我们总结了与脑间同步存在密切关联的几大因素,包括:互动类型与强度、任务情境、人际关系以及个体特质与状态。概括而言,在互动性强的合作任务中,内群体之间较容易出现脑间同步性。除了这些因素之外,社会互动涉及的诸多其他变量(例如,刺激特性、互动媒介、文化背景等)可能也对脑间同步产生影响。但由于相关实证研究较为匮乏,故未纳入以上讨论。这些因素如何影响脑间同步?结合脑间同步的产生机制的认识,我们提出以下可能性:(1)在社交情境中,刺激特性(强度、新颖性等自下而上因素)和任务目标(自上而下因素)驱动个体间产生共同注意。互动性强且需要合作的任务,驱动的共同注意程度高,因此参与者的脑间同步性强。(2)经过注意系统的信息过滤后,个体基于自身的记忆系统对情境进行加工和表征。人际关系越紧密的个体,其过往的经历越相似,对于任务情境形成的表征相似度

也越高, 因此相应的脑间活动也越同步。(3)根据“相互注意-脑间同步-奖赏环路”理论(Gvirts & Perlmutter, 2019), 脑间同步通过社会对齐激活奖赏系统, 该系统又进一步调节脑间同步性。对于相同的刺激, 在人格、性别、共情能力等特质方面存在差异的个体, 其奖赏系统的激活程度可能不同, 因此影响个体与他人的脑间同步性。这些假设还有待检验。

5 IBS 的潜在功能

脑间同步作为社会交互中的普遍现象, 在人际交流和互动中有何作用? 有研究者认为 IBS 仅仅是由于不同个体受相同外部刺激的同步驱动而造成的附带现象, 在多数情况下并无实质性的功能(Holroyd, 2022)。然而, 通过分析来自神经调控与神经反馈实验证据、脑与行为的关联分析以及特殊人群的考察结果, 我们认为 IBS 在促进动作协调、言语交流、社会联结等方面的确具有重要的功能意义。

5.1 促进人际动作协调

大量研究观察到人际协同运动过程中(例如, 拍手、按键)被试间出现显著的 IBS。该现象是否仅仅是个体间具有共同运动输出的结果? 近期一项研究采用经颅电刺激, 对参加协同按键任务的二人组被试同时施加交流电刺激, 以同步提高不同被试的前额叶皮层和右侧额下回神经兴奋性, 同时采用近红外成像设备记录他们的脑活动信号。结果发现, 相比干预前的实验试次, 在施加干预的试次和干预结束后的试次中, 被试间的前额叶皮层信号相关性更高, 并且按键任务上的被试间协同性也提高了。在未施加有效电刺激的对照组, 则未出现这些效应(Lu et al., 2023)。其他研究者通过神经调控技术提高脑间同步性, 也发现被试在同时或随后进行的敲击动作和歌曲学习中自发性动作的行为同步性增强(Novembre et al., 2017; Pan et al., 2021)。这些结果提供了因果性证据, 说明脑间同步化促进动作协调。

动物研究在揭示 IBS 的功能性意义方面也发挥了重要作用。Zhang 和 Yartsev (2019)使用了无线电生理技术(wireless electrophysiology), 记录了自然社交互动中的蝙蝠的实时神经活动记录, 包括局部场电位(Local Field Potentials, LFP)和单神经元的放电活动。结果发现当蝙蝠即将开始互

动时, 神经同步性会提前增加, 这暗示了这种同步可能是行为协调的前提条件。我们推测, IBS 对动作协调的促进作用可能是主要通过预测编码机制完成。更强的 IBS 意味着个体间在外部刺激编码、动作准备、注意等方面形成的共同表征, 从而允许个体对他人进行更精准的预测。

5.2 促进言语交流

语言是人们进行社会交互的主要途径。根据对话的“交互对齐”理论, 成功的言语交流建立在表征对齐基础上。这些需要对齐的表征既包括语音、语义、句法等语言学特征, 也包括情境模型(Pickering & Garrod, 2006)。Pickering 和 Garrod (2006)进一步将言语交流分为交互式语言加工、相互理解和关系建构与维持三个层级, 并认为不同层级的人际交流与不同模式的人际脑同步性相关联。与这些观点一致, 研究者发现在单向和双向言语交流中, 倾听者与讲述者在语言加工脑区(如颞叶、额下回)以及与情境模型建构相关的脑区(默认网络)在血氧信号的幅值变化上均出现显著的 ISC, 并且神经耦合越强, 倾听者对说话者的理解越好(Liu et al., 2021; Stephens et al., 2010)。口语交流中脑间同步是否仅仅是由于说话者和倾听者都接受了相同的听觉输入刺激造成? 一项 EEG 研究采用多重线性回归分析发现, 即使控制了脑与声音的同步效应, 说话者和倾听者在颞叶后部、顶叶及运动皮层依然出现了显著的相位同步(Pérez et al., 2017)。该结果说明, 言语交流中的脑间同步现象与自发认知活动有关, 而非仅仅是受相同感觉刺激输入所驱动的被动结果。

对社交障碍个体的研究进一步预示了 IBS 在人际交流中的功能。自闭症谱系障碍, 通常表现为社交互动和沟通缺陷, 涉及对他人意图和行为理解的困难。有研究者利用 fNIRS 技术, 以相干性作为 IBS 的度量指标, 评估了自闭症儿童与其父母在合作任务中前额叶皮层的脑间同步。研究发现, 自闭症的严重程度与 IBS 的降低存在高度相关, 自闭症严重程度更高的儿童在与父母的社会互动过程中 IBS 增幅更少, 尤其是在内侧前额叶皮层(Wang et al., 2022)。然而, 目前这些研究提供的都是相关性证据, 尚缺少通过干预 IBS 影响言语交流效果的实验结果。

5.3 促进社会联结与亲社会行为

人际同步被认为是一种基于进化的机制, 能

增强社会联系、社会凝聚力和社会认同感(Launay et al., 2016)。脑间同步作为行为同步的神经标记,可能在过程中发挥了重要作用(Müller et al., 2021)。有研究者采用神经反馈技术,让受试者自主地提高脑间同步性,随后度量其亲社会体验。研究发现,受试者 IBS 的增强与实验后所表现出的更强的亲社会体验相关。以鸽子为对象的神经反馈实验也发现了类似的效应(Yang, Zhang et al., 2020)。除了神经反馈手段,通过协作任务改变 IBS 也能引起后续行为的变化。在一项 fNIRS 研究中,两组被试分别完成协同按键任务或独立按键任务,随后完成亲社会倾向测试。分析发现,相比独立按键组,协同按键任务下二人组合在左侧额叶区域的相干性更强,并且其亲社会性得分也更高。在协同按键组内,按键时二人组合的脑间同步强度能正向预测其随后在亲社会测量上的得分(Hu et al., 2017)。IBS 与亲社会行为的联系可能与“相互注意-脑间同步-奖赏环路”有关。根据该假说,相互注意系统中的脑间神经同步会促进个体间在行为、情感或认知上的社会对齐,进而激活奖赏系统,释放多巴胺与催产素(Gvirts & Perlmutter, 2019)。这一过程可能使得个体生成更积极的体验并产生亲社会行为动机。

5.4 小结

通过神经调控或神经反馈方法改变个体间的 IBS 继而引起其随后的行为变化,这些结果为 IBS 的功能性意义提供了较强的证据支持。需要说明的是,尽管这些研究证据驳斥了“脑间同步性仅仅是行为的副产品”这一观点,但并不代表脑间同步性不受行为的影响。我们倾向于认为,IBS 与行为之间可能是互为因果的关系:脑间同步会促进动作协调、言语交流和社会联结的建立,而这些行为结果反过来又会促进这些行为的持续发展。后续研究还需阐明 IBS 究竟是通过什么样的机制对行为产生作用。我们认为 IBS 通过“预测编码”机制促进人际动作协调,通过“交互对齐”机制促进语言交流,通过“奖赏反馈”促进亲社会行为这三种可能性值得进一步检验。此外,有许多研究者发现交互行为中 IBS 与行为表现存在显著正相关,而在社交互动和人际沟通能力上具有缺陷的个体则表现出异常的 IBS。尽管这些研究难以证明 IBS 与特定行为的因果关系,但说明 IBS 可作为有效沟通和社会互动的客观神经指标。基于

此,未来研究可拓展 IBS 在人际关系评估、异常个体社会功能评估、测谎等方面的应用价值。

6 总结与展望

采用超扫描技术,众多研究者观测到互动个体间的大脑活动模式存在共变关系,该现象被统称为脑间同步(IBS)。根据个体间是否存在信息传递,IBS 的产生可分为两种情况。第一种情况下,个体间不存在真正的信息传递,仅是因为受到相同因素驱动而产生 IBS。这些因素包括:相同的刺激输入、共同的运动输出或注意力与唤醒度的共同增强。另一种情况下,个体间存在实时的信息传递,通过共同的心理过程来诱发 IBS,包括个体间存在单向信息传递(一对一或一对多)与双向信息传递两种类型。无论哪种情况,IBS 的产生都依赖于交互个体对情境形成的共同心理表征。相互预测机制也会导致交互的个体产生相似的神经活动。在神经层面,IBS 的出现与镜像神经元系统和包括内侧前额叶和颞-顶联合区在内的心智系统的功能密切相关。此外,根据“相互注意-脑间同步-奖赏环路”假说,奖赏系统对 IBS 具有调控作用(Gvirts & Perlmutter, 2019)。IBS 的强度受互动类型与强度、任务情境、伙伴关系和个体特征与状态这四个因素影响。关于 IBS 的功能意义,目前还存在争议。有研究者认为,多数情况下,脑间同步仅仅是不同个体的大脑编码相似感觉信息或处于相似心理状态时的一种附带现象(Holroyd, 2022)。通过分析基于神经调控或神经反馈技术的干预研究、脑与行为相关分析以及特殊人群的研究结果,我们推测 IBS 可能对人际动作协调、言语交流和社会联结的建立具有功能意义。

尽管近 20 年来的实证研究对脑间同步性现象的认识逐步加深,但至少还存在以下两方面问题:

(1)不同研究者采用的 IBS 度量指标类别繁杂,缺乏统一性。不同度量指标的生理含义有所不同,与之关联的认知加工过程也可能存在较大差异。事实上,对于相同的数据,采用不同的指标可能导致得出不同甚至相反的结论。例如,两列信号的幅值相似,但在特定频率上的相位却相反。为了更准确地认识脑间同步现象,后续研究者需说明选择特定度量指标的依据,或者用不同的度量方法对结果进行重复验证。

(2)关于“不同大脑之间如何建立关联”的具体过程,现有认识尚浅。在客观物理空间上,不同个体的大脑是相互独立的。独立大脑之间形成统计上的共变或相互制约关系,中间必须有外部环境因素与内部心理加工过程作为中介。本文第三部分列出了一些驱动因素,但关于这些因素发挥作用的具体过程以及变量间的关系还知之甚少。后续研究可采集多模态数据,例如,声音、动作、面部表情以及心率、呼吸等数据,通过分析回归或因果分析方法,揭示不同个体的脑信号如何通过这些变量的作用达到同步或相互制约关系。此外,还可结合“单脑”与“双脑”分析,推测个体内独立运行的内隐认知活动对脑间同步的作用。

下一步,研究者还可以从以下几方面深入探究脑间同步性:

(1)社会互动中,“共同表征”与“相互预测”是什么关系?这两个机制是当前解释个体间如何进行有效交互并产生脑间同步性的主要观点。然而,这两种机制存在何种关系目前尚不清楚。我们推测,共同表征可能是相互预测的重要前提:个体建立的心理表征与他人的心理表征越相似,对他人的预测越准确。准确的预测又会促进个体间行为的协调,从而形成更深层次的共同表征。因此,“共同表征”与“相互预测”可能是人际交互的动态中相互促进的两种机制。为探究该问题,后续研究者可设计较有持续性的交互场景,例如,有意义的深入对话,并通过行为或言语反应推测个体对他人的预测程度。然后,通过分析相关脑区的IBS推测个体与他人建立的共同表征程度,并分析IBS与预测程度的动态变化关系。

(2)在复杂的社会互动中,除了“进入同步”,个体间还需“去同步”。哪些因素会驱动人们“去同步”,其功能意义是什么?个体如何在“同步”和“去同步”两种状态间灵活切换?行为研究表明,人们在动作上的同步并不总是有利于任务的完成;相反,较少的人际同步性允许更灵活的人际组织,有利于问题的解决(Mayo & Gordon, 2020)。近期超扫描研究表明,进行交互个体的大脑并非总是处在稳定的强同步状态,而是呈现出复杂的状态变化模式(Li, Mayseless et al., 2021)。然而,关于脑间同步强弱变化具有何种规律、驱动因素、与行为的关系等问题,尚缺乏深入研究。值得注意的是,导致“去同步”或“非同步”的因素很多,包

括缺少“进入同步”的驱动因素(如前文3.1部分所列)、注意力不集中、加工策略不同、神经生理的个体差异等多种原因。其中,个体为适应社交情境需求主动调整自己的状态从而导致“去同步”的情况,才是真正值得研究的。此外,考察脑间“同步”与“去同步”问题时,还需考虑时间尺度问题。在长时程和宏观系统层面,人际同步可能有利于行为;在短时程和微观层面,“去同步”可能更有利于行为。

(3)“互动后脑间耦合”与“跨脑可塑性”。目前,绝大多数研究者关注的脑间同步性都是在任务进行过程中发生的。有少数研究发现,在社会互动结束后,由互动带来的个体间神经同步性依旧短暂存在,该现象被称为“互动后脑间耦合”(post-interaction inter-brain coupling) (Khalil et al., 2022)。Shamay-Tsoory 等人(2019)发现互动后个体与他人的神经耦合强度能预测该个体自我报告未来的与他人联系的动机水平。该作者认为,互动后脑间耦合可能反映了个体对未来社会关系的准备,是社会关系发展的潜在机制。在社交互动后,社会线索得到巩固,互动伙伴的动作表征在记忆中可能会继续活跃,有助于促进未来的人际关系发展。还有研究者提出了“跨脑可塑性(Inter-brain plasticity)”这一新概念,指的是反复暴露于高度脑间同步性会导致个体整体同步能力的持久变化的过程(Shamay-Tsoory, 2022)。这一概念为认识人际交互的神经基础和脑间同步的功能意义提供了新颖且有价值的观点。然而,“互动后脑间耦合”究竟是由于互动造成的持续影响还是与脑间耦合同步出现的其他因素(噪音)造成,还需更多的研究进行检验。此外,如果是一种真实的神经可塑性现象,“互动后脑间耦合”必然伴随着神经系统结构上的改变。后续研究者可探究互动后大脑微观结构的改变,以及结构变化与脑间同步和后续行为的关联。

(4)不同人际交互形式在认知与脑机制上的异同。基于交流的参与者数量和互动结构,人际交互形式可以分为“一对一”、“一对多”和“多对多”三种形式。不同交互形式下,人们的信息处理方式、行为反应、信息流动的动力学特征等诸多方面都存在明显差异(Yang, Li et al., 2020)。然而,当前的超扫描研究多数关注的是“一对一”交流情境。即使在“一对多”情境下(例如:师生互动),研

究者也主要按照“一对一”的思路来分析数据。后续研究者可以在社会认知模型的理论引导下,对比不同交互形式下个体脑内活动模式和个体间神经同步性模式的异同。研究结果将有助于揭示大脑如何在不同社交情境下动态、灵活地调节其活动模式。

参考文献

- 李先春, 卑力添, 袁滢, 丁雅娜, 冯丹阳. (2018). 超扫描视角下的社会互动脑机制. *心理科学*, 6(6), 1484.
- Astolfi, L., Toppi, J., De Vico Fallani, F., Vecchiato, G., Salinari, S., Mattia, D., Cincotti, F., & Babiloni, F. (2010). Neuroelectrical hyperscanning measures simultaneous brain activity in humans. *Brain Topography*, 23(3), 243–256. <https://doi.org/10.1007/s10548-010-0147-9>
- Baker, J. M., Liu, N., Cui, X., Vrticka, P., Saggat, M., Hosseini, S. M. H., & Reiss, A. L. (2016). Sex differences in neural and behavioral signatures of cooperation revealed by fNIRS hyperscanning. *Scientific Reports*, 6(1), 26492. <https://doi.org/10.1038/srep26492>
- Begliomini, C., Cavallo, A., Manera, V., Becchio, C., Stramare, R., Miotto, D., & Castiello, U. (2017). Potential for social involvement modulates activity within the mirror and the mentalizing systems. *Scientific Reports*, 7(1), 14967. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14476-9>
- Burgess, A. P. (2013). On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies: A cautionary note. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 881. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00881>
- Calderone, D. J., Lakatos, P., Butler, P. D., & Castellanos, F. X. (2014). Entrainment of neural oscillations as a modifiable substrate of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(6), 300–309.
- Cheng, X., Li, X., & Hu, Y. (2015). Synchronous brain activity during cooperative exchange depends on gender of partner: A fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping*, 36(6), 2039–2048.
- Cui, X., Bryant, D. M., & Reiss, A. L. (2012). NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *NeuroImage*, 59(3), 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.003>
- Czeszumski, A., Eustergerling, S., Lang, A., Menrath, D., Gerstenberger, M., Schubert, S., ... König, P. (2020). Hyperscanning: A valid method to study neural inter-brain underpinnings of social interaction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 39.
- Czeszumski, A., Liang, S. H. -Y., Dikker, S., König, P., Lee, C. -P., Koole, S. L., & Kelsen, B. (2022). Cooperative behavior evokes interbrain synchrony in the prefrontal and temporoparietal cortex: A systematic review and meta-analysis of fNIRS hyperscanning studies. *eNeuro*, 9(2), ENEURO.0268-21.2022.
- Farroni, T., Csibra, G., Simion, F., & Johnson, M. H. (2002). Eye contact detection in humans from birth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(14), 9602–9605.
- Fitzpatrick, P., Frazier, J. A., Cochran, D. M., Mitchell, T., Coleman, C., & Schmidt, E. R. (2016). Impairments of social motor synchrony evident in autism spectrum disorder. *Frontiers in Psychology*, 7, 1323.
- Gamliel, H. N., Nevat, M., Probolovski, H. Z. G., Karklinsky, M., Han, S., & Shamay-Tsoory, S. G. (2021). Inter-group conflict affects inter-brain synchrony during synchronized movements. *NeuroImage*, 245, 118661. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118661>
- Gvirts, H. Z., & Perlmutter, R. (2019). What guides us to neurally and behaviorally align with anyone specific? A neurobiological model based on fNIRS hyperscanning studies. *The Neuroscientist*, 26(2), 108–116. <https://doi.org/10.1177/1073858419861912>
- Hakim, U., De Felice, S., Pinti, P., Zhang, X., Noah, J. A., Ono, Y., ... Tachtsidis, I. (2023). Quantification of inter-brain coupling: A review of current methods used in haemodynamic and electrophysiological hyperscanning studies. *NeuroImage*, 280, 120354. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120354>
- Hamilton, A. F. D. C. (2021). Hyperscanning: Beyond the hype. *Neuron*, 109(3), 404–407.
- Hasson, U., & Frith, C. D. (2016). Mirroring and beyond: Coupled dynamics as a generalized framework for modelling social interactions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1693), 20150366.
- Hasson, U., Ghazanfar, A. A., Galantucci, B., Garrod, S., & Keysers, C. (2012). Brain-to-brain coupling: A mechanism for creating and sharing a social world. *Trends in Cognitive Science*, 16(2), 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.007>
- Holroyd, C. B. (2022). Interbrain synchrony: On wavy ground. *Trends in Neurosciences*, 45(5), 346–357. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2022.02.002>
- Hu, Y., Hu, Y., Li, X., Pan, Y., & Cheng, X. (2017). Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(12), 1835–1844.
- Hu, Y., Pan, Y., Shi, X., Cai, Q., Li, X., & Cheng, X. (2018). Inter-brain synchrony and cooperation context in interactive decision making. *Biological Psychology*, 133, 54–62.
- Iacoboni, M., & Dapretto, M. (2006). The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(12), 942–951.
- Jiang, J., Chen, C., Dai, B., Shi, G., Ding, G., Liu, L., & Lu, C. (2015). Leader emergence through interpersonal neural synchronization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4274–4279.

- Jiang, J., Dai, B., Peng, D., Zhu, C., Liu, L., & Lu, C. (2012). Neural Synchronization during face-to-face communication. *The Journal of Neuroscience*, 32(45), 16064–16069. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.2926-12.2012>
- Jiang, J., Zheng, L., & Lu, C. (2021). A hierarchical model for interpersonal verbal communication. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 16(1-2), 246–255.
- Khalil, A., Musacchia, G., & Iversen, J. R. (2022). It takes two: Interpersonal neural synchrony is increased after musical interaction. *Brain Sciences*, 12(3), 409.
- Kingsbury, L., Huang, S., Wang, J., Gu, K., Golshani, P., Wu, Y. E., & Hong, W. (2019). Correlated neural activity and encoding of behavior across brains of socially interacting animals. *Cell*, 178(2), 429–446.e416. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2019.05.022>
- Kinreich, S., Djalovski, A., Kraus, L., Louzoun, Y., & Feldman, R. (2017). Brain-to-brain synchrony during naturalistic social interactions. *Scientific Reports*, 7(1), 17060.
- Konvalinka, I., & Roepstorff, A. (2012). The two-brain approach: How can mutually interacting brains teach us something about social interaction? *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 215.
- Koul, A., Ahmar, D., Iannetti, G. D., & Novembre, G. (2023). Spontaneous dyadic behavior predicts the emergence of interpersonal neural synchrony. *NeuroImage*, 277, 120233. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120233>
- Kourtis, D., Knoblich, G., Woźniak, M., & Sebanz, N. (2014). Attention allocation and task representation during joint action planning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(10), 2275–2286. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00634
- Kurihara, Y., Takahashi, T., & Osu, R. (2024). The topology of interpersonal neural network in weak social ties. *Scientific Reports*, 14(1), 4961.
- Launay, J., Tarr, B., & Dunbar, R. I. M. (2016). Synchrony as an adaptive mechanism for large - scale human social bonding. *Ethology*, 122(10), 779–789.
- Li, R., Mayseless, N., Balters, S., & Reiss, A. L. (2021). Dynamic inter-brain synchrony in real-life inter-personal cooperation: A functional near-infrared spectroscopy hyperscanning study. *NeuroImage*, 238, 118263.
- Li, Y., Chen, R., Turel, O., Feng, T., Zhu, C., & He, Q. (2021). Dyad sex composition effect on inter-brain synchronization in face-to-face cooperation. *Brain Imaging and Behavior*, 15(3), 1667–1675.
- Li, Y., Luo, X., Wang, K., & Li, X. (2023). Persuader-receiver neural coupling underlies persuasive messaging and predicts persuasion outcome. *Cerebral Cortex*, 33(11), 6818–6833.
- Liu, L., Ding, X., Li, H., Zhou, Q., Gao, D., Lu, C., & Ding, G. (2021). Reduced listener–speaker neural coupling underlies speech understanding difficulty in older adults. *Brain Structure and Function*, 226(5), 1571–1584.
- Liu, L., Zhang, Y., Zhou, Q., Garrett, D. D., Lu, C., Chen, A., ... Ding, G. (2020). Auditory–articulatory neural alignment between listener and speaker during verbal communication. *Cerebral Cortex*, 30(3), 942–951. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz138>
- Liu, T., Saito, G., Lin, C., & Saito, H. (2017). Inter-brain network underlying turn-based cooperation and competition: A hyperscanning study using near-infrared spectroscopy. *Scientific Reports*, 7(1), 8684. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09226-w>
- Liu, W., Branigan, H. P., Zheng, L., Long, Y., Bai, X., Li, K., ... Lu, C. (2019). Shared neural representations of syntax during online dyadic communication. *NeuroImage*, 198, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.05.035>
- Long, Y., Zheng, L., Zhao, H., Zhou, S., Zhai, Y., & Lu, C. (2020). Interpersonal neural synchronization during interpersonal touch underlies affiliative pair bonding between romantic couples. *Cerebral Cortex*, 31(3), 1647–1659. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa316>
- Lu, H., Wang, X., Zhang, Y., Huang, P., Xing, C., Zhang, M., & Zhu, X. (2023). Increased interbrain synchronization and neural efficiency of the frontal cortex to enhance human coordinative behavior: A combined hyper-tES and fNIRS study. *NeuroImage*, 282, 120385. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120385>
- Mayo, O., & Gordon, I. (2020). In and out of synchrony—Behavioral and physiological dynamics of dyadic interpersonal coordination. *Psychophysiology*, 57(6), e13574.
- Ménoret, M., Varnet, L., Fargier, R., Cheylus, A., Curie, A., des Portes, V., ... Paulignan, Y. (2014). Neural correlates of non-verbal social interactions: A dual-EEG study. *Neuropsychologia*, 55, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.10.001>
- Miles, L. K., Griffiths, J. L., Richardson, M. J., & Macrae, C. N. (2009). Too late to coordinate: Contextual influences on behavioral synchrony. *European Journal of Social Psychology*, 40(1), 52–60. <https://doi.org/10.1002/ejsp.721>
- Miles, L. K., Lumsden, J., Richardson, M. J., & Neil Macrae, C. (2011). Do birds of a feather move together? Group membership and behavioral synchrony. *Experimental Brain Research*, 211(3-4), 495–503. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2641-z>
- Mu, Y., Guo, C., & Han, S. (2016). Oxytocin enhances inter-brain synchrony during social coordination in male adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11(12), 1882–1893. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw106>
- Müller, V., Perdakis, D., Mende, M. A., & Lindenberger, U. (2021). Interacting brains coming in sync through their minds: An interbrain neurofeedback study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1500(1), 48–68.
- Nguyen, T., Schleihau, H., Kungl, M., Kayhan, E., Hoehl, S., & Vrtička, P. (2021). Interpersonal neural synchrony during father–child problem solving: An FNIRS hyperscanning study. *Child Development*, 92(4), e565–e580.

- Novembre, G., Knoblich, G., Dunne, L., & Keller, P. E. (2017). Interpersonal synchrony enhanced through 20 Hz phase-coupled dual brain stimulation. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(4), 662–670.
- Novembre, G., Sammler, D., & Keller, P. E. (2016). Neural alpha oscillations index the balance between self-other integration and segregation in real-time joint action. *Neuropsychologia*, 89, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.07.027>
- Nozaradan, S., Peretz, I., Missal, M., & Mouraux, A. (2011). Tagging the neuronal entrainment to beat and meter. *Journal of Neuroscience*, 31(28), 10234–10240. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0411-11.2011>
- Nummenmaa, L., Glerean, E., Viinikainen, M., Jääskeläinen, I. P., Hari, R., & Sams, M. (2012). Emotions promote social interaction by synchronizing brain activity across individuals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(24), 9599–9604.
- Nummenmaa, L., Saarimäki, H., Glerean, E., Gotsopoulos, A., Jääskeläinen, I. P., Hari, R., & Sams, M. (2014). Emotional speech synchronizes brains across listeners and engages large-scale dynamic brain networks. *NeuroImage*, 102, 498–509.
- Pan, Y., Cheng, X., Zhang, Z., Li, X., & Hu, Y. (2016). Cooperation in lovers: An fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping*, 38(2), 831–841.
- Pan, Y., Novembre, G., Song, B., Zhu, Y., & Hu, Y. (2021). Dual brain stimulation enhances interpersonal learning through spontaneous movement synchrony. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 16(1–2), 210–221. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaa080>
- Pérez, A., Carreiras, M., & Duñabeitia, J. A. (2017). Brain-to-brain entrainment: EEG interbrain synchronization while speaking and listening. *Scientific Reports*, 7(1), 4190.
- Pickering, M. J., & Garrod, S. (2006). Alignment as the basis for successful communication. *Research on Language and Computation*, 4(2), 203–228.
- Reindl, V., Gerloff, C., Scharke, W., & Konrad, K. (2018). Brain-to-brain synchrony in parent-child dyads and the relationship with emotion regulation revealed by fNIRS-based hyperscanning. *NeuroImage*, 178, 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.05.060>
- Reindl, V., Wass, S., Leong, V., Scharke, W., Wistuba, S., Wirth, C. L., Konrad, K., & Gerloff, C. (2022). Multimodal hyperscanning reveals that synchrony of body and mind are distinct in mother-child dyads. *NeuroImage*, 251, 118982.
- Réveillé, C., Vergotte, G., Perrey, S., & Bosselut, G. (2024). Using interbrain synchrony to study teamwork: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 159, 105593. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2024.105593>
- Schmälzle, R., Häcker, F. E., Honey, C. J., & Hasson, U. (2015). Engaged listeners: Shared neural processing of powerful political speeches. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 10(8), 1137–1143.
- Sened, H., Zilcha-Mano, S., & Shamay-Tsoory, S. (2022). Inter-brain plasticity as a biological mechanism of change in psychotherapy: A review and integrative model. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 955238.
- Shamay-Tsoory, S. G. (2022). Brains that fire together wire together: Interbrain plasticity underlies learning in social interactions. *The Neuroscientist*, 28(6), 543–551.
- Shamay-Tsoory, S. G., Saporta, N., Marton-Alper, I. Z., & Gvirts, H. Z. (2019). Herding brains: A core neural mechanism for social alignment. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(3), 174–186.
- Sinha, N., Maszczyk, T., Wanxuan, Z., Tan, J., & Dauwels, J. (2016). *EEG hyperscanning study of inter-brain synchrony during cooperative and competitive interaction*. 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), (pp. 004813–004818). IEEE.
- Spratling, M. W. (2017). A review of predictive coding algorithms. *Brain and Cognition*, 112, 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.11.003>
- Stephens, G. J., Silbert, L. J., & Hasson, U. (2010). Speaker-listener neural coupling underlies successful communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(32), 14425–14430.
- Susnoschi Luca, I., Putri, F. D., Ding, H., & Vucković, A. (2021). Brain synchrony in competition and collaboration during multiuser neurofeedback-based gaming. *Frontiers in Neuroergonomics*, 2, 749009.
- Tang, H., Mai, X., Wang, S., Zhu, C., Krueger, F., & Liu, C. (2016). Interpersonal brain synchronization in the right temporo-parietal junction during face-to-face economic exchange. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11(1), 23–32. <https://doi.org/10.1093/scan/nsv092>
- Ursino, M., Ricci, G., & Magosso, E. (2020). Transfer entropy as a measure of brain connectivity: A critical analysis with the help of neural mass models. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 14, 45.
- Valencia, A. L., & Froese, T. (2020). What binds us? Inter-brain neural synchronization and its implications for theories of human consciousness. *Neuroscience of Consciousness*, 2020(1), niaa010.
- Van Overwalle, F., & Baetens, K. (2009). Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: A meta-analysis. *NeuroImage*, 48(3), 564–584.
- Wang, M., Luan, P., Zhang, J., Xiang, Y., Niu, H., & Yuan, Z. (2018). Concurrent mapping of brain activation from multiple subjects during social interaction by hyperscanning: A mini-review. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 8(8), 819–837.
- Wang, X., Zhang, Y., He, Y., Lu, K., & Hao, N. (2022). Dynamic inter-brain networks correspond with specific communication behaviors: Using functional near-infrared spectroscopy hyperscanning during creative and non-

- creative communication. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 907332.
- Wang, Y., & Chen, W. (2020). Effective brain connectivity for fNIRS data analysis based on multi-delays symbolic phase transfer entropy. *Journal of Neural Engineering*, 17(5), 056024.
- Wass, S. V., Whitehorn, M., Haresign, I. M., Phillips, E., & Leong, V. (2020). Interpersonal neural entrainment during early social interaction. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(4), 329–342.
- Xie, E., Liu, M., Li, K., Nastase, S. A., Gao, X., & Li, X. (2023). The single-and dual-brain mechanisms underlying the adviser's confidence expression strategy switching during influence management. *NeuroImage*, 270, 119957.
- Xu, X., Kong, Q., Zhang, D., & Zhang, Y. (2024). An evaluation of inter-brain EEG coupling methods in hyperscanning studies. *Cognitive Neurodynamics*, 18(1), 67–83.
- Yang, J., Zhang, H., Ni, J., De Dreu, C. K. W., & Ma, Y. (2020). Within-group synchronization in the prefrontal cortex associates with intergroup conflict. *Nature Neuroscience*, 23(6), 754–760. <https://doi.org/10.1038/s41593-020-0630-x>
- Yang, L., Li, M., Yang, L., Wang, H., Wan, H., & Shang, Z. (2020). Functional connectivity changes in the intra- and inter-brain during the construction of the multi-brain network of pigeons. *Brain Research Bulletin*, 161, 147–157.
- Zhang, M., Jia, H., Zheng, M., & Liu, T. (2021). Group decision-making behavior in social dilemmas: Inter-brain synchrony and the predictive role of personality traits. *Personality and Individual Differences*, 168, 110315.
- Zhang, W., & Yartsev, M. M. (2019). Correlated neural activity across the brains of socially interacting bats. *Cell*, 178(2), 413–428.
- Zhao, Q., Zhao, W., Lu, C., Du, H., & Chi, P. (2024). Interpersonal neural synchronization during social interactions in close relationships: A systematic review and meta-analysis of fNIRS hyperscanning studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 158, 105565. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2024.105565>
- Zheng, L., Liu, W., Long, Y., Zhai, Y., Zhao, H., Bai, X., ... Liu, L. (2020). Affiliative bonding between teachers and students through interpersonal synchronisation in brain activity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 15(1), 97–109.
- Zhou, C., Han, M., Liang, Q., Hu, Y., & Kuai, S. (2019). A social interaction field model accurately identifies static and dynamic social groupings. *Nature Human Behaviour*, 3(8), 847–855.

The mechanisms and functions of inter-brain synchronization

SHU Xindi¹, LIU Hanyin¹, WANG Jin¹, LIU Zhiyuan², LIU Lanfang^{1,3}

(¹ Faculty of Psychology, School of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China)

(² Faculty of Psychology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(³ Center for Cognition and Neuroergonomics at the State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China)

Abstract: By simultaneously recording brain signals from multiple individuals during interpersonal communication, inter-brain synchronization (IBS) have been consistently observed in hyperscanning studies. Through co-representation and mutual prediction mechanisms, indirect factors such as similar sensory inputs, motor outputs, and attentional arousal between individuals, as well as inter-individual information transfer activities, drive IBS. It's worth noting that the mirror neuron system, the mentalizing system, and the mutual attention, synchronization, and reward loop play important roles. The strength of IBS is modulated by the interaction type and intensity, task context, interpersonal relationships, and individual characteristics and states. IBS may have functional significance in interpersonal movement coordination, verbal communication and the establishment of social bonds. Further research can explore the relationship between “co-representation” and “mutual prediction” mechanisms, interpersonal “de-synchronization”, cross-brain plasticity, and the comparison of different forms of interaction.

Keywords: interpersonal interaction, inter-brain synchronization, co-representation, predictive coding