PIBB 生物化学与生物物理进展
Progress in Biochemistry and Biophysics
XXXX, XX(XX): 1~17
www.pibb.ac.cn

社会互动中脑–脑耦合的跨情境驱动机制*

王正义[1)**] 舒蕾锦[1,2)**] 于海情[1,3)***] 陈远方[4)] 许敏鹏[1,3)] 钟子平[1,5)] 明 东[1,3)]

([1)] 天津大学医学工程与转化医学研究院，天津 300072；
[2)] 天津大学医学工程与转化医学研究院，先进医用材料与医疗器械全国重点实验室，天津 300072；
[3)] 脑机交互与人机共融海河实验室，天津 300384；[4)] 北京机械设备研究研究所，北京 100120；
[5)] 加州大学圣地亚哥分校Swartz计算神经科学中心，圣地亚哥 CA92093）

摘要 社会互动作为人类认知与行为发展的核心，研究其神经机制有助于揭示群体协作、知识传递等高级社会功能的神经生物学基础。近年来，社会神经科学研究利用超扫描（hyperscanning）技术和脑-脑耦合（brain-to-brain coupling，BBC）分析，揭示了社会互动中的群体神经动力学机制。研究主要覆盖了与社会互动高度相关的人际交流、任务协作和师生教学等3个情境。然而，目前尚未在统一的框架下分析不同情境的脑-脑耦合驱动因素及其在自然范式下的相互作用模式，各因素在不同情境、范式中的脑-脑耦合驱动机制尚未明确。因此，本综述将以社会互动中生态效度递增的3个社交情境为主线，系统梳理不同情境的超扫描研究范式及脑-脑耦合模式，总结评述不同情境下、不同研究范式中外源性与内源性驱动因素对脑-脑耦合的作用机制，构建跨社交情境的脑-脑耦合驱动机制理论框架，以期为社会神经科学研究中自然范式的驱动因素变量控制提供方法学依据。

关键词 超扫描，社会神经科学，脑-脑耦合，驱动因素，驱动机制
中图分类号 R138，Q189 **DOI**：10.3724/j.pibb.2025.0257 **CSTR**：32369.14.pibb.20250257

PIBB Online First

社会互动（social interaction）是指个体或群体在社会环境中通过语言交流、情感表达、信息传递和行为互动等多种形式进行相互作用和影响的过程[1]。社会互动情境包括对话[2]、决策[3]、协作与竞争[4]、教学[5]等，有助于促进大脑的语言、情感以及认知控制功能发展。通过深入研究社会互动对大脑和行为的影响，可以为社会科学领域发展提供宝贵的理论和实践支持。然而，受限于传统单人神经科学研究，我们对于人际层面的动态社交互动行为与神经过程知之甚少。近年来，社会神经科学（social neuroscience）的出现为解决这一难题提供了一种全新的视角[6]，通过研究社会互动过程中大脑的动态活动，揭示人类社会行为和相关认知过程潜在的神经生理学机制，有助于理解人类社会的运作模式，促进个体的社会认知功能发展[7]。

传统社会神经科学研究主要关注实证主义范式下个体以第三人称视角对社会互动场景的反应，这类研究容易受到个体内任务无关内源性神经活动的影响[8]。因此，为了深入探究个体以第一人称视角参与实时社会互动的神经过程，一方面Kingsbury等[9]提出了多脑框架，将社会互动中的多个个体视为一个神经集成系统，系统内部的行为、共享认知状态和社会关系随着互动过程动态演进。另一方面，超扫描（hyperscanning）技术[10]能够对处于社会互动中的两人或多人的大脑活动进行同步记录，为研究对象从单脑向多脑框架迁移提供了新的途径。现有的超扫描技术主要基于功能近红外光谱成像（functional near-infrared spectroscopy，fNIRS）[4]、功能磁共振成像（functional magnetic resonance imaging，fMRI）[11]、

* 国家重点研发计划（2023YFF1203900），国家自然科学基金（62406220），中国博士后科学基金（2023M742604）和国家资助博士后研究人员计划（GZC20231916）资助项目。
** 并列第一作者。
*** 通讯联系人。
Tel：022-83612122，E-mail：haiqingyu@tju.edu.cn
收稿日期：2025-05-26，接受日期：2025-09-29

脑电图（electroencephalogram，EEG）[12] 和脑磁图（magnetoencephalography，MEG）[13] 等功能神经影像学或电生理学方法。此外，部分超扫描研究创新性地引入脑际同步经颅交流电刺激（hyper-transcranial alternating current stimulation，hyper-tACS）作为神经调控手段到实验范式，探究了外源性电刺激 [14] 对语义理解的影响。此外，超扫描研究正在从实证主义范式 [15] 向自然主义范式 [16] 发展，强调研究对象处于的环境、状态的自然性对社会互动神经过程的影响。

多脑框架主要关注在交互中多个个体神经活动、人际层面的脑间神经动力学及其与共享行为变量的关系，2012 年，Hasson 等 [17] 首次提出了脑-脑耦合（brain-to-brain coupling，BBC）这一脑间神经动力学模式，并将其定义为：在共享注意力的前提下，由刺激属性和个体差异共同驱动的个体间大脑活动模式随时间推移逐渐趋于一致的现象。目前，脑-脑耦合已被发现与任务参与度 [18]、注意力 [19]、记忆保持水平 [20]、决策 [4]、沟通质量 [11]、社会亲密度 [21] 等认知与社交状态相关。现有研究表明，社会互动过程中的脑-脑耦合受到外源性因素和内源性因素的共同驱动 [16]，如图 1 所示，在外源性驱动因素方面，人际交流、任务协作与师生教学均依赖语言与非语言节律的协调及互动行为的频率与质量来维系基本的社会互动，但三者在具体调控机制上存在差异。人际交流主要通过言语节律的匹配以促进双方对交流内容形成共享注意；任务协作情境在人际交流的基础上引入行为协调、运动同步等共享目标导向调节过程，并延伸至非社会性刺激（如催产素、hyper-tACS）所介导的神经调节效应；师生教学情境中虽然也存在非社会刺激，但是主要凸显非社会性刺激对知识传递效率和认知的调控功能，在内源性驱动因素方面，社会亲密度、共享注意与共享理解在人际交流、任务协作与师生教学中普遍发挥作用，但其内在机制在任务协作与师生教学中存在情境特异性。任务协作情境以共享意图为核心，诱发脑-脑耦合并推动群体在共同目标导向下实现运动同步与行为协调；师生教学情境中，学生在社会环境影响与模仿倾向下形成的从众心理，成为驱动学生群体形成脑-脑耦合的关键机制。综上，不同社会情境在外源性与内源性驱动因素上既存在普遍性，也呈现出差异化的调控模式。通过引入单脑框架下常用的功能连接指标来度量脑-脑耦合 [22]，研究脑-脑耦合与共享行为变量之间的映射关系，可以揭示社会互动中群体的脑际神经机制。

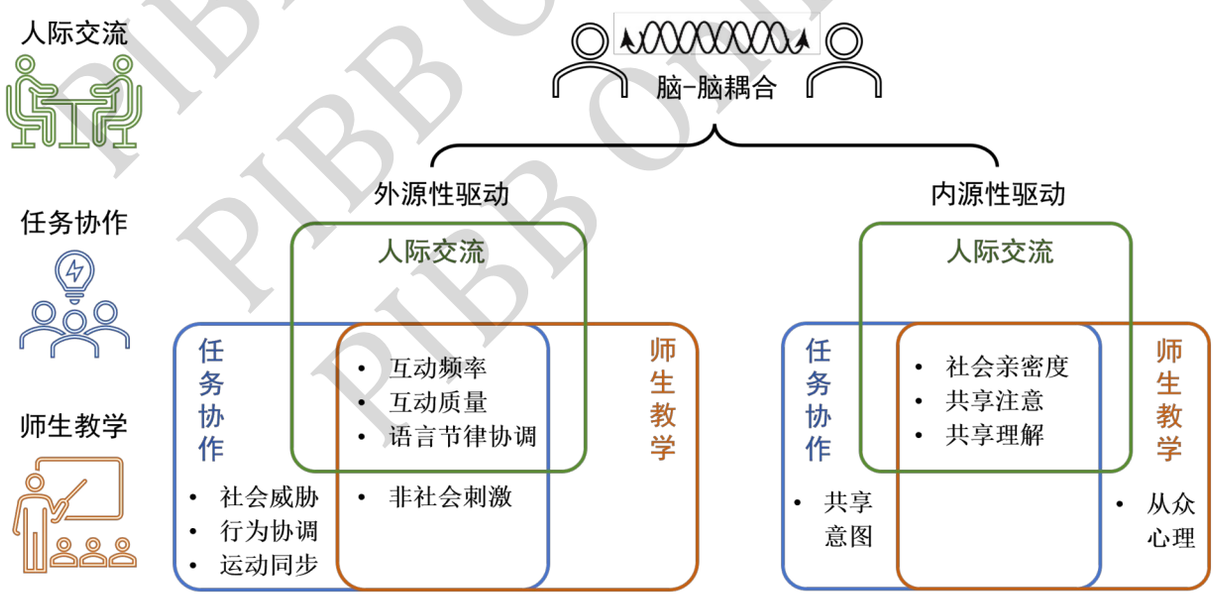


Fig. 1 Endogenous and exogenous drivers of brain−to −brain coupling in different social contexts

图1 不同社交情境下的脑–脑耦合内、外源性驱动因素

外源性驱动因素方面，互动频率、互动质量和语言节律协调在所有社交情境中均有体现，任务协作情境中特有的外源性因素是社会威胁、行为协调与运动同步，非社会性刺激主要存在于任务协作和师生教学情境中；外源性驱动因素方面，社会亲密度、共享注意和共享理解在所有社交情境中均有体现，任务协作情境中特有的内源性驱动因素是共享意图，师生教学情境中特有的内源性驱动因素是从众心理。

PIBB Online First

综上，尽管社会互动中的脑-脑耦合驱动机制已在超扫描研究中得到广泛探讨，但现有研究多局限于单一情境或特定驱动因素，缺乏跨情境、跨范式的系统性整合。部分综述虽覆盖多个社会互动情境，但尚未深入比较相同脑-脑耦合驱动因素在不同社交情境中的作用异同，更缺乏基于跨情境统一理论框架的系统性总结归纳。为回应这一不足，本文以人际交流、任务协作和师生教学3类典型社会互动情境为主线，系统梳理并分析各情境下外源性与内源性脑-脑耦合驱动因素的作用机制，归纳其在不同互动情境中的异同。在此基础上，进一步构建跨社交情境的脑-脑耦合驱动机制理论框架，为不同社交情境研究范式设计中的驱动变量控制提供方法学依据，从而为未来社会神经科学中脑-脑耦合驱动机制的系统研究提供新的理论视角与实践参考。

1 人际交流情境的脑–脑耦合驱动机制研究进展

在人际交流相关的超扫描研究中，语言交流[23]与非语言交流（眼神交流[24]与情感共情[25]等）任务常作为经典范式，用于研究交流者脑-脑耦合与信息加工相关过程的协同变化机制。总体而言，语言交流更依赖外源性语言节律协调与内源性共享理解，眼神交流主要通过共享注意触发脑-脑耦合，情感交流则体现社会亲密度对共享理解的驱动作用。基于此框架，本节系统梳理人际交流任务中脑-脑耦合的外源性与内源性驱动机制，并总结其在不同交流类型中的作用特征与异同，表1归纳了基于上述3类范式的脑-脑耦合驱动机制研究进展。需要说明的是，任务协作与师生教学过程中涉及的人际交流将分别在后续两节中另行详细阐述，以便更全面地呈现人际交流在不同社会互动情境下的应用特征。

1.1 语言交流的脑–脑耦合驱动机制研究

语言是人类社会互动的基本要素[23]。在超扫描研究中，语言交流任务常被用于探讨说者与听者在语音感知和语义理解过程中的脑-脑耦合形成机制。Schoot等[26]将单脑框架中经典的语音处理双流模型[27]扩展到多脑框架，指出对话者之间成功的语言交流不仅需要背侧流和腹侧流协同处理语音信号的产生、接收和加工，还需要实现动态语义概念对齐以克服语义歧义，从而达成相互理解。在此过程中，说者和听者共同激活的语言功能脑区驱动了脑-脑耦合的出现。现有研究表明，语言交流中的脑-脑耦合由外源性与内源性因素共同驱动。对语音感知过程而言，外源性因素主要体现为语言节律的协调。Kawasaki等[28]使用EEG超扫描技术，通过对比分析人类-人类二元组（两个个体组成的互动小组）、人类-机器人二元组在轮流叙述字母任务间的脑-脑耦合模式，发现了人类-人类二元组特有的语言节律（叙述持续时间、间隔、语速）协调同步现象，可能调动了二元组对于语言节律的共享注意力，增强了颞-顶联合区（temporoparietal junction，TPJ）theta和alpha频带的脑-脑耦合水平。值得注意的是，人类-人类二元组互动期间个体内部alpha频带小波振幅受到抑制，表明轮流叙述可能需要对话者调用较多的工作记忆资源来协调交流。为了进一步区分语音和语义信息对说者-听者脑-脑耦合的影响，Li等[29]通过在不同母语背景的说者（汉语）和听者（韩语）之间开展汉语叙述任务，并在叙述过程中施加不同水平的背景噪声，发现说者-听者右侧颞上回（superior temporal gyrus，STG）的脑-脑耦合主要与语音包络特征相关，非汉语母语听者对于叙述任务的语义理解水平会受到背景噪声的负面影响，表明低级听觉加工阶段的脑-脑耦合主要受到外源性语音学特征驱动。上述研究表明，在语言交流过程中，对话者主要通过个体间共享注意和个体内工作记忆能力来协调语音节律，从而诱发听觉信息加工和发音准备过程中相应功能脑区的脑-脑耦合水平增强。

在进一步的语义理解过程中，考虑到双向轮流叙述范式中语音刺激本身的节律性可能诱发虚假的脑-脑耦合，Silbert等[30]关注了自然主义单向叙述过程中说者-听者的脑-脑耦合分布脑区，使用fMRI对说者-听者二元组在叙述故事期间的大脑血流动力学活动进行串行的伪超扫描。研究表明，脑-脑耦合不仅分布在与听觉信息加工相关的左侧额下回（inferior frontal gyrus，IFG），双侧岛叶（insula）、前运动皮层（anterior motor cortex，AMC）、辅助运动皮层（supplementary motor cortex，SMC），同时也广泛分布在与语义理解过程相关的左侧颞中回（medial temporal gyrus，MTG）、双侧STG、颞极（temporal pole，TP）、角回（angular gyrus，AG）、TPJ等与语言处理表征相关的高级脑区，表明说话者-听者的共享理解可以促进高级和低级语言功能网络协同，进而驱动脑-脑耦合水平提升。综上，外源性驱动因素主要

PIBB Online First

在低级听觉加工阶段发挥作用，内源性共享注意驱动了语音感知等低级功能脑区的脑-脑耦合水平增强，内源性共享理解驱动了语义处理表征相关高级功能脑区的脑-脑耦合水平提升。语言交流任务适于解析从低级听觉感知（主要受外源性语音节律驱动）到高级语义处理（主要受内源性语义对齐与共享理解驱动）的多层次脑-脑耦合机制，其中共享注意作为内源性枢纽机制贯穿两者，并实现层级间的衔接。

1.2 非语言交流的脑–脑耦合驱动机制研究

除语言信息之外，人际互动中还有大量通过非语言线索完成的信息传递，其中，眼神交流是典型形式之一。在面对面条件下，相互凝视引起的眼神交流作为一种非语言互动，被认为是引起共享注意的交流模式。社交过程中，共享注意为个体之间聚焦于共同对象或目标提供共享认知基础，从而支持高效互动。Hirsch等[31]的研究发现，相较于非交互性的眼睛凝视图片条件，在双向交互凝视条件下，左侧额叶和TPJ区域的脑-脑耦合水平显著增加，表明共享注意期间脑际信息交流更为活跃，且上述脑区与语音感知和语义加工区域（Broca区和Wernicke区）有较大重叠，表明眼神交流可能与语言加工过程相关。Saito等[32]的fMRI超扫描研究进一步在非语言关注共同目标任务中比较了配对和非配对二元组的大脑活动，研究发现，相较于非配对二元组，配对二元组在共享注意期间的右侧IFG区域显示出显著更高的脑-脑耦合水平，反映了共享注意对形成共享认知表征的促进作用，从而通过内化他人意图来实现共享意图。该发现与语言交流中的内源性驱动机制存在共性，即共享注意是触发更高层次认知表征的关键前提。

在短时互动中，眼神交流通过触发共享注意来驱动脑-脑耦合水平提升；但在长期亲密关系中，主要表现为社会亲密度对脑-脑耦合的持续驱动作用。亲密关系是两个人之间深刻而有意义的人际联系，涉及高度的互动、沟通和共享经历[33]。它以多种形式表现出来，包括恋人、朋友、亲子以及个人生活中重要的其他关系。其中，亲子关系和恋人关系尤为重要，因为它们具有独特的情感、心理和社会动态。因此，社会亲密度的超扫描研究主要是观察亲子[34]或恋人[35]二元组在情感交流任务中的脑-脑耦合模式。目前研究一致表明，在情感交流（如情感共情[36]、肢体接触[37]）任务中，恋人、亲子比陌生人二元组表现出更强的脑-脑耦合水平。Zhou等[37]使用EEG超扫描记录了恋人和陌生人二元组握手期间的脑电活动，发现恋人二元组在握手后期的额叶脑-脑耦合水平显著高于陌生人二元组，可能表明陌生人之间在握手过程中由于缺乏社会亲密度从而产生紧张或不适，造成脑-脑耦合水平降低。亲子超扫描研究中有类似的发现，在母婴肢体互动中，真实母婴二元组相较于随机配对二元组在额叶和中央区的theta频带脑-脑耦合显著更高，表明了社会亲密度对于脑-脑耦合的驱动作用[38]。

值得注意的是，受到角色关系差异影响，不同亲密关系下驱动脑-脑耦合的路径有所差异。在亲子关系中，Nguyen等[39]发现，母亲对婴儿的抚摸次数与二者前额叶皮层（prefrontal cortex，PFC）区域的脑-脑耦合水平呈正相关，表明婴儿时期的互动主要来源于触觉、视觉等多模态信息整合，并调用了母婴之间的共享注意力，促使脑-脑耦合水平提高。另一项母婴EEG超扫描研究通过对比单一视觉互动与视觉、触觉联合互动下的额叶theta频段的脑-脑耦合，进一步验证了上述观点[40]。在恋人关系中，Goldstein等[36]通过研究恋人握手缓解疼痛的脑-脑耦合机制，对脑-脑耦合驱动机制提出了不同的见解：恋人之间顶叶alpha频段的脑-脑耦合虽然也涉及面对面握手期间触觉和视觉等多模态信息整合，但其主要来源于非疼痛者对疼痛者的同理心衍生的共享理解。综上，亲密关系的特点是广泛且持续的互动，这不仅促进了关系双方的熟悉感和更高效、深入的相互理解，也为共享注意和共享理解的形成提供了基础。社会亲密度通过增强个体在互动中关注对方信息的倾向与解读对方意图的能力，从而促进脑-脑耦合水平的提升。然而，受年龄、亲密关系类型及互动目标等因素影响，社会亲密度对脑-脑耦合及相关行为表现的驱动作用可能存在差异，其具体边界条件仍有待进一步探讨。

Prior to the Ems
Publication First
FIBS Online First

表1 人际交流情境的脑–脑耦合驱动因素的研究归纳

Table 1 Summary of drivers of brain–to–brain coupling in the interpersonal communication context

成像方式	耦合脑区	耦合频段	驱动因素	任务范式	主要结果
EEG [28]	TPJ	theta alpha	语言节律（外源）	在人类-人类和人类-机器人模式下轮流念英文字母	人类-人类相较人类-机器人二元组会产生语言节律协调；言语任务期间TPJ的theta和alpha频带脑-脑耦合相较观察任务期间增强
fNIRS [29]	右侧STG		语音包络（外源）	不同语言背景的说者和听者在不同背景噪声水平下开展单向叙述任务	说者-听者右侧STG的脑-脑耦合主要与语音包络特征相关，非母语听者的语义理解水平会受到背景噪声影响而降低
fMRI [30]	IFG、STG、TPJ等		语言节律（外源）共享理解（内源）	说者向听者单向叙述故事（有视觉接触）	说者-听者脑-脑耦合不仅分布在听觉信息加工相关脑区，还广泛分布在语义理解过程相关脑区
fNIRS [31]	额叶、TPJ		共享注意（内源）	二元组相互凝视或者各自凝视眼睛图片	在相互凝视眼睛期间额叶-TPJ区域的脑-脑耦合水平增强
fMRI [32]	IFG		共享注意（内源）	二元组跟随外部提示或伙伴注视点来关注共同目标	配对二元组相较非配对二元组在注意共同目标任务期间的IFG区域的脑-脑耦合水平显著更高
EEG [36]	顶叶	alpha	社会亲密度（内源）共享理解（内源）	恋人在接触/无接触和疼痛/无疼痛的组合条件下，男性判断女性的疼痛程度	在面对面握手接触条件下，顶叶alpha频段的脑-脑耦合与男性的共情程度呈正相关
EEG [37]	额叶		社会亲密度（内源）	恋人与陌生人二元组进行长时间握手	在握手后期，恋人二元组的额叶脑-脑耦合水平显著高于陌生人二元组
EEG [38]	额叶（母亲）颞叶（孩子）	theta	社会亲密度（内源）	母子面对面自由互动	真实母子二元组的theta频带额叶-颞叶脑-脑耦合水平显著高于随机二元组
fNIRS [39]	PFC		社会亲密度（内源）共享注意（内源）	母亲与婴儿面对面进行抚摸互动	面对面条件下，母亲对婴儿的抚摸次数与二者PFC区域的脑-脑耦合水平呈正相关
EEG [40]	额叶	theta	社会亲密度（内源）共享注意（内源）	母亲与婴儿在面对面条件下，进行有/无触摸的互动	相较单纯的视觉互动，视觉和触觉联合互动下的母婴二元组额叶theta频段的脑-脑耦合显著更强

TPJ：颞-顶联合区（temporoparietal junction）；STG：右侧颞上回（superior temporal gyrus）；IFG：额下回（inferior frontal gyrus）；PFC：前额叶皮层（prefrontal cortex）。

2 任务协作情境的脑–脑耦合驱动机制研究进展

在人际交流脑-脑耦合驱动机制的基础上，协作情境的超扫描研究进一步关注多个体在共同目标驱动下，如何通过调节脑际神经动力学实现高效的团队协作。与单纯的信息传递不同，协作强调行为与认知的双向协调，近年来，实验范式已从简单、非语言的肢体同步运动任务[41]，逐步拓展至更具生态效度的复杂协作情境[42-43]，如依赖认知协调

PIBB Online First

的联合决策（如囚徒困境、经济博弈等）、依赖语言交流的协作式问题解决（如头脑风暴等）。表2归纳了协作领域脑-脑耦合驱动因素的主要研究进展：外源性驱动因素主要涉及运动同步与行为协调，内源性驱动因素主要包括社会亲密度与共享意图。本节将从低层级行为到高层级认知，依次梳理不同类型协作任务中外源性与内源性脑-脑耦合驱动因素的作用机制，并总结其在各层级协作过程中的活动模式及其异同。

2.1 简单肢体动作模仿的脑–脑耦合驱动机制研究

肢体同步运动是指在社交情境下，个体间在时间或空间维度上协调一致地完成特定动作（如手指敲击、手臂摆动等）。这种同步性不同于语言交流的外显特性，属于一种内隐的人际互动形式[44]。镜像神经元系统在运动同步过程中发挥了关键作用，在神经层面上，人类的镜像神经元系统主要包括顶下小叶（inferior parietal lobule，IPL）和IFG，这些脑区通过前运动皮层（premotor cortex，PMC）和运动皮层（motor cortex， MC）的连接，形成从感知到执行的“镜像回路”，使观察他人动作能够在自身神经系统中被内部模拟（internal simulation），从而促进模仿学习和运动同步。在运动观察感知过程中，中央顶叶的mu节律活动被认为是镜像神经元系统的重要神经标志物。Tognoli等[45]使用EEG超扫描技术研究了二元组在视觉引导下，手指同步移动从无协调到协调状态的过程，发现个体右侧中央顶叶的特定频段（9.2~11.5 Hz）的能量变化会选择性增强/抑制镜像神经元活动可以反映人际行为协调的发生，并将其作为行为协调的神经标志物。Dumas等[46]进一步将mu节律的EEG信号分析拓展到脑际水平，发现自发模仿二元组右侧中央顶叶mu节律的脑-脑耦合水平相较于无模仿条件下显著增强，为Tognoli等的观点提供了脑际水平的证据。该研究还发现了被模仿者中央区-模仿者枕叶区域的beta频带非对称脑-脑耦合水平提升，可能反映了高级脑区对低级脑区在脑际水平的认知调制，从而实现运动同步等隐性社会互动。在运动规划执行过程中，相较于独自敲击手指任务，二元组互相模仿敲击手指任务中，PMC脑区的脑-脑耦合显著增加，PMC脑区的激活有助于个体在运动执行之前形成运动规划，从而促进个体间形成共享意图，驱动脑-脑耦合水平提升[47]。Yun等[48]进一步纵向对比了手指同步移动训练前后的脑-脑耦合及行为同步水平变化情况，发现经过手指跟随移动的合作训练后，二元组的无意识手指运动模式相较训练前变得更加同步，并伴随着领导者额叶与追随者顶叶的theta频段脑-脑耦合水平的显著提升，长距离theta频段相位同步被认为与内隐情绪处理相关[49]，可能反映了二元组内隐的运动行为预期，从而促进共享意图形成，驱动脑-脑耦合水平提升。

除了外源性节奏协调外，个体间的社会亲密度对运动同步水平也具有重要影响。Pan等[50]在一项简单的同步按键任务中，发现相较于陌生人和朋友二元组，恋人在合作任务期间的运动同步水平和右侧上额叶皮层（superior frontal cortex，SFC）的脑-脑耦合水平显著更高，首次提出了SFC在恋人情感交流和社会认知中的关键作用。除了恋人关系外，社会亲密度的影响还体现在其他类型的关系中。Hu等[51]采用相同的同步按键任务，发现左侧中前额叶（middle frontal cortex，MFC）的脑-脑耦合水平与二元组内的社会亲密度显著相关。更重要的是，该研究指出脑-脑耦合在运动同步和社会亲密度之间起到了中介作用，表明社会亲密度较高的个体之间更容易建立共享意图，从而形成更高水平的脑-脑耦合。亲子关系作为一种重要的亲密关系，也受到越来越多的研究关注[52]，研究表明，在合作任务中，亲子（如父子、母子、母女等）中的PFC和TPJ区域的脑-脑耦合水平显著提升，并且脑-脑耦合水平可以反映人际同步运动行为表现。然而，不同亲密关系对人际行为协调的具体影响存在一定差异。研究发现，不同亲子关系类型之间的协作水平可能在特定任务中有所不同[53-54]。未来的研究需要进一步探索这些差异，以更全面地揭示亲密关系对脑-脑耦合的作用机制。

2.2 复杂协同决策的脑–脑耦合驱动机制研究

考虑到社会互动的自然主义特性，近年来研究人员设计了具有更高认知需求和自然生态效度的协作超扫描范式（如囚徒困境和经济博弈等）。在这些复杂社交情境中，行为协调被认为是驱动脑-脑耦合的核心因素。在囚徒困境范式中，De Vico Fallani等[55]的EEG超扫描研究发现，相较于合作

PIBB Online First

行为，背叛行为的前扣带回（anterior cingulate cortex，ACC）区域的theta频段超脑网络连通性显著降低，合作行为的超脑网络模块度低于背叛行为，表明合作情境下个体间的神经交互更加紧密。ACC在社会冲突监测中发挥作用，通过推测他人意图、调整决策策略来促成长期合作与共享意图。进一步的研究探讨了非语言线索对囚徒困境合作行为的影响，发现仅在面对面互动中，合作策略比背叛策略在右侧TPJ的alpha频段驱动了更高的脑-脑耦合水平[56]。右侧TPJ作为心智理论（theory of mind，ToM）（推断他人心理状态）的关键脑区，其激活增强表明视觉信息在解读他人意图和促进共同理解中发挥了重要作用。表明在复杂度与认知需求较高的协作任务中，参与者进行合作时会综合利用多感官信息（尤其是视觉线索），更深入地理解和预测伙伴意图，从而实现行为协调和共享意图，并伴随着脑-脑耦合水平的提升。针对孤独症谱系障碍（autism spectrum disorder，ASD）患者的fNIRS超扫描研究进一步发现[57]，高孤独症特征个体的囚徒困境背叛率显著高于低孤独症特征个体，并且二元组的孤独症特质一致性也会影响右侧TPJ区域的脑-脑耦合水平。这一结果从临床角度印证了维持TPJ脑区高水平脑-脑耦合在合作行为中的重要性。当该脑区的功能受损时，可能导致共享理解水平降低、合作行为减少，并伴随脑-脑耦合水平降低。

外部动机以及非社会性刺激也是促成行为协调并驱动脑-脑耦合的关键驱动因素。在外部动机方面，外部压力或者外部威胁可能会促使群体内协作更加紧密[58]。Zhang等[4]使用fNIRS超扫描技术研究了经济博弈范式中的群体大脑活动，发现外部攻击期间，群体内部协作增强了右侧背外侧前额叶（dorsolateral prefrontal cortex，DLPFC）和右侧TPJ区域的脑-脑耦合水平，并且右侧DLPFC的脑-脑耦合水平与群体间敌意呈正相关，说明外部威胁可能通过引发同理心和群体认同感来增强行为协调。在非社会性刺激方面，生物调节机制和神经电刺激被发现能够显著提升脑-脑耦合水平。Mu等[59]的研究表明，催产素可以显著提升二元组之间中央顶叶的alpha频段脑-脑耦合水平，并有效提升行为协调表现。另外两项研究[14, 60]通过同步经颅交流电刺激（hyper-tACS）研究神经调控对脑-脑耦合的作用发现，相较反相位或伪刺激，仅同相位电刺激能够显著增强二元组的脑-脑耦合水平并改善协作表现，为脑-脑耦合与协作绩效的因果关系提供了证据。

2.3 复杂问题解决的脑–脑耦合驱动机制研究

协作式问题解决（如头脑风暴）要求团队成员在共同目标导向下进行高水平的信息交换与创意整合，该过程中脑-脑耦合的核心驱动因素是内源性共享意图。共享意图的形成过程受社交参与度与群体同质性等因素共同影响[61]。社交参与度对于共享意图的影响主要体现在：参与社交活动可以增加个体的社交频率和合作意愿。Lu等[62]对比了合作与竞争模式下完成头脑风暴任务的团队大脑活动，发现团队在合作模式中的右侧DLPFC和右侧TPJ的脑-脑耦合显著增强，且合作绩效更高。这表明头脑风暴等发散性思维任务需要团队成员积极分享创意，促进共享意图的形成，驱动脑-脑耦合增强，提升协作水平。进一步研究表明，与虚假合作组相比，真实合作组的DLPFC区域的脑-脑耦合水平随合作时间推移而显著增加，表明脑-脑耦合受社交参与度的动态驱动，可作为一种神经表征来追踪互动协作过程[63]。除了社交参与度外，群体同质性也是共享意图形成的关键驱动因素。当群体同质性更高时，团队成员可以更高效地接收并整合合作信息资源，从而加快共享意图的形成，并推动团队合作。Xue等[64]的研究显示，在头脑风暴任务中，创造力水平相似的二元组表现出更高的协作水平，且右侧DLPFC和TPJ区域的脑-脑耦合显著增强，并与协作水平呈正相关。相较而言，创造力差异较大的二元组更倾向于坚持自身观点，导致共享意图的形成受阻。这一点在双人协作学习诗歌任务情境中得到了验证，并发现诗歌鉴赏基础能力存在差异的二元组表现出显著更低左侧IFC和TPJ区域的脑-脑耦合水平[65]。综上，IFC区域可能在知识信息的动态双向传输中发挥关键作用，TPJ区域则涉及心智理论中的相互预测过程，两者共同促成二元组形成共享意图，驱动脑-脑耦合水平提升。

PBB Online First

表2 任务协作情境的脑–脑耦合驱动因素的研究归纳

Table 2 Summary of drivers of brain−to−brain coupling in the task cooperation context

成像方式	耦合脑区	耦合频段	驱动因素	任务范式	主要结果
EEG [45]	中央顶叶	alpha	运动同步（外源）	二元组同步移动手指从无协调状态到协调状态	个体中央顶叶的mu频段能量变化可以反映协调行为的出现
EEG [46]	中央顶叶、枕叶	alpha beta	运动同步（外源）	二元组无模仿/自发模仿同步敲击手指	相较无模仿条件，自发模仿条件下中央顶叶的mu节律、中央区-枕叶beta频段的脑-脑耦合显著更强
fNIRS [47]	PMC		运动同步（外源）	二元组各自/模仿同步敲击手指	相较独自敲击手指任务，模仿同步敲击任务下二元组PMC区域的脑-脑耦合显著更强
EEG [48]	额叶、顶叶	theta	运动同步（外源）	二元组进行指尖同步移动训练	指尖跟随移动训练后二元组额叶-顶叶的theta频段脑-脑耦合水平相较训练前显著提升
fNIRS [50]	右侧SFC		社会亲密度（内源）	恋人/朋友/陌生人二元组开展同步按键任务	恋人二元组的任务表现以及SFC区域的脑-脑耦合水平均显著高于其余两组
fNIRS [51]	左侧MFC		社会亲密度（内源）	二元组进行独立/同步按键任务，并通过情境任务评估社会亲密度	左侧MFC区域的脑-脑耦合水平在运动同步和社会亲密度之间起到中介作用
EEG [55]	ACC	theta	行为协调（外源）	二元组进行囚徒困境任务（合作/背叛）	相较合作行为，背叛行为ACC区域的theta超脑网络连通性显著降低，模块度显著增加
EEG [56]	右侧TPJ	alpha	行为协调（外源）	二元组在有/无视觉接触下开展囚徒困境任务	仅在面对面条件下，合作策略比背叛策略在TPJ区域的alpha频段驱动了更强的脑-脑耦合
fNIRS [57]	TPJ		行为协调（外源）	高-低/低-低程度孤独症二元组进行囚徒困境任务	相较高-低程度孤独症二元组，低-低程度孤独症二元组合作率更高，TPJ区域脑-脑耦合水平显著更强
fNIRS [4]	右DLPFC、右侧TPJ		外部威胁（外源）	三元组团队经济博弈范式	外部威胁期间，群体内部协作增强了右侧DLPFC和右侧TPJ区域的脑-脑耦合水平，反映了群体间敌意
EEG [59]	中央顶区	alpha	催产素（外源）	同性别二元组同步按键任务	仅在男性二元组中发现施加催产素后相较施加之前中央顶区alpha频段脑-脑耦合增强
fNIRS [14]	右侧STG		hyper-tACS（外源）	二元组符号沟通任务中施加虚假/反相/同相tACS	仅有同相tACS可以增强二元组STG的脑-脑耦合水平，并提升沟通任务准确率
EEG [60]	中央区	beta	hyper-tACS（外源）	二元组同步敲击手指的同时施加2/10/20 Hz同/反相tACS	仅同相20 Hz tACS可以增强二元组运动皮层脑-脑耦合水平，并改善运动同步表现
fNIRS [63]	右DLPFC、右侧TPJ		共享意图（内源）	二元组在真实合作/虚假合作/竞争条件下开展头脑风暴任务	相较竞争模式，合作模式下右DLPFC、TPJ的脑-脑耦合水平显著更高，并且真实合作条件下DLPFC的脑-脑耦合水平随时间推移增加
fNIRS [64]	右DLPFC、右侧TPJ		共享意图（内源）	创造力水平相似/不同的二元组开展头脑风暴任务	相较创造力水平不同的二元组，创造力水平相似的二元组的任务表现更好，DLPFC和TPJ区域的脑-脑耦合水平显著更高
fNIRS [65]	IFC、TPJ		共享意图（内源）	先验知识水平相似/不同的二元组开展教学任务	相较先验知识水平不同的二元组，先验知识水平相似的二元组的任务表现更好，IFC和TPJ区域的脑-脑耦合水平显著更高

TPJ：颞-顶联合区（temporoparietal junction）；DLPFC：背外侧前额叶（dorsolateral prefrontal cortex）；STG：右侧颞上回（superior temporal gyrus）；IFC：下额叶皮层（inferior frontal cortex）。

3 师生教学情境中的脑–脑耦合驱动机制研究进展

师生教学相关的超扫描研究主要聚焦于讲座式与脚手架式教学等不同教学模式，旨在揭示脑-脑耦合在知识传递过程中的动态变化及其与学习绩效之间的关系[66]。表3总结了该领域主要研究进展，外源性因素主要包括教学过程中的互动频率与互动

PIBB Online First

质量，内源性因素主要包括社会亲密度、共享注意和共享理解。以下将分别从讲座式教学与脚手架式教学两种典型教学模式出发，系统梳理不同驱动因素下的脑-脑耦合机制，并探讨其在不同教学模式中的适用性。

3.1 讲座式教学的脑–脑耦合驱动机制研究

师生关系是重要的社会关系之一，其社会亲密度不同于亲密关系（亲子、情侣）中的长期情感纽带，而是通过师生在教学过程中的社会角色分配和教学互动逐步建立，并驱动脑-脑耦合。Bevilacqua等[67]的EEG超扫描研究探讨了高中生物课堂中师生在不同教学模式（视频、讲座）下的大脑活动，仅在讲座教学中发现师生之间的顶叶alpha频段脑-脑耦合水平与师生社会亲密度呈显著正相关。这一点在学生群体中也得到了验证，针对学生小组合作学习的fNIRS超扫描研究发现，相较于独立学习模式，学生三元组（3个个体组成的互动小组）在合作学习模式下的左侧颞上皮质（superior temporal cortex，STC）、缘上回（supramarginal gyrus）和中央后回（postcentral gyrus）区域出现更强的组内脑-脑耦合，并且脑-脑耦合水平可以预测学生之间的社会亲密度[68]。上述研究表明，在合作学习过程中，语言和非语言交流（如目光接触、手势等）等社会互动行为共同增强了师生社会亲密度，并伴随着师生或学生群体脑-脑耦合水平的提升。

共享注意已经在各种社会互动情境下展现出对社会认知的促进作用[69-70]。在教育领域中，Dikker等[12]首次在真实课堂中使用便携式EEG开展超扫描研究，发现学生-群体顶叶alpha频段的脑-脑耦合受共享注意驱动，可以预测学生的课堂参与度，但与课堂绩效无关。针对研究中使用的便携式EEG超扫描设备精度可能存在不足的问题，Davidesco等[71]进一步采用了高精度EEG超扫描设备，记录了师生在不同主题的课堂讲座教学中的大脑活动，研究结果表明学生-群体顶叶alpha频段的脑-脑耦合预测了学生在课后测试中的绩效，支持了Dikker等[12]提出的共享注意对脑-脑耦合存在驱动作用的假设。共享注意的具体形成条件在Liu等[72]的fNIRS超扫描研究中得到进一步阐明，该研究分析了交流模式、初始知识状态对教学效果的影响，发现在学生具有先验知识的前提下，与计算机媒介教学模式相比，面对面教学期间学生的学习绩效和师生PFC区域的脑-脑耦合水平显著更高，表明面对面教学中的非语言线索（如面部表情、眼神交流等）能够有效调动师生之间的共享注意，驱动脑-脑耦合水平提升。该发现不仅验证了共享注意对脑-脑耦合的驱动作用，还揭示了其依赖于特定互动形式（如面对面互动）的特性。Chang等[73]进一步引入了从众心理，发现听众群体神经耦合不仅与讲座参与度显著相关，而且与讲者-听者神经耦合之间的相关性会随着时间推移逐渐增强。这一结果从连续时间维度上解释了学生个体的大脑活动可能受到共享注意的动态驱动，在教师持续教学引导下逐渐形成学生-群体神经耦合。

相比共享注意，共享理解直接体现了师生在知识传递过程中的认知对齐水平。共享理解已被证明在说话者-听者之间的口头交流中驱动二元组的脑-脑耦合。在教学情境中，师生间的语言互动（如知识传授、问答等）为共享理解的建立提供了重要条件。首先，Meshulam等[74]使用fMRI研究了师生二元组在计算机概念教学时的大脑活动，发现在默认模式网络（default mode network，DMN）和海马体（涉及记忆编码）的师生脑-脑耦合能够有效预测学生的学习绩效，研究者认为，这一现象可能源于教学过程中知识框架的构建促进了师生间的共享理解，进而驱动脑-脑耦合提升。另一项fMRI研究[75]进一步支持了这一观点，通过对比结构合理教学（幻灯片演示顺序合理）和结构混乱教学（幻灯片演示顺序错乱）对脑-脑耦合的影响，发现前者驱动了DMN区域脑-脑耦合，并能有效反映学生的认知绩效，而后者虽在PFC区域也观测到脑-脑耦合相对静息状态增强，却无法预测学习效果。这表明，师生对学习内容的共同理解（而非单纯的教学互动）才是驱动DMN等高级认知表征脑区脑-脑耦合的关键因素。这一发现与Meshulam等[74]的结论一致，并进一步细化了共享理解对脑-脑耦合的驱动机制。

3.2 脚手架教学的脑–脑耦合驱动机制研究

社会建构主义认为，师生互动是教学与学习的基础[76]，师生互动水平是理解和控制教学成果差异的潜在关键[77]。根据教学参与理论[78]，师生互动水平主要受互动频率和互动质量两个因素影响。就互动频率而言，师生之间的轮流交互行为能够诱发内源性共享注意，引导个体调整自身行为以适应同伴的动态变化，并提升脑-脑耦合水平。Pan等[79]使用fNIRS超扫描技术对师生歌曲教学过程进行了研究，研究发现单句教学（高频率互动）相较于整体教学（低频率互动）取得了更好的学习表

PIBB Online First

现，并且在IFC区域的脑-脑耦合水平显著更高，认为单句教学中更频繁的观察与模仿行为，调动了师生对于歌曲节律和曲调的共享注意，驱动了更强的脑-脑耦合。类似的，作为一种互动式教学方法，脚手架教学比传统以概念解释为主的讲座式教学绩效更高，并在教学期间呈现出更强的师生脑-脑耦合，主要分布在PFC和STC等脑区[5]。值得注意的是，相较于师生EEG活动时间对齐的条件，当教师的EEG活动领先学生300毫秒时，师生顶叶alpha频段的脑-脑耦合水平显著更高[71]。上述结果反映了师生高频率的协作互动教学促进了共享注意的建立，使师生更好地预测彼此的交流内容，形成共享意图并驱动脑-脑耦合水平提升。上述发现验证了人际语言交流超扫描研究的结论[24]，轮流频率更高的直接互动可以提升面对面交流的沟通效率，并伴随着交流者与语言加工相关的IFC脑区的脑-脑耦合。

互动质量也是影响教学互动水平的关键因素之一，教育领域著名的“预测-传输”模型[80]提出，在教学之前，教师应预测学生的知识状态，评估其近侧发展区间（zone of proximal development，ZPD），并据此制定合适的知识表述方式。该过程有助于促进师生之间形成共享理解，建立共享知识表征并提升脑-脑耦合水平。Zheng等[81]使用fNIRS超扫描技术测量了师生在数学推理课程中的大脑活动。结果表明，在脚手架模式教学下，相较于师生大脑活动时间对齐的条件，当教师的大脑活动领先学生10秒时，教师右侧TPJ与学生前颞上皮层（anterior superior temporal cortex，aSTC）之间的脑-脑耦合水平显著更高，在神经层面验证了“预测-传输”模型。此外，在教学过程中，师生之间的高质量的教学反馈也有助于增强互动质量，促进共同理解。研究表明在教学过程中接受详尽反馈的学生比接受简单反馈的学生具有更高的学习绩效，并且师生之间顶叶的脑-脑耦合水平显著更高。Pan等[82]首次在人际尺度上考虑神经调控，对歌曲教学过程中的师生施加hyper-tACS进行同步调控，并发现与对照刺激条件相比，仅有与歌曲节律相近、相位一致的hyper-tACS可以显著提升师生的人际运动同步水平，并改善歌曲语调学习表现。这表明，外源性hyper-tACS可以直接促进互动过程中的信息传递，以改善社会学习，进一步支持了互动质量在教学互动中的重要作用[83]。总体而言，高互动频率可以使互动过程更加活跃，有助于在师生之间形成更详尽的反馈。通过提出关键问题和提供提示等建设性行为，能够促进师生之间的信息交流和知识水平预测，为师生提供更多调整教学行为的机会，以实现共享理解，从而提升学习绩效和脑-脑耦合水平。这一过程在教学期间是动态变化的，一项关于词汇学习的fNIRS超扫描研究发现，仅有教学早期师生IFC区域脑-脑耦合可以预测学习成果，表明社交互动主要在学习的早期阶段发挥重要作用[84]。

尽管已有研究表明师生社会亲密度能够在讲座式教学中促进师生之间的脑-脑耦合水平提升，但这些研究大多未能区分社会角色分配与教学互动在其中的相对贡献。为弥补这一不足，Zheng等[85]通过将教学互动过程与建立社会角色从属关系分离，使用fNIRS超扫描技术研究静息状态与教学互动过程中的师生脑-脑耦合与社会亲密度的关系。研究发现教学互动过程中的师生脑-脑耦合在教学前后静息状态下的感觉运动皮层（sensorimotor cortex，SMC）的脑-脑耦合增量与社会亲密度之间具有中介作用，表明社会角色分配和教学互动都是提升师生社会亲密度的必要环节，二者协同作用驱动脑-脑耦合水平的增强。综上所述，师生之间通过在教学过程中形成社会角色从属关系，并在频繁的社会互动中，逐步增强师生或学生群体的社会亲密度，从而驱动了脑-脑耦合水平提升。遗憾的是，现有社会亲密度相关的超扫描研究尚未发现脑-脑耦合水平与教学绩效之间存在直接联系，这一矛盾可能源于教学策略或教学材料的差异，使学生在记忆编码与社会信息处理之间的认知资源分配产生冲突，从而削弱了脑-脑耦合对学习成绩的预测效力[86]。

PBB Online First

表3 师生教学情境的脑–脑耦合驱动因素的研究归纳

Table 3 Summary of drivers of brain−to−brain coupling in the learning and instruction context

成像方式	耦合脑区	耦合频段	驱动因素	任务范式	主要结果
EEG [67]	顶叶	alpha	社会亲密度（内源）	真实课堂中开展视频/讲座模式的高中生物课教学	讲座模式下的师生顶叶alpha频段的脑-脑耦合与师生社会亲密度呈显著正相关
fNIRS [68]	左侧STC、边缘上回、中央后回		社会亲密度（内源）	学生三元组在独立学习和合作学习模式下学习诗歌	合作学习模式下的学生三元组相较独立学习模式在STC等区域的脑-脑耦合显著更强，并且合作学习模式下的脑-脑耦合可以反映社会亲密度
EEG [12]	顶叶	alpha	共享注意（内源）	真实课堂中开展视频/讲座/讨论/阅读等方式的高中生物课教学	面对面讨论模式下，学生-群体顶叶alpha频段的脑-脑耦合可以反映学生的课堂参与度
EEG [71]	顶叶	alpha	共享注意（内源）	教师与学生群体在实验室中进行不同主题内容的讲座式教学	学生-群体顶叶alpha频段的脑-脑耦合可以预测学生个体的学习成果
fNIRS [72]	PFC		共享注意（内源）	师生二元组在学生有/无先验知识差异的情况下进行视频或面对面教学	仅在具有先验知识的条件下，面对面教学下师生PFC区域的脑-脑耦合水平显著高于视频教学
fMRI [74]	DMN、海马体		共享理解（内源）	专家教师和学生均接受计算机概念课程教学	师生DMN和海马体区域的脑-脑耦合可以预测学生学习绩效。
fMRI [75]	DMN		共享理解（内源）	师生在结构合理化和结构混乱模式下进行概念教学	仅有结构合理化教学模式下的DMN区域的脑-脑耦合可以反映学生的学习绩效。
fNIRS [79]	IFC		互动频率（外源）	二元组在单句或整体模式下进行歌曲教学	单句教学相较整体教学的学生学习表现更好，并且在IFC区域的脑-脑耦合水平显著更高
fNIRS [5]	PFC、STC		互动频率（外源）	二元组在脚手架模式或单向阐述模式下进行概念知识学习	脚手架教学相较单向阐述教学的学生学习表现更好，并且在PFC和STC区域的脑-脑耦合水平显著更高
fNIRS [81]	TPJ、aSTC		互动质量（外源）	二元组在脚手架/讲座/视频教学模式下进行数字推理教学	脚手架模式下的TPJ-aSTC的脑-脑耦合水平显著高于其余两组，并且相较师生大脑活动时间对齐条件，时滞条件下脑-脑耦合水平显著更高
fNIRS [83]	顶叶		互动质量（外源）	二元组在脚手架模式下进行详尽/简单反馈概念知识教学	相较简单反馈教学，接受详尽反馈教学的学生在顶叶区域具有显著更高的脑-脑耦合水平
fNIRS [85]	SMC		社会亲密度（内源）	二元组在脚手架/讲座/视频教学模式下进行数字推理教学	教学前后静息状态SMC区域的脑-脑耦合增量在教学期间脑-脑耦合的中介作用下可以反映师生社会亲密度

PFC：前额叶皮层（prefrontal cortex）；DMN：默认模式网络（default mode network）；海马体（hippocampus）；IFC：下额叶皮层（inferior frontal cortex）；aSTC：前颞上皮质（anterior superior temporal cortex）；SMC：感觉运动皮层（sensorimotor cortex）。

4 总结与展望

本综述以人际交流、任务协作和师生教学3类典型社会互动情境为主线，系统梳理了不同情境下脑-脑耦合的外源性与内源性驱动机制，并揭示了其在跨情境上的共性与差异。从整体上看，脑-脑耦合的产生既依赖于外源性因素（如语言节律协调、运动同步、互动频率与互动质量等），也受到内源性因素（如社会亲密度、共享注意与共享理解等）的持续调控。外源性因素通过感知输入和行为模式提供互动的外部条件与时空框架，这些外部条件通过引导个体在同一时间窗口内聚焦相同目标，从而调动共享注意，成为外源性驱动因素作用于脑-脑耦合的核心机制。但是，外源性驱动因素仅

PIBB Online First

能保证互动的表层对齐，若缺乏内源性驱动因素的支撑，脑-脑耦合难以维持或深化。

内源性因素通过高层次的社会认知加工决定了互动深度与持续性，其中，社会亲密度提升了信任与同理心，促进多模态信息整合与情感共情；共享注意构成了个体由行为层面对齐走向神经层面初步耦合的关键环节；共享意图使个体在目标与策略上趋同，形成合作的认知预测；共享理解则确保个体能够基于共同的知识框架进行高层次加工。这些内源性驱动因素通过调动PFC、TPJ和DMN等高级认知脑区，使互动从瞬时注意耦合过渡到稳定的意图与认知共享，从而显著增强脑-脑耦合。综上，脑-脑耦合的形成过程可以视为一个“由外至内、由弱到强”的过程：外源性驱动因素通过调动共享注意实现神经对齐的初始阶段，内源性驱动因素则通过共享理解与共享意图增强脑-脑耦合，推动群体共享认知的构建。

此外，3类情境中脑-脑耦合的驱动机制并非简单平行，而是体现出一种层级递进与功能互补的关系：人际交流中的语言节律与语义对齐为后续的协作与教学奠定了共享注意与共享理解的基础；协作任务进一步依赖共享意图与行为协调，将局部的交流加工转化为群体层面的共享目标；在教学情境中，师生通过角色分配与高质量交流互动，形成知识传递过程中的共享注意与共享理解，实现脑-脑耦合对学习效果的具体调控。由此可见，3类社会互动情境不仅在驱动机制上各有侧重，而且共同构成了从感知、协调到知识建构的连续谱系，提示脑-脑耦合可能是支撑社会认知分级加工的核心神经机制。在这一连续谱系中，社会亲密度、共享注意和共享理解扮演着跨情境的“桥梁性因素”，但其作用路径在不同情境中存在显著差异。具体而言，社会亲密度在人际交流中主要依托长期情感纽带，驱动互动者形成稳定的共享注意与深层理解；在协作任务中，其作用主要体现在通过增强共享意图提升群体合作效率；在师生教学情境中，社会亲密度的建立则更多依赖师生在互动中的角色分配与动态调整，其作用更具情境依赖性和阶段性。共享注意在交流情境中往往由眼神等非语言线索即时触发，在协作任务中通过轮流交互维系团队协调，而在师生教学中则依赖面对面互动捕捉多模态线索以支持课堂参与度。共享理解在人际交流中反映为语义层面的对齐，在协作任务中体现为共同目标与行动策略的一致，在教育情境中则表现为知识框架的动态匹配。由此可见，三者在不同领域中共同驱动脑-脑耦合增强，但在触发条件、作用层级及结果表现上存在重要差异。

然而，脑-脑耦合的驱动机制研究仍面临一系列亟待解决的问题。从理论层面来看，脑-脑耦合受到外源性与内源性因素的共同驱动，但在具体社交范式中，尚难有效剥离由外源性感知输入诱发的初级皮层的神经振荡-外界节律同步化效应，进而限制了对高级人际共享认知成分的提取与建模[87]。在技术层面，受限于硬件设备缺乏，目前超扫描研究仍使用单一模态神经影像学技术，难以兼顾时空分辨率，限制了对于快速动态社交认知过程的深入理解。此外，群体神经调控技术（如hyper-tACS或催产素介入）在提升脑-脑耦合及其关联行为绩效方面的应用仍处于探索阶段，其潜在价值尚未被充分挖掘[88]。

针对上述挑战，整合人际交流、任务协作和师生教学3类典型社会互动情境下的研究成果，可能为深入理解脑-脑耦合驱动机制提供理论基础与方法支撑。一方面，有必要从理论上建立基于认知复杂性分级的脑-脑耦合层级模型，系统区分语音感知、运动同步等低级过程与共享理解、共享记忆等高级人际共享认知机制所驱动的脑-脑耦合特征，明确不同层级脑-脑耦合的神经动态表征模式，从而为与社会互动相关的自然主义范式设计，提供控制驱动因素变量的理论基础与方法学适用性依据。另一方面，语言作为社交互动的核心媒介，随着大语言模型的发展，提供了可量化的跨个体共享语义指标[89]。将这些共享语义特征与脑-脑耦合指标进行映射，有望实现对高级共享认知过程相关脑-脑耦合成分的直接识别。在方法技术层面，未来可发展EEG-fNIRS等多模态超扫描系统[90]，融合EEG的高时间精度与fNIRS的空间定位优势，从而在时间、空间与频域维度全面解析共享认知相关脑-脑耦合的动态演进机制。最后，尽管神经调控技术在个体水平已取得一定进展，但尚未充分应用于群体大脑的同步干预。未来研究可探索闭环脑际同步神经调控策略（如hyper-tACS）[91]，结合群体神经反馈训练，将脑-脑耦合作为行为-神经闭环调控的核心指标，推动其在社交障碍人群中的临床转化与干预应用，为孤独症谱系障碍等疾病提供精准化治疗方案[92]。

超扫描研究为理解社会互动的神经本质开辟了新路径。通过系统梳理人际交流、任务协作与师生

PIBB Online First

教学情境的脑-脑耦合驱动机制，本文揭示了不同社会互动情境下脑-脑耦合驱动因素的异质性及其行为关联。未来研究需在理论、方法技术与应用层面持续突破，推动脑-脑耦合从实验室发现走向现实世界应用，最终服务于人类社会认知能力提升与健康发展。

参 考 文 献

[1] Fiske S T, Taylor S E. Social Cognition: From Brains to Culture. 4th ed. Thousand Oaks, California, US: SAGE, 2021

[2] Aili R, Zhou S, Xu X, *et al*. The cortical architecture representing the linguistic hierarchy of the conversational speech. Neuroimage, 2025, **311**: 121180

[3] Zhao H, Zhang C, Tao R, *et al*. Distinct inter-brain synchronization patterns underlying group decision-making under uncertainty with partners in different interpersonal relationships. Neuroimage, 2023, **272**: 120043

[4] Zhang H, Yang J, Ni J, *et al*. Leader-follower behavioural coordination and neural synchronization during intergroup conflict. Nat Hum Behav, 2023, **7**(12): 2169-2181

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

[6] Cacioppo J T, Decety J. The Oxford Handbook of Social Neuroscience. Oxford: Oxford University Press, 2011

[7] Adolphs R. Cognitive neuroscience of human social behaviour. Nat Rev Neurosci, 2003, **4**(3): 165-178

[8] Schilbach L, Timmermans B, Reddy V, *et al*. Toward a second-person neuroscience. Behav Brain Sci, 2013, **36**(4): 393-414

[9] Kingsbury L, Hong W. A multi-brain framework for social interaction. Trends Neurosci, 2020, **43**(9): 651-666

[10] Montague P R, Berns G S, Cohen J D, *et al*. Hyperscanning: simultaneous fMRI during linked social interactions. Neuroimage, 2002, **16**(4): 1159-1164

[11] Stephens G J, Silbert L J, Hasson U. Speaker-listener neural coupling underlies successful communication. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, **107**(32): 14425-14430

[12] Dikker S, Wan L, Davidesco I, *et al*. Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. Curr Biol, 2017, **27**(9): 1375-1380

[13] Watanabe H, Shimojo A, Yagyu K, *et al*. Construction of a fiber-optically connected MEG hyperscanning system for recording brain activity during real-time communication. PLoS One, 2022, **17**(6): e0270090

[14] 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

[15] Hu Y, Pan Y, Shi X, *et al*. Inter-brain synchrony and cooperation context in interactive decision making. Biol Psychol, 2018, 133: 54-62

[16] 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

[17] 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

[18] Froese T, Loh C L, Putri F. Inter-brain desynchronization in social interaction: a consequence of subjective involvement?. Front Hum Neurosci, 2024, **18**: 1359841

[19] Bánki A, Köster M, Cichy R M, *et al*. Communicative signals during joint attention promote neural processes of infants and caregivers. Dev Cogn Neurosci, 2024, **65**: 101321

[20] Sheng J, Wang S, Zhang L, *et al*. Intersubject similarity in neural representations underlies shared episodic memory content. Proc Natl Acad Sci USA, 2023, **120**(35): e2308951120

[21] Lin C, Lin X, Lian W, *et al*. Brains in sync, friends in empathy: interbrain neural mechanisms underlying the impact of interpersonal closeness on mutual empathy. Proc Biol Sci, 2024, **291**(2032): 20241326

[22] 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

[23] Markova G, Nguyen T, Hoehl S. Neurobehavioral interpersonal synchrony in early development: the role of interactional rhythms. Front Psychol, 2019, **10**: 2078

[24] Jiang J, Dai B, Peng D, *et al*. Neural synchronization during face-to-face communication. J Neurosci, 2012, **32**(45): 16064-16069

[25] Duan H, Yang T, Wang X, *et al*. Is the creativity of lovers better? A behavioral and functional near-infrared spectroscopy hyperscanning study. Curr Psychol, 2022, **41**(1): 41-54

[26] Schoot L, Hagoort P, Segaert K. What can we learn from a two-brain approach to verbal interaction?. Neurosci Biobehav Rev, 2016, 68: 454-459

[27] Hickok G, Poeppel D. The cortical organization of speech processing. Nat Rev Neurosci, 2007, **8**(5): 393-402

[28] Kawasaki M, Yamada Y, Ushiku Y, *et al*. Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction. Sci Rep, 2013, **3**: 1692

[29] Li Z, Hong B, Nolte G, *et al*. Speaker-listener neural coupling correlates with semantic and acoustic features of naturalistic speech. Soc Cogn Affect Neurosci, 2024, **19**(1): nsae051

[30] Silbert L J, Honey C J, Simony E, *et al*. Coupled neural systems underlie the production and comprehension of naturalistic narrative speech. Proc Natl Acad Sci USA, 2014, **111**(43): E4687-E4696

[31] 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

[32] Saito D N, Tanabe H C, Izuma K, *et al*. "Stay tuned": inter-individual neural synchronization during mutual gaze and joint attention. Front Integr Neurosci, 2010, **4**: 127

PIBB Online First

[33] Furman W, Stephenson J C, Rhoades G K. Positive interactions and avoidant and anxious representations in relationships with parents, friends, and romantic partners. J Res Adolesc, 2014, **24**(4): 615-629

[34] Alonso A, McDorman S A, Romeo R R. How parent-child brain-to-brain synchrony can inform the study of child development. Child Dev Perspect, 2024, **18**(1): 26-35

[35] Djalovski A, Dumas G, Kinreich S, *et al*. Human attachments shape interbrain synchrony toward efficient performance of social goals. Neuroimage, 2021, **226**: 117600

[36] Goldstein P, Weissman-Fogel I, Dumas G, *et al*. Brain-to-brain coupling during handholding is associated with pain reduction. Proc Natl Acad Sci U S A, 2018, **115**(11): E2528-E2537

[37] Zhou C, Jiang X, Chen Y, *et al*. Brain-to-brain synchrony increased during interpersonal touch in romantic lovers: an EEG-based hyperscanning study. BMC Psychol, 2024, **12**(1): 560

[38] Endevelt-Shapira Y, Feldman R. Mother-infant brain-to-brain synchrony patterns reflect caregiving profiles. Biology, 2023, **12**(2): 284

[39] Nguyen T, Abney D H, Salamander D, *et al*. Proximity and touch are associated with neural but not physiological synchrony in naturalistic mother-infant interactions. Neuroimage, 2021, **244**: 118599

[40] Neel M L, Jeanvoine A, Kjeldsen C P, *et al*. Mother-infant dyadic neural synchrony measured using EEG hyperscanning and validated using behavioral measures. Children (Basel), 2025, **12**(2): 115

[41] Du B, Zhang W, Chen L, *et al*. Higher or lower? Interpersonal behavioral and neural synchronization of movement imitation in autistic children. Autism Res, 2024, **17**(9): 1876-1901

[42] Müller V, Lindenberger U. Intra- and interbrain synchrony and hyperbrain network dynamics of a guitarist quartet and its audience during a concert. Ann N Y Acad Sci, 2023, **1523**(1): 74-90

[43] Hernandez-Pena L, Koch J, Bilek E, *et al*. Neural correlates of static and dynamic social decision-making in real-time sibling interactions. Hum Brain Mapp, 2024, **45**(11): e26788

[44] Néda Z, Ravasz E, Brechet Y, *et al*. The sound of many hands clapping. Nature, 2000, **403**(6772): 849-850

[45] Tognoli E, Lagarde J, DeGuzman G C, *et al*. The phi complex as a neuromarker of human social coordination. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, **104**(19): 8190-8195

[46] Dumas G, Nadel J, Soussignan R, *et al*. Inter-brain synchronization during social interaction. PLoS One, 2010, **5**(8): e12166

[47] Holper L, Scholkmann F, Wolf M. Between-brain connectivity during imitation measured by fNIRS. Neuroimage, 2012, **63**(1): 212-222

[48] Yun K, Watanabe K, Shimojo S. Interpersonal body and neural synchronization as a marker of implicit social interaction. Sci Rep, 2012, **2**: 959

[49] Petro N M, Livermore C L, Springer S D, *et al*. Oscillatory brain dynamics underlying affective face processing. Soc Cogn Affect Neurosci, 2025, **20**(1): nsaf047

[50] Pan Y, Cheng X, Zhang Z, *et al*. Cooperation in lovers: an fNIRS-based hyperscanning study. Hum Brain Mapp, 2017, **38**(2): 831-841

[51] Hu Y, Hu Y, Li X, *et al*. Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality. Soc Cogn Affect Neurosci, 2017, **12**(12): 1835-1844

[52] 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

[53] Liu Q, Zhu S, Zhou X, *et al*. Mothers and fathers show different neural synchrony with their children during shared experiences. Neuroimage, 2024, **288**: 120529

[54] Dikker S, Brito N H, Dumas G. It takes a village: a multi-brain approach to studying multigenerational family communication. Dev Cogn Neurosci, 2024, **65**: 101330

[55] De Vico Fallani F, Nicosia V, Sinatra R, *et al*. Defecting or not defecting: how to "read" human behavior during cooperative games by EEG measurements. PLoS One, 2010, **5**(12): e14187

[56] Jahng J, Kralik J D, Hwang D U, *et al*. Neural dynamics of two players when using nonverbal cues to gauge intentions to cooperate during the Prisoner's Dilemma Game. Neuroimage, 2017, 157: 263-274

[57] Li K, Du B, Guan X, *et al*. Not on the same wavelength? How autistic traits influence cooperation: evidence from fNIRS hyperscanning. Front Psychiatry, 2024, **15**: 1514682

[58] Doğan G, Glowacki L, Rusch H. Are strangers just enemies you have not yet met? Group homogeneity, not intergroup relations, shapes ingroup bias in three natural groups. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2022, **377**(1851): 20210419

[59] 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

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

[61] Lu K, Hao N. The interpersonal neural coupling in group creative ideation. Psychol Rev, 2024: 2025-55527-001

[62] Lu K, Xue H, Nozawa T, *et al*. Cooperation makes a group be more creative. Cereb Cortex, 2019, **29**(8): 3457-3470

[63] Lu K, Hao N. When do we fall in neural synchrony with others?. Soc Cogn Affect Neurosci, 2019, **14**(3): 253-261

[64] Xue H, Lu K, Hao N. Cooperation makes two less-creative individuals turn into a highly-creative pair. Neuroimage, 2018, 172: 527-537

[65] Li Y, Su C, Pan Y. Spontaneous movement synchrony as an exogenous source for interbrain synchronization in cooperative learning. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2024, **379**(1911): 20230155

[66] Zhang Y, Hu Y, Ma F, *et al*. Interpersonal educational neuroscience: a scoping review of the literature. Educ Res Rev,

PIBB Online First
PIBB Online First
PIBB Online First

2024, **42**: 100593

[67] 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

[68] 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

[69] Mundy P, Newell L. Attention, joint attention, and social cognition. Curr Dir Psychol Sci, 2007, **16**(5): 269-274

[70] Tomasello M. Joint attention as social cognition//Moore C, Dunham P J. Joint Attention: Its Origins and Role in Development. Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 1995: 103-130

[71] 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

[72] Liu J, Zhang R, Geng B, *et al*. Interplay between prior knowledge and communication mode on teaching effectiveness: Interpersonal neural synchronization as a neural marker. Neuroimage, 2019, 193: 93-102

[73] Chang C H C, Nastase S A, Zadbood A, *et al*. How a speaker herds the audience: multibrain neural convergence over time during naturalistic storytelling. Soc Cogn Affect Neurosci, 2024, **19**(1): nsae059

[74] 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

[75] Nguyen M, Chang A, Micciche E, *et al*. Teacher-student neural coupling during teaching and learning. Soc Cogn Affect Neurosci, 2022, **17**(4): 367-376

[76] Palincsar A S. Social constructivist perspectives on teaching and learning. Annu Rev Psychol, 1998, 49: 345-375

[77] Kobayashi K. Interactivity: a potential determinant of learning by preparing to teach and teaching. Front Psychol, 2018, **9**: 2755

[78] Astin A W. Student involvement: a developmental theory for higher education. J Coll Stud Dev, 1999, **40**(5): 518-529

[79] Pan Y, Novembre G, Song B, *et al*. Interpersonal synchronization of inferior frontal cortices tracks social interactive learning of a song. Neuroimage, 2018, 183: 280-290

[80] Vygotsky L. Mind in Society: Development of Higher Psychological Processes. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1978

[81] Zheng L, Chen C, Liu W, *et al*. Enhancement of teaching outcome through neural prediction of the students' knowledge state. Hum Brain Mapp, 2018, **39**(7): 3046-3057

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

[83] Zhu Y, Leong V, Hou Y, *et al*. Instructor – learner neural synchronization during elaborated feedback predicts learning transfer. J Educ Psychol, 2022, **114**(6): 1427-1441

[84] Shamay-Tsoory S G, Markovich A, Markus A, *et al*. Interbrain coupling during language learning contributes to learning outcomes. Soc Cogn Affect Neurosci, 2025, **20**(1): nsaf045

[85] Zheng L, Liu W, Long Y, *et al*. Affiliative bonding between teachers and students through interpersonal synchronisation in brain activity. Soc Cogn Affect Neurosci, 2020, **15**(1): 97-109

[86] 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

[87] Zada Z, Goldstein A, Michelmann S, *et al*. A shared model-based linguistic space for transmitting our thoughts from brain to brain in natural conversations. Neuron, 2024, **112**(18): 3211-3222.e5

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

[89] Fenerci C, Cheng Z, Addis D R, *et al*. Studying memory narratives with natural language processing. Trends Cogn Sci, 2025, **29**(6): 516-525

[90] Balconi M, Angioletti L. Inter-brain entrainment (IBE) during interoception. A multimodal EEG-fNIRS coherence-based hyperscanning approach. Neurosci Lett, 2024, **831**: 137789

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

[92] Zhou X, Wong P C M. Hyperscanning to explore social interaction among autistic minds. Neurosci Biobehav Rev, 2024, **163**: 105773

PIBB Online First
PIBB Online First
PIBB Online First

Multi-contextual Driving Mechanisms of Brain-to-brain Coupling in Social Interaction*

WANG Zheng-Yi[1)**], SHU Lei-Jin[1,2)**], YU Hai-Qing[1,3)***], CHEN Yuan-Fang[4)], XU Min-Peng[1,3)], JUNG Tzyy-Ping[1,5)], MING Dong[1,3)]

([1)]*Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin* 30072, China;

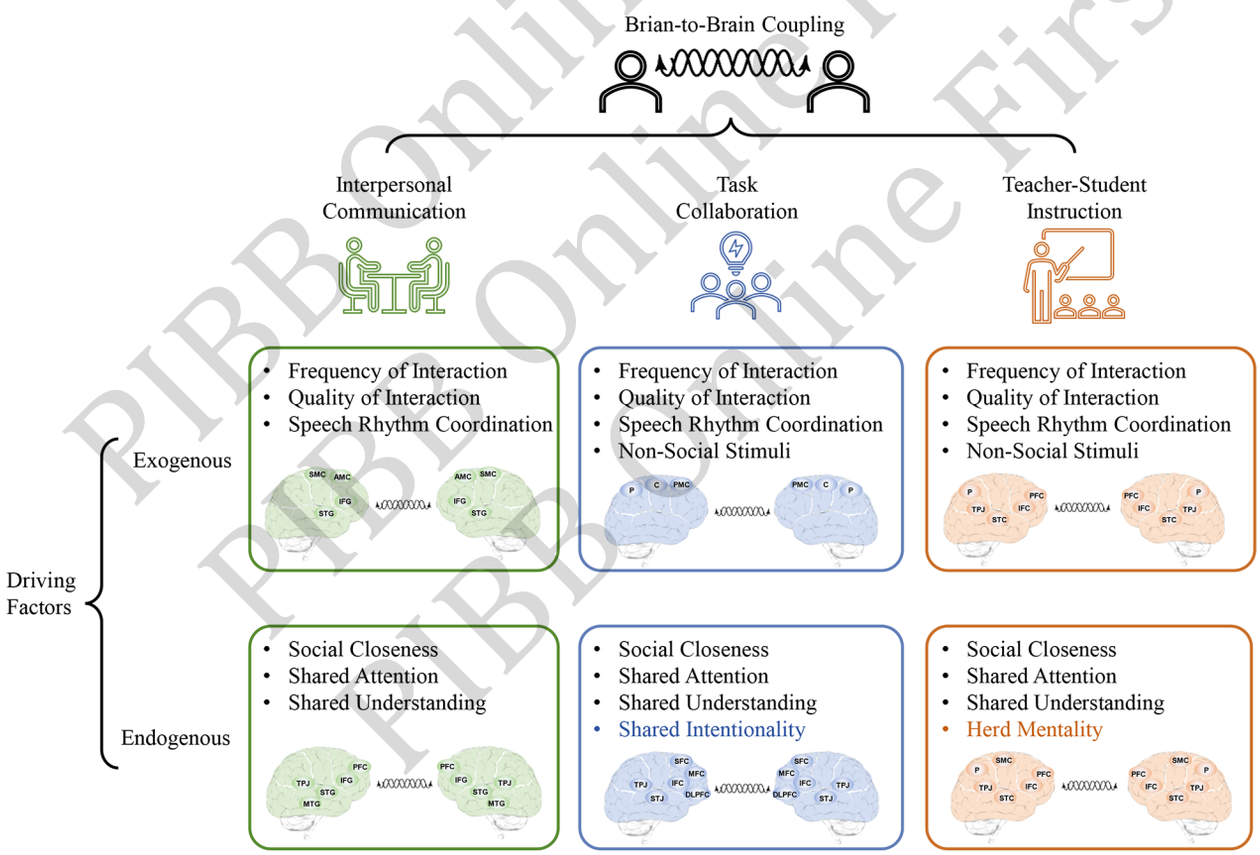
[2)]*Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, State Key Laboratory of Advanced Medical Materials and Devices, Tianjin University, Tianjin* 30072, China;

[3)]*Haihe Laboratory of Brain-computer Interaction and Human-machine Integration, Tianjin* 300384, China;

[4)]*Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing* 100120, China;

[5)]*Swartz Center for Computational Neuroscience, University of California, San Diego, CA* 92093, USA)

Graphical abstract



Abstract Social interaction is central to the development of human cognition and behavior. Studying the neural mechanisms of social interaction helps reveal the neurobiological basis of social functions, such as group cooperation and knowledge transfer. In recent years, social neuroscience research has adopted hyperscanning technology and brain-to-brain coupling (BBC) measurements to reveal the group neural dynamics mechanisms under social interactions. Existing studies have primarily focused on three social contexts highly relevant to social interaction, namely interpersonal communication, task collaboration, and teacher-student instruction. However,

PIBB Online First

the driving factors of BBC across these contexts and their interaction patterns under naturalistic paradigms have not yet been systematically analyzed within a unified framework, and the underlying driving mechanisms remain unclear. To address this limitation, the present review focused on three social contexts with increasing ecological validity in social interaction. It systematically examines the exogenous and endogenous drivers of BBC across these contexts and reveals commonalities and differences across contexts. Exogenous factors provide external conditions and spatiotemporal framework for interaction through sensory input and behavioral patterns. These external conditions induce BBC by guiding individuals to focus on the same target within the same time window, thereby invoking shared attention. However, exogenous drivers can only ensure surface alignment of interactions. Without the support of endogenous drivers, brain-brain coupling is difficult to maintain or deepen. Endogenous factors determine the depth and continuity of interactions through high-level social cognitive processing. Specifically, social closeness enhances trust and empathy between interacting partners, promoting interpersonal multimodal information integration and emotional empathy. Shared attention is the key link for individuals to move from behavioral alignment to initial coupling at the neural level. Shared intentionality led individuals to converge on goals and strategies, forming cognitive predictions during the cooperation process. Shared understanding ensures that individuals can perform high-level cognitive processing based on a common knowledge framework. The above-mentioned endogenous driving factors enhance BBC by engaging higher-order cognitive regions such as the prefrontal cortex, temporoparietal junction, and default mode network. This engagement enables the interaction to shift from transient attention coupling to stable intention alignment and cognitive sharing. Therefore, the formation of BBC can be viewed as a process that evolves "from external to internal, from weak to strong". Exogenous driving factors initiate neural alignment through shared attention. Endogenous driving factors then strengthen BBC via shared understanding and shared intentionality. Together, these processes support the construction of group-level shared cognition. Finally, this article summarized the current challenges in research on the driving mechanisms of BBC and provided an outlook for future development. First, it is necessary to theoretically establish a hierarchical model of brain-brain coupling based on a hierarchy of cognitive complexity, systematically distinguishing between the characteristics of BBC driven by low-level processes and higher-level interpersonal shared cognitive mechanisms. Second, at the methodological and technical level, future development of multimodal hyperscanning systems such as EEG-fNIRS and closed-loop hyper-transcranial alternating current stimulation could comprehensively analyze the dynamic evolution of BBC related to shared cognition in the temporal, spatial, and frequency domains. In summary, this article constructed a theoretical framework for the driving mechanisms of BBC across social contexts, hoping to provide a methodological basis for controlling the driving factors of naturalistic paradigms in social neuroscience research.

Key words hyperscanning, social neuroscience, brain-to-brain coupling, driving factor, driving mechanism

DOI：10.3724/j.pibb.2025.0257 **CSTR**：32369.14.pibb.20250257

PIBB Online First
PIBB Online First
PIBB Online First

* This work was supported by grants from the National Key Research and Development Program of China (2023YFF1203900), The National Natural Science Foundation of China (62406220), China Postdoctoral Science Foundation (2023M742604), and Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (GZC20231916).

** These authors contributed equally to this work.

*** Corresponding author.

Tel：86-15602182443，E-mail：haiqingyu@tju.edu.cn

Received：May 26，2025 Accepted：September 29，2025