

# 协作者编码水平差异影响协作提取: fNIRS 超扫描研究\*

孙亚茹 李冰冰 段亚杰 胡锦慧 何洋 陈宁 刘伟

(上海师范大学心理学院, 上海 200234)

**摘要** 为探究协作者编码水平差异影响协作记忆的加工机制,本研究考察了协作组两位成员不同编码水平组合(语义+语义、知觉+知觉、语义+知觉)对协作提取效应的影响,并使用近红外超扫描技术揭示其神经基础。结果发现,在行为层面,语义+语义及知觉+知觉的协作者组合均表现出协作抑制效应,而语义+知觉的差异组合则消除了该效应,并表现出协作后提取优势。在神经层面,脑间同步结果显示,差异编码组合在右侧额中回和右侧角回区域表现出显著高于相同编码组的脑间同步水平,反映了大脑为协调差异化检索策略所付出的认知努力。进一步的格兰杰因果分析揭示,在额中回→角回通路中,存在由语义编码者主导的、知觉编码者追随的定向信息流。研究结果不仅为提取策略破坏假说提供了新的证据,也为理解协作提取的神经机制提供了重要基础。

**关键词** 协作记忆, 编码水平, 差异编码, 协作抑制, 脑间同步

**分类号** B842

## 1 引言

协作提取(collaborative retrieval)是协作记忆的提取环节,指两个及以上个体通过互动对已编码信息的共同提取(Mannering et al., 2025)。相关研究往往引入名义组(相同数量个体组成但单独提取),并在操纵协作提取的任务材料、提取方式、协作者特征等的基础上确定协作提取的加工机制(Marion & Thorley, 2016; Rajaram et al., 2024)。现有研究表明,一方面,协作提取稳定地导致协作抑制(collaborative inhibition),即协作组提取总量显著低于名义组各成员提取的正确数量之和(Luo et al., 2024)。研究者多用提取策略干扰假说(retrieval strategy disruption hypothesis)进行解释——在协作提取过程中,同伴的提取会干扰个体原有的检索策略,从而导致整体回忆表现下降(Basden et al., 1997)。这一假说得到了诸多实证研究的支持。

收稿日期: 2025-12-05

\* 孙亚茹和李冰冰为本文共同第一作者。

通信作者: 陈宁, E-mail: chenning@shnu.edu.cn; 刘伟, E-mail: liuwei@shnu.edu.cn

例如,轮流提取的协作方式使个体的提取频繁受到同伴打断,增加了对个体提取策略的干扰,导致了比自由讨论的协作方式更显著的协作抑制(Harris et al., 2012; Maswood et al., 2022)。但另一方面,协作提取也会对个体后续的记忆产生积极影响。研究发现,经历过协作提取的个体,在后续单独回忆中的表现优于未参与协作的名义组(Gao et al., 2024),这即是协作后促进效应(post-collaborative advantage effect)。该效应源于协作过程中的交叉提示与再暴露机制(Rajaram & Pereira-Pasarin, 2010),即协作者之间不同的提取线索和回忆内容,能够相互提供新的提取路径,或激活个体原本未能独立提取的记忆痕迹,从而在后续单独测试中提升回忆表现(Blumen & Stern, 2011; Gao et al., 2024)。可见,协作对记忆提取的影响具有复杂、多方向的特点。

研究者引入了多种调节因素,探索策略干扰导致协作提取抑制的边界条件。其中协作者在编码阶段的能力或水平差异受到了诸多研究者的关注。这是因为协作者编码能力和水平的差异,能确定地导致协作者之间个人提取效能的不同,从而使协作者采用更加差异化的协作提取策略。根据策略干扰假说,这能通过减少协作抑制,提升协作提取的表现(van Knippenberg, 2024)。所以,研究者们试图通过这类研究,为深入了解协作提取的加工机制提供证据。例如, Danielsson 等(2011)探讨了智力障碍青少年与助教教师的协作记忆。结果显示,缩短教师编码时间的平衡条件与师生有同样充足时间的条件相比,协作抑制更显著,证实了协作者间的能力差异导致协作抑制降低。另外,老年群体往往存在着认知加工水平衰退的现象,但 Whillock 等(2020)的研究表明,青年+青年、青年+老年和老年+老年的协作组合均表现出显著的协作抑制,且这三种年龄组合在正确回忆的协作抑制效应大小上没有显著差异。Hood 等(2023)发现,工作记忆容量较低者在协作中表现出更大的协作抑制效应,而工作记忆容量较高者的协作组没有出现协作抑制,且协作者能够从协作中获益,表现出协作后的记忆促进。

可见,上述研究通过操纵协作者之间智力水平、老化和工作记忆容量等的差异,间接引发了协作者编码水平的不同。然而,由于上述研究中,协作者编码水平差异的来源和性质各异,所以仍难通过整合这些研究结果,推进对协作抑制的加工机制的理解。而目前为止,直接操纵协作者编码水平的研究只有零星开展。如 Weldon 和 Bellinger(1997)发现,无论深层编码(评定项目的愉悦程度)还是浅层编码(评定项目的视觉清晰度),协作抑制均未受到影响。另有研究比较了不同类型的深层编码任务,发现当编码任务为生存加工时,协作抑制效应消失;而对于非生存的其他深层编码任务(如搬家场景评估、愉悦度评定),抑制效应依然存在。研究者认为,生存加工能促使小组成员激活共享的适应性知识框架,从而消除了协作抑制(Reysen et al., 2018)。此外, Stewart 等(2007)发现,与非自我参照加工(同义词判断)相比,被认为是更深层的自我参照加工在协作中保持优势,但群体参照加工的优势消失,表明特定类型的深层编码可能受到协作情境中社会过程的干扰。以上直接操纵协作者编码差异水平的研究,确定了深层编码有利于提升协作记忆表现的结果。但这些研究均在组间层面操控编码

水平,即只对深层编码者构成的协作组与浅层编码者构成的协作组的提取进行比较,而如前所述,在同一协作组内,根据编码水平不同的协作者共同提取的效能的特点,以及协作策略干扰的结果,才能获得对协作提取机制的更深入理解。

行为指标虽能反映协作提取的最终结果,但揭示协作交互过程的实时动态特征,则需要认知神经科学方法的参与。例如,策略干扰导致的协作抑制,是源于协作者间提取线索不匹配这一单纯的认知因素,还是和协作者主动猜测同伴意图并适应认知差异的人际因素也有关联?通过认知神经科学手段获得的结果,能在回答上述问题的基础上进一步确定协作记忆动态、深层的加工机制。Vanlangendonck 等(2018)通过功能性磁共振成像(fMRI)技术,发现协作编码形成的记忆痕迹在提取时,更显著激活了内侧前额叶皮层和右侧颞顶联合区等协作相关的社会认知网络,表明编码阶段的协作互动能影响记忆表征,并在协作提取阶段诱发独特的神经激活模式。但该研究只在单脑层面探讨了协作提取的神经基础,而协作记忆过程涉及多脑的动态交互,其神经机制更适合从脑间同步(inter-brain synchronization, IBS)的视角进行探究。根据已有研究,在协作互动过程中,个体的前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)与右侧颞顶联合区(temporoparietal junction, TPJ)会出现显著的脑间同步增强现象(Li et al., 2021);且与分工合作相比,协作合作表现出更强的大脑镜像神经系统同步性,也激活了前额叶—颞顶叶的功能连接(Zhang, Yin, et al., 2024)。一项元分析研究也证实了这一结果,即协作任务的脑间同步机制主要涉及前额叶皮层和颞顶联合区两个核心脑区(Czeszumski et al., 2022)。具体地,在协作任务中,前额叶皮层承担认知控制、目标维持和实时信息整合的核心功能(Song et al., 2024),颞顶联合区(尤其是右侧)与社会认知密切相关,执行协作双方意图理解、心理状态推测等社会性信息加工(Yin et al., 2025)。

基于上述分析,本研究拟采用汉语双字词作为记忆材料,分别以语义和知觉编码作为深层和浅层编码的方式(Craik & Lockhart, 1972),操纵同一协作小组内两名协作者编码水平的差异:两位被试均为语义编码的高水平编码组(语义+语义组)、均为知觉编码的低水平编码组(知觉+知觉组)以及由一位语义编码和一位知觉编码被试构成的差异编码组(语义+知觉组)。通过不同编码组合协作组的协作提取表现的比较,以及相应协作过程的近红外脑成像表达,为厘清编码水平差异条件的协作提取加工机制提供行为的和认知神经的证据。

编码阶段的编码水平差异会导致被试在协作提取阶段的提取策略差异,根据提取策略干扰假说,在上述高、低水平编码组,协作组成员编码方式相同,因此协作提取时,两位协作者的提取策略具有较高的相似性,会产生更显著的策略干扰,降低协作者的提取表现;而差异编码组中,协作者提取策略差异较大,能够避免提取中的相互干扰。结合以往研究中,同一协作组成员之间记忆能力差异导致协作抑制效应减弱的结果(Danielsson et al., 2011),本研究提出假设 1a: 在协作组成员编码水平一致的协作组(高、低水平编码组)会出现相对名义组的协作抑制的结果,但差异编码组(语义+知觉组)无协作抑制。另外,差异编码组的成员会因提取策略的差异,协作提取过程中会出现更少重合、更多不同或交叉的提取线索,因此,由

差异编码所引发的提取优势将延续至协作后的个人记忆中。由此提出假设 1b: 与高、低水平编码组相比, 差异编码组具有相对名义组的更突出的协作后提取优势。

如前所述, 已有 fNIRS 研究表明, 脑间同步指标能充分表达协作活动中的神经机制。以此类推, 不同编码水平协作者的组合也会对脑间同步具有调节作用, 当协作双方在认知加工或背景经验上存在不对称性时, 会诱发特定的脑间同步模式。例如, 在合作任务中, 教师—学生组合在左侧额极区域的脑间同步显著高于学生—学生组合(Sun et al., 2021)。这是因为, 认知水平差异基础上的协作需要协作者投入更多认知资源以理解和预测对方意图和相应行为, 从而导致更高水平的脑间同步(Cheng et al., 2015; Sun et al., 2021)。因此, 在不同编码水平组合的协作组中, 其成员脑间同步的结果, 也能为确定协作抑制的加工机制提供依据。具体而言, 若差异编码组的协作提取主要包含了对彼此检索意图的实时预测与理解, 则会出现脑间神经同步的增强; 若差异编码更多产生的是策略干扰, 则会出现脑间神经同步的下降。由此, 本研究使用近红外脑成像技术, 记录协作提取过程中, 编码水平差异的协作者脑间同步表现, 并依据前人研究, 将兴趣区域定为前额叶和右侧颞顶联合区 (Czeszumski et al., 2022), 根据已有相关研究提出假设 2: 相比于相同编码水平, 差异编码水平组合的协作者需调动更多认知资源相互理解和预测同伴意图, 因此脑间同步水平更高。

最后, 在协作过程中, 脑间同步不仅反映神经活动的一致性, 其信息流动的方向性更揭示了引领者-跟随者的关系与信息传递模式(Li et al., 2025; Markus & Shamay-Tsoory, 2024)。格兰杰因果分析 (Granger Causality Analysis, GCA) 是一种能识别信息传递方向性的时序分析方法, 常用于揭示协作中的神经互动机制(Jiao et al., 2024; Song et al., 2024; Zhang, Yin, et al., 2024)。已有研究表明, 脑间因果连接模式与任务角色密切相关。例如, 在团体讨论任务中, 从引领者到追随者的脑间因果连接显著强于反向顺序, 揭示了引领者在协作脑间同步中的主导作用(Jiang et al., 2015)。同样, Pan 等(2018)发现在师生互动中, 大脑间的信息流主要从教师流向学生。可见, 当协作双方存在角色差异时, 高能力或高地位者常承担更多认知加工与信息整合任务, 扮演主导角色 (Kirschner et al., 2018), 并在神经表达上体现为从高能力者到低能力者的神经信息传递。为了进一步确定差异编码者在协作过程中的互动特点, 本研究引入格兰杰因果分析来考察神经信息的流向, 以探明深层编码者是否在协作中扮演了类似的主导角色。由此, 本研究提出假设 3: 在差异编码组合(语义+知觉)的协作提取中, 从语义编码者到知觉编码者的格兰杰因果强度显著高于相反方向。

## 2 方法

### 2.1 被试

采用 G\*Power 3.1 软件进行样本量计算。参考 Saraiva 等(2023)关于协作提取的研究结果, 其使用不相关双字词材料时, 提取方式主效应的效应量为 $\eta_p^2=0.374$ 。基于此, 本实验设定效应量  $f=0.3$ , 显著性水平  $\alpha=0.05$ , 统计检验力  $1-\beta=0.80$ , 经计算, 所需总样本量

为 111 人。本实验招募普通高校非心理学专业本科生和硕士研究生 160 人, 年龄为 18~26 岁( $M=22.59, SD=1.55$ ), 均为女性。本实验被试性别选取基于以下考量: 其一, 研究表明, 个体性别对协作抑制效应无显著影响(Andersson, 2001); 但性别配对方式(同性 vs. 异性)是该效应的关键调节变量。元分析证实, 异性配对导致协作抑制效应消失, 而同性配对能稳定诱发该效应, 且男-男与女-女组合的效应量无显著差异(Luo et al., 2024)。其二, 受高校被试实际招募的性别比例特征限制, 同时结合实验中协作组需为同性配对的设计要求, 参照以往研究的被试选取方式(Bärthel et al., 2017; Takahashi, 2007; Wessel et al., 2015), 最终确定选取女性被试开展研究。

协作组为两人一组, 三种编码组合的协作组各 40 人(即 20 组); 另将语义和知觉编码的各 20 人随机两两配对成名义组。同组两名成员均为陌生人。所有被试视力正常(含矫正), 无身心疾病, 均为右利手, 母语为汉语。实验前主试向被试详细说明实验流程、潜在风险及获益, 所有被试均自愿参与并签署知情同意书, 在实验后获得适量报酬。本研究方案获得上海师范大学伦理委员会批准, 审批号为 2023096。

## 2.2 实验材料

从《现代汉语常用词词频词典》(北京语言学院, 1986)中选取 32 个中性低频双字词。其中名词和动词各 16 个, 每种词性又包括全左右结构(两字均为左右结构, 例如“设计”)和非全左右结构(两字中至少一字为非左右结构, 例如“技术”、“家具”)的词各 8 个, 共组合成 32 个四类双字词。四类词汇的词频无差异,  $F(3, 28) = 0.42, p = 0.741, \eta_p^2 = 0.04$ , 笔画数也无差异,  $F(3, 28) = 0.79, p = 0.512, \eta_p^2 = 0.08$ 。另用相同标准选取 16 个双字词用于练习。

本研究通过词性判断任务(名词/动词)引发被试对双字词进行语义编码, 通过字形结构判断任务(左右结构/非左右结构)引发使被试对双字词的知觉编码(Grainger, 2024)。根据加工水平理论(Craik & Lockhart, 1972), 本研究中的语义编码需理解词的意义或性质, 是深层次的编码方式; 知觉编码只需获得双字词的字形或结构信息, 是浅层次的编码方式。

## 2.3 实验设计

实验采用单因素被试间设计, 自变量为协作组被试不同编码水平的三种组合: 差异编码(语义+知觉)、高水平编码(语义+语义)和低水平编码(知觉+知觉), 均进行协作提取。另设三种编码水平组合并进行单独提取的名义组作为对照组。因变量为被试的协作或单独提取的表现, 其行为指标为协作提取和二次个人提取成绩的正确率, 近红外指标为脑间同步水平及脑间格兰杰因果值。

## 2.4 实验程序

两名被试同方向而坐, 各面对一台用于呈现实验刺激的电脑屏幕。实验开始前, 告知被试任务流程和规则, 在确认被试理解后开始正式实验。实验共分为 4 个阶段:

(1) 静息阶段: 被试根据屏幕提示进入静息状态, 要求其闭眼休息, 头部和身体尽量保持不动。参照既往 fNIRS 超扫描研究(Lim et al., 2024; Lu & Hao, 2019; Wang et al., 2024),

静息时长设定为 2 分钟，使用近红外光谱脑成像系统采集被试的脑部血氧信号，以获得基线水平数据。

(2) 编码阶段：随机抽取一半被试进行单独的语义编码，另一半进行单独的知觉编码。编码阶段每个试次程序如下：屏幕中央出现 500 ms 的注视点“+”，随后呈现双字词，被试按键反应或到 3000ms 时呈现时间结束，进入下一试次。在语义编码组，被试需对双字词的词性进行判断，并按“F”键(名词)或“J”键(动词)反应；知觉编码组则对双字词的结构进行判断，并按“F”键(全左右结构)或“J”键(非全左右结构)反应。32 个词呈现完毕，插入 2 分钟的分心任务，再进入提取阶段。

(3) 一次提取阶段：协作提取时，每小组两人自由交流共同进行项目回忆，若有分歧也自行商议解决，由任意一人负责记录提取结果。另有语义编码和知觉编码被试各 20 人分别独立对项目进行回忆。但在统计分析时以多次抽取、两两随机配对的方式(柯淳淳 等, 2017; Nie & Guo, 2023)，分别组成同性别的语义+语义名义组、知觉+知觉名义组以及语义+知觉名义组各 20 个，其中语义+语义名义组和知觉+知觉名义组被试通过重复抽取获得。以上协作回忆和单独回忆均限时 4 分钟，如果确定回忆不出更多项目时可提前结束。回忆完毕，插入 2 分钟分心任务，然后进入二次提取阶段。

(4) 二次提取阶段：所有被试均被要求进行个人单独回忆，并各自将回忆出的词语书写于答题纸上。限时 4 分钟(见图 1)。

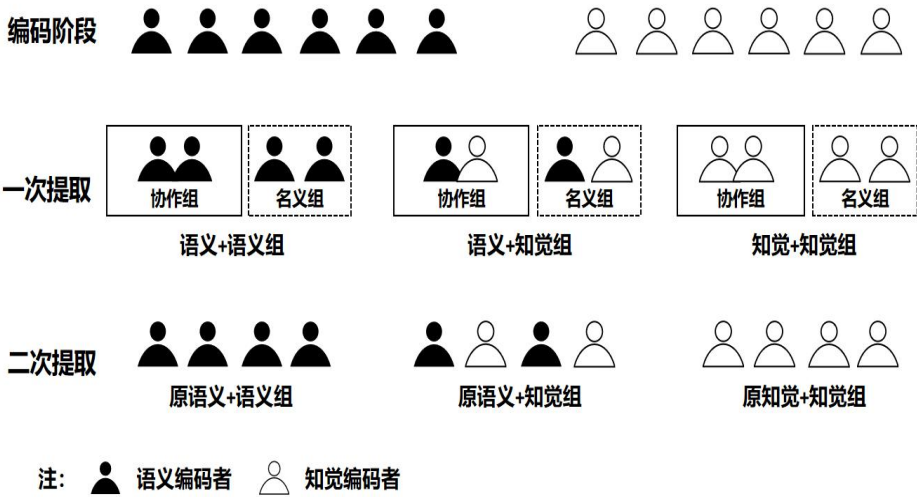


图 1 实验流程图

注：虚线框表示名义组成员独立提取，数据分析时组合为虚拟小组。

### 2.5 近红外脑成像数据采集

采用德国 NIRx 公司生产的 NIRScout 16-24 型近红外光谱脑成像系统进行数据采集。该设备通过发射 760nm 与 850nm 双波长近红外光，以 7.8125Hz 采样频率检测大脑皮层血红蛋白的光吸收特性，实时记录含氧血红蛋白(Oxy-Hb)与脱氧血红蛋白(Deoxy-Hb)的浓度变化。

基于前人研究(Vanlangendonck et al., 2018), 本实验将前额叶皮层及右侧颞顶联合区作为兴趣区, 采用 8 个光源发射器与 12 个光探测器构成 24 个测量通道(见图 2), 其中前额叶区域分布 17 个通道(1~17), 右侧颞顶联合区分布 7 个通道(18~24)。随后, 基于 MATLAB 的 NIRS\_SPM 工具箱对标准化三维头部上光极和通道的解剖位置进行了评估, 得出了光极的蒙特利尔神经学研究所(MNI)坐标以及所有 24 个通道的皮层定位概率。

## 2.6 行为数据分析

本实验共有三种编码组合的协作组各 40 人(即 20 组), 语义和知觉编码的名义组各 20 组。行为实验无数据剔除。参照前人研究(Saraiva et al., 2023), 将每小组两位被试正确提取项目与总项目的比率即正确率作为该小组的记忆表现指标, 包括协作提取(一次提取)正确率与协作后个体提取(二次提取)正确率。

首先, 为考察不同编码水平组合(语义+语义、知觉+知觉、语义+知觉)对一次提取(协作提取)的影响, 对三个协作组的一次提取正确率进行单因素方差分析。其次, 为明确各编码条件的协作抑制效应, 将各协作组的提取成绩与对应名义组的成绩通过独立样本  $t$  检验进行比较。

二次个人提取正确率是先前协作经验对个体后续记忆影响的指标。首先, 对原协作组在三种编码组合条件的二次个体提取正确率进行单因素方差分析, 确定先前协作的编码组合方式是否影响后续个人回忆。其次, 为明确各编码条件的协作后效应, 采用独立样本  $t$  检验, 在各编码组合条件下分别比较原协作组与原名义组成员的二次提取成绩。最后, 为考察一次提取中不同编码水平组合与提取方式对后续个人单独提取的影响, 进一步将被试划分为以下六组: (1)原语义+语义协作组, (2)原语义+知觉协作组中的语义组, (3)原语义+知觉协作组中的知觉组, (4)原名义组中的语义组, (5)原名义组中的知觉组, (6)原知觉+知觉协作组。通过单因素方差分析对六组被试的二次提取表现进行比较, 以确定不同编码和提取经历对协作后个体记忆表现的影响。

## 2.7 近红外数据分析

**预处理** 流程包含以下标准化步骤: 首先通过 nirsLAB 软件计算差异系数(CV)进行信号质量筛查, 剔除 CV 值超过 15% 的异常通道(Zhang, Ye, et al., 2024)。随后运用 Matlab 软件 Homer2 工具包执行预处理: 通过光密度转换函数(hmrIntensity2OD)将原始信号转化为光学密度数据, 应用 hmrMotionArtifactByChannel 工具识别运动伪迹并进行校正(Brigadoi & Cooper, 2015), 参数设置为  $tMotion = 1.0$ 、 $tMask = 1.0$ 、 $STDEVthresh = 15.0$ 、 $AMPthras = 5.0$ 。最后基于修正的 Beer-Lambert 定律(Cope & Delpy 1988), 将预处理后的光学密度数据转换为血红蛋白浓度数据。由于 HbO 浓度能反映大脑活动时血流量变化, 具有较高的信噪比, 因此被广泛用于基于 fNIRS 超扫描的社会互动研究中, 也是本研究关注的指标。

**脑间同步** 首先, 采用小波变换相干性(Wavelet Transform Coherence, WTC)方法计算协作双方的神经活动相干性(Grinsted et al., 2004), 包括静息状态、协作提取以及协作后二次个

人提取三个阶段。感兴趣频段的选择则参照近年来人际互动的相关研究，先选择较大频段(0.01~0.25Hz)，在此基础上对频段内每一频逐一计算，从而获取与该研究相关的频段范围。本研究重点关注是每对被试在协作提取时脑间同步结果，因此，为更精确的锁定与协作提取任务更相关的频段，对静息阶段与协作提取阶段进行比较。首先，将协作提取任务和静息阶段 0.01~0.5 Hz 中每一个频段的脑间同步进行平均，并进行 Fisher Z 转换；接着，对各频段下 24 个脑区对的脑间同步分别进行配对样本  $t$  检验；最后，对  $p$  值进行 FDR 校正，并分别生成  $t$  值与  $p$  值热图(图 3)。结果显示，在协作提取时，0.080~0.092 Hz 的脑间同步较为集中并显著高于静息状态。此外，在该频段上，协作后二次个人提取阶段和静息阶段的脑间同步对比也是显著的。因此，确定 0.080~0.092 Hz 为感兴趣频段，且该范围可有效隔离心跳(~1Hz)与呼吸(~0.2-0.3Hz)等生理噪声。随后，计算感兴趣频段下各个通道对在上述三个阶段的脑间同步，数据经 Fisher-z 转换进行标准化处理。以静息阶段的脑间同步作为基线，分别将协作提取和协作后二次个人提取阶段的脑间同步减去基线，得到最终的脑间同步指标。

获得每一对被试在各个通道的脑间同步后。统计检验上，首先采用单样本  $t$  检验，分别考察协作提取及二次个人提取过程中是否有通道对呈现出显著的脑间同步增强。所有经 FDR 校正后呈现出显著脑间同步的通道，将纳入进一步统计分析，即对不同编码水平协作组合的脑间同步进行单因素三水平方差分析。

**行为-脑相关分析** 基于皮尔逊相关分析，计算协作提取任务阶段脑间同步分别与一次协作和二次个人提取项目正确率之间的相关关系。

**脑-脑同步方向性分析** 采用格兰杰因果分析(Granger Causality analyses, GCA)衡量协作双方之间大脑活动的信息流，以理解脑-脑同步的方向性特征。GCA 是一种使用向量自回归模型 (Vector Autoregressive Model, VAR)来衡量两列信号时间序列因果关系的方法(Barnett & Seth, 2014)。采用 Matlab 工具包(Multivariate Granger Causality Toolbox, MVGC)计算协作组被试所有通道对的 GCA 值(方向：奇数被试→偶数被试，偶数被试→奇数被试)，识别二人组中不同脑区之间的格兰杰因果关系。在语义+知觉组中的对应方向为语义编码者→知觉编码者和知觉编码者→语义编码者。统计检验上，首先采用单样本  $t$  检验分别验证各组别和阶段下的 GCA 值是否显著大于零。接着，对 GCA 值进行 3(编码水平组合：语义+语义，知觉+知觉，语义+知觉)×2(方向：奇数被试→偶数被试，偶数被试→奇数被试)的两因素方差分析。

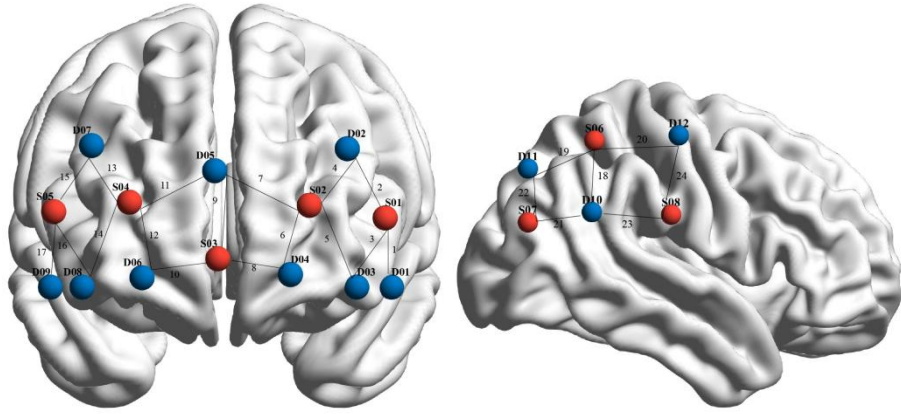


图 2 光极位置示意图，红色代表发射探头，蓝色代表接收探头，连接线为通道

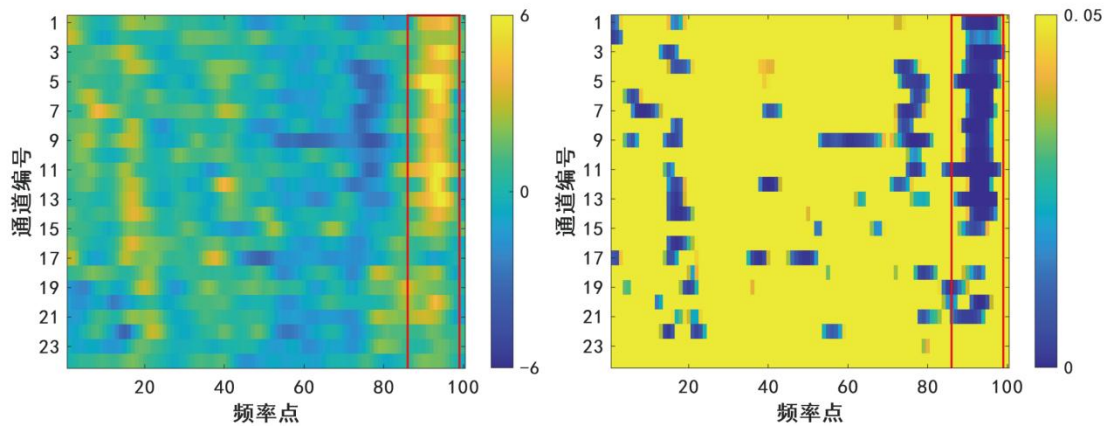


图 3 频段选取的 FDR  $t$  值与  $p$  值的热图

### 3 结果

#### 3.1 一次提取的正确率

对一次提取正确率进行 3 水平单因素方差分析(编码水平组合: 语义+语义, 知觉+知觉, 语义+知觉), 结果显示, 三种编码水平组合之间的差异显著,  $F(2, 57) = 3.51$ ,  $p = 0.036$ ,  $\eta_p^2 = 0.11$ . LSD 多重比较显示, 协作组中的语义+语义组( $M = 0.36$ ,  $SD = 0.10$ )显著高于知觉+知觉组( $M = 0.27$ ,  $SD = 0.12$ ),  $p = 0.012$ , 95% CI = [0.02, 0.16], 但语义+知觉组( $M = 0.33$ ,  $SD = 0.12$ )与语义+语义组( $p = 0.433$ , 95% CI = [-0.10, 0.04])和知觉+知觉组( $p = 0.078$ , 95% CI = [-0.01, 0.14])之间差异均不显著。这表明语义编码相对知觉编码的优势, 但差异编码并未表现出劣势。

为进一步分析不同编码水平组合的协作提取效应, 将相应的名义组纳入统计, 通过  $t$  检验确定协作抑制效应。结果发现, 两个组内使用相同编码方式的协作组, 即语义+语义组( $t_{(38)} = -2.36$ ,  $p = 0.024$ , 95% CI = [-0.14, -0.01], Cohen's  $d = 0.75$ )和知觉+知觉组( $t_{(38)} = -2.41$ ,  $p = 0.021$ , 95% CI = [-0.14, -0.01], Cohen's  $d = 0.76$ )均低于对应的名义组( $M_{\text{语义+语义}} = 0.43$ ,  $SD = 0.09$ ;  $M_{\text{知觉+知觉}} = 0.35$ ,  $SD = 0.07$ ), 出现了协作抑制; 而组内使用不同编码方式的语义+知觉协

作组与相应名义组( $M = 0.31, SD = 0.10$ )的提取成绩差异不显著,  $t_{(38)} = 0.61, p = 0.547$ , 95% CI = [-0.05, 0.09], Cohen's  $d = 0.19$ , 未表现出协作抑制。即差异编码组的提取未因协作未使受到损害。以上结果见图 4a。

### 3.2 二次提取的正确率

对二次提取正确率进行 3 水平单因素方差分析(编码水平组合: 语义+语义, 知觉+知觉, 语义+知觉), 结果显示, 三种编码水平组合之间的差异显著,  $F(2, 117) = 7.08, p = 0.001$ ,  $\eta^2_p = 0.11$ 。LSD 多重比较显示, 原协作组中的语义+语义组( $M = 0.31, SD = 0.11$ )和原语义+知觉组( $M = 0.29, SD = 0.12$ )的二次提取正确率之间无显著差异,  $p = 0.475$ , 95% CI = [-0.03, 0.07], 但均显著高于原知觉+知觉组( $M = 0.21, SD = 0.12$ ),  $ps < 0.01$ 。这表明在二次提取中, 语义编码依然保持着相对知觉编码的优势, 且差异编码组依然维持了与语义编码组合相当的高水平。

为进一步分析不同编码水平组合的协作后提取效应, 将相应的名义组纳入后, 对不同编码方式小组二次提取正确率进行独立样本  $t$  检验, 发现两个原相同编码方式的协作组(原语义+语义组和原知觉+知觉组)与相应的名义组( $M_{\text{语义+语义}} = 0.27, SD = 0.11$ ;  $M_{\text{知觉+知觉}} = 0.18, SD = 0.09$ )差异均不显著,  $ps > 0.05$ , 未出现协作后促进; 而原组内使用不同编码方式协作组(语义+知觉组)显著高于相应名义组( $M = 0.23, SD = 0.11$ ),  $t(78) = 2.44, p = 0.017$ , Cohen's  $d = 0.54$ , 95% CI = [0.01, 0.11], 表现出协作后促进效应。即只有经历过差异编码协作的个体, 在后续独立提取中表现出了成绩的提升, 而相同编码的协作并未带来这种促进作用。以上结果见图 4b。

为探明原差异协作组的协作后提取优势的来源(来源于原差异协作组中的语义编码者、知觉编码者还是两者都有), 将被试按一次提取时的编码水平(语义、知觉)和提取的方式(协作组协作提取、名义组单独提取)的不同, 分为六组比较。六组被试及其二次提取正确率分别为: (1)原语义+语义协作组(简称语义协作组)( $M = 0.31, SD = 0.11$ ), (2)原语义+知觉协作组中的语义组(简称差异协作语义组)( $M = 0.30, SD = 0.12$ ), (3)原语义+知觉协作组中的知觉组(简称差异协作知觉组)( $M = 0.28, SD = 0.12$ ), (4)原名义组中的语义组(简称语义名义组)( $M = 0.27, SD = 0.11$ ), (5)原名义组中的知觉组(简称知觉名义组)( $M = 0.18, SD = 0.09$ ), (6)原知觉+知觉协作组(简称知觉协作组)( $M = 0.21, SD = 0.12$ )。单因素方差分析结果显示, 六组的正确率差异显著,  $F(5, 154) = 5.26, p < 0.001, \eta^2_p = 0.15$ 。比较原差异协作组的结果发现, 差异协作语义组与差异协作知觉组差异不显著,  $p = 0.486$ , 95% CI = [-0.05, 0.10], 与名义语义组差异也不显著,  $p = 0.384$ , 95% CI = [-0.04, 0.10], 表明差异协作组中的语义组, 在二次提取中未产生相对差异协作知觉组和名义组的协作后提取优势, 原差异协作组的二次提取优势并非来源于其中的语义组。而差异协作知觉组显著高于知觉名义组,  $p = 0.009$ , 95% CI = [0.02, 0.16], 表明原差异协作组的二次提取优势来自组中的知觉组。另外, 差异协作知觉组的二次

提取表现也显著高于知觉协作组,  $p=0.047$ , 95% CI=[0.001, 0.12], 显示此组的协作后优势源于与语义组的协作提取。以上结果见图 4c。

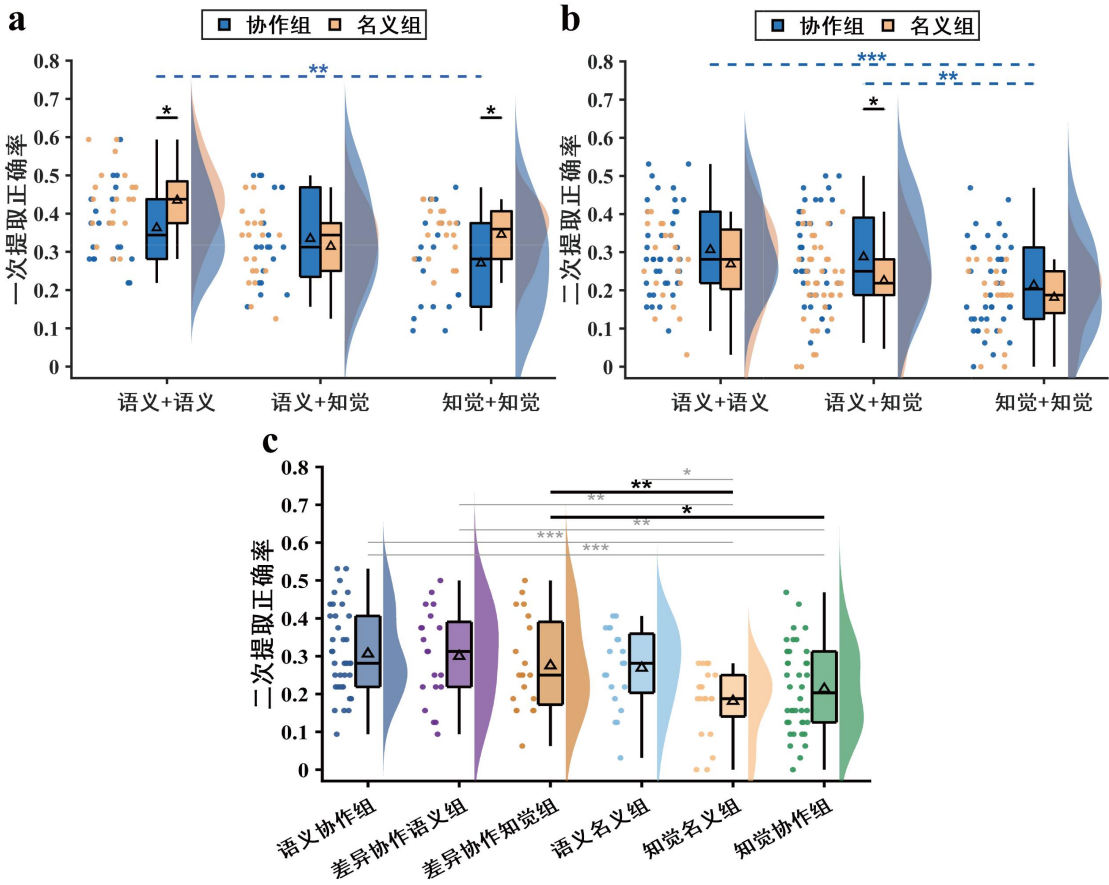


图 4 一次提取和二次提取的行为数据结果

注: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ 。下同。(a) 各协作组和名义组一次提取正确率;(b) 各协作组和名义组的二次提取正确率;(c) 六个组别的二次提取正确率

图 a、b 中显著线说明: 虚线为固定组别时编码水平组合的差异检验; 实线为固定编码水平组合时组别的差异检验。

### 3.3 脑间同步结果

对协作记忆引发的脑间同步进行单样本  $t$  检验。发现在语义+语义编码条件, 前额叶通道 4,11,13, 显示出显著的脑间同步,  $ts \geq 2.86, ps \leq 0.010$  (FDR  $ps < 0.05$ ), Cohen's  $ds \geq 0.64$ (图 5a)。语义+知觉编码条件, 前额叶通道 3,5,8,10,11,14, 显示出显著的脑间同步,  $ts \geq 2.93, ps \leq 0.009$  (FDR  $ps < 0.05$ ), Cohen's  $ds \geq 0.65$ ; 右侧 TPJ 通道 19 显示出显著的脑间同步,  $t(19) = 4.70, p < 0.001$  (FDR  $p < 0.05$ ), Cohen's  $d = 1.05$ (图 5b)。知觉+知觉编码条件, 前额叶通道 1,2,3,4,5,6,10,11,12,13,15, 显示出显著的脑间同步,  $ts \geq 2.76, ps \leq 0.013$  (FDR  $ps < 0.05$ ), Cohen's  $ds \geq 0.62$ 。右侧 TPJ 通道 20 显示出显著的脑间同步,  $t(19) = 3.99, p = 0.001$  (FDR  $p < 0.05$ ), Cohen's  $d = 0.89$ (图 5c)。

以脑间同步作为因变量, 对上述通道的数据进行 3 水平单因素方差分析(编码水平组合:

语义+语义, 知觉+知觉, 语义+知觉), 结果显示(图 5d), 在通道 11(BA10, 右侧额中回)上, 不同编码水平组合之间的差异显著,  $F(2, 57)=3.26$ ,  $p=0.046$ ,  $\eta^2_p=0.10$ 。LSD 多重比较显示, 协作组中的语义+知觉组( $M=0.21$ ,  $SD=0.22$ )脑间同步显著高于语义+语义组( $M=0.07$ ,  $SD=0.10$ ),  $p=0.018$ , 95% CI = [0.03, 0.25], 但知觉+知觉组( $M=0.18$ ,  $SD=0.20$ )和语义+语义组( $p=0.067$ , 95% CI = [-0.22, 0.01])及语义+知觉组( $p=0.564$ , 95% CI = [-0.15, 0.08])之间脑间同步差异均不显著。这表明在右侧额中回, 差异编码的协作提取过程比相同语义编码的协作诱发了更强的脑间同步。以上结果见图 5e。

在通道 19(BA39, 右侧角回), 不同编码水平组合之间的差异也显著,  $F(2, 57)=3.47$ ,  $p=0.038$ ,  $\eta^2_p=0.11$ 。LSD 多重比较显示, 协作组中的语义+知觉组( $M=0.15$ ,  $SD=0.13$ )脑间同步显著高于语义+语义组( $p=0.027$ , 95% CI = [0.01, 0.19])和知觉+知觉组( $p=0.026$ , 95% CI = [0.01, 0.19]), 但相同语义( $M=0.05$ ,  $SD=0.18$ )和相同知觉( $M=0.04$ ,  $SD=0.10$ )编码组之间差异不显著,  $p=0.982$ , 95% CI = [-0.09, 0.09]。这表明在右侧角回, 差异编码组合比两种相同编码组合均诱发了更强的脑间同步。以上结果见图 5f。

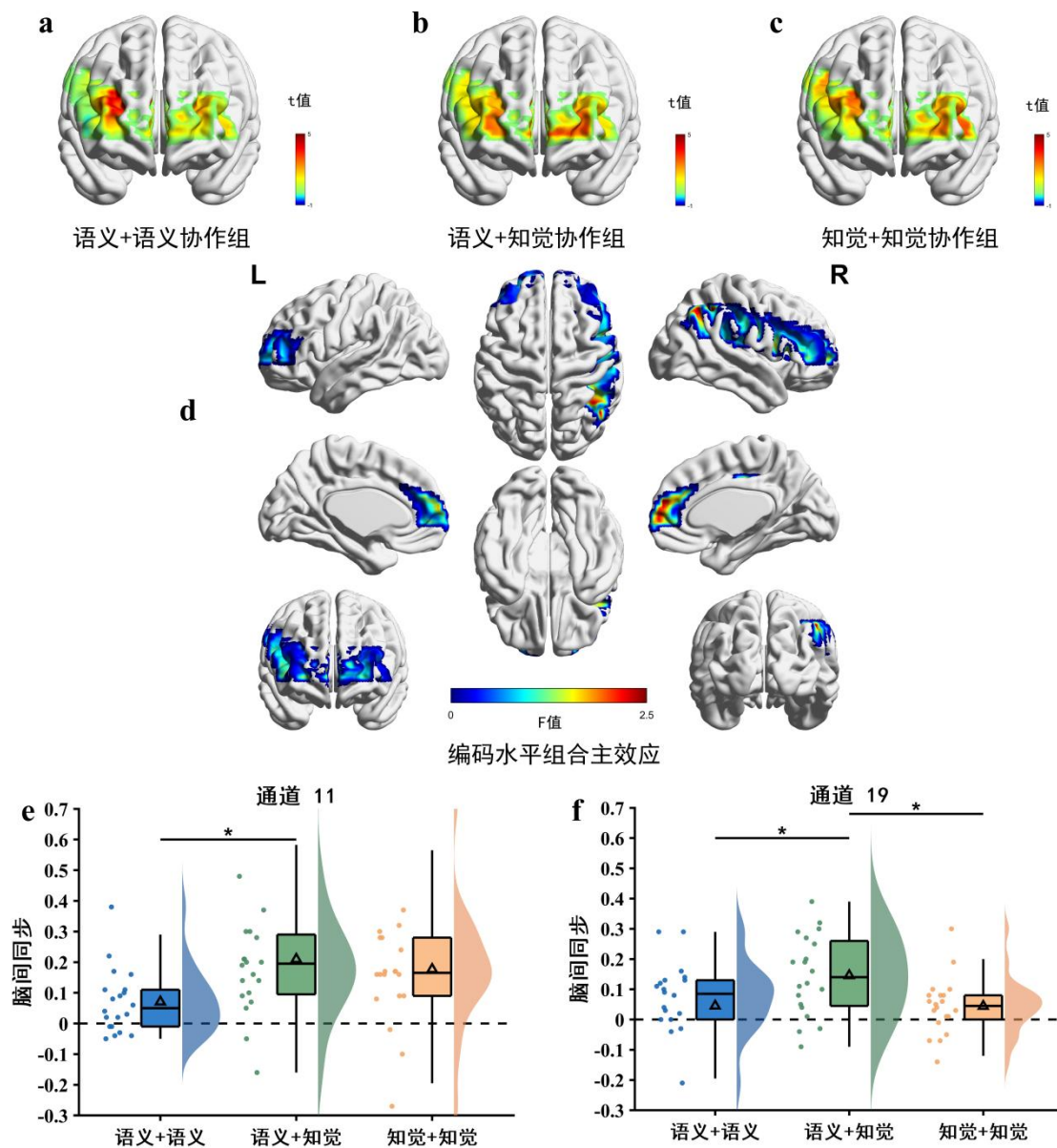


图5 一次提取脑间同步结果

注: (a) 语义+语义协作组脑间同步  $t$  值图; (b) 语义+知觉协作组脑间同步  $t$  值图; (c) 知觉+知觉协作组脑间同步  $t$  值图; (d) 不同编码水平协作组合脑间同步  $F$  值图; (e) 通道 11 不同编码水平协作组合的脑间同步值; (f) 通道 19 不同编码水平协作组合的脑间同步值

### 3.4 协作提取脑间同步与行为表现的关联

采用皮尔逊相关分析考察上述发现的脑间同步(通道 11 和通道 19)与协作提取及协作后二次个人提取行为表现的关系。发现在通道 11 和 19 上, 无论是何种编码组合, 协作提取时的脑间同步与协作成绩相关均不显著( $ps > 0.05$ )。

然而, 在考察脑间同步与后续个人记忆的关系时, 发现了特定的关联模式。语义+语义编码组在通道 11 上的脑间同步水平与二次个人提取正确率呈显著正相关( $r = 0.23, p = 0.042$ ), 表明对于相同语义编码组合, 协作过程中的脑间同步越强, 越有利于后续个体独立的记忆提

取。语义+知觉编码组在通道 19 上的脑间同步水平与二次个人提取正确率呈显著正相关( $r = 0.26, p = 0.021$ ), 表明对于差异编码组合, 协作过程中的脑间同步越强, 越能促进成员后续独立的记忆表现。其他条件下的相关均不显著( $ps > 0.05$ )。以上结果见图 6。

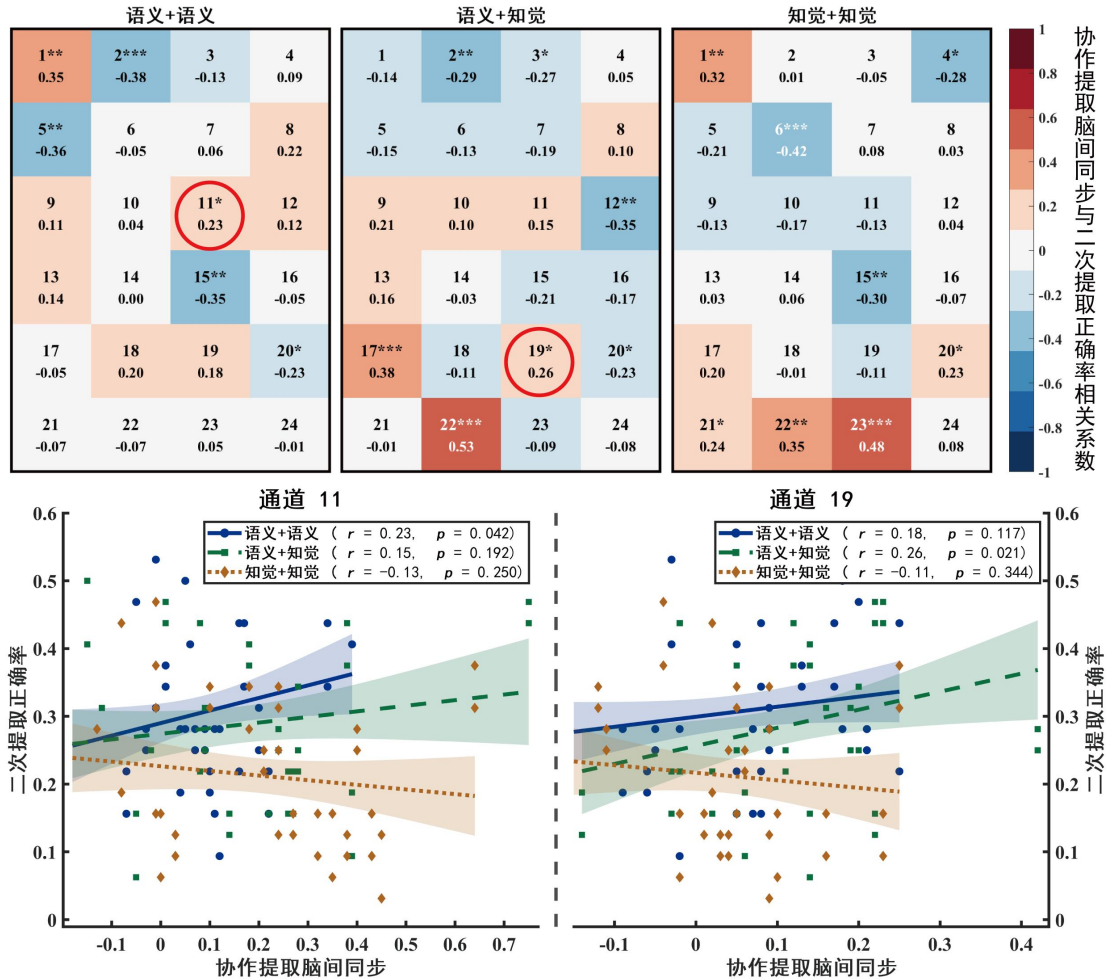


图 6 各协作组协作提取脑间同步与二次个人提取正确率的相关结果图

### 3.5 协作提取脑间同步的方向性

为考察协作组的编码水平组合和方向性对格兰杰因果值的影响, 对协作组进行 3(编码水平组合: 语义+语义, 知觉+知觉, 语义+知觉) $\times$ 2(方向: 奇数被试 $\rightarrow$ 偶数被试, 偶数被试 $\rightarrow$ 奇数被试)的两因素方差分析, 语义+知觉组对应方向分别为“语义编码者 $\rightarrow$ 知觉编码者”和“知觉编码者 $\rightarrow$ 语义编码者”。结果发现, 在通道 1 $\rightarrow$ 通道 21 上有显著的交互效应,  $F(2, 114) = 3.70, p = 0.028, \eta_p^2 = 0.06$ 。在奇数被试 $\rightarrow$ 偶数被试的方向上, 语义+知觉协作组( $M = 0.022, SD = 0.022$ )的 GCA 值显著高于语义+语义协作组( $M = 0.010, SD = 0.008$ )和知觉+知觉协作组( $M = 0.010, SD = 0.008$ ),  $ps < 0.05$ 。在偶数被试 $\rightarrow$ 奇数被试的方向上, 三种编码水平组合之间差异均不显著,  $ps > 0.05$ 。语义+知觉协作组在奇数被试 $\rightarrow$ 偶数被试方向上的 GCA 值显著

高于偶数被试→奇数被试方向( $M = 0.011$ ,  $SD = 0.011$ ),  $p = 0.045$ ,  $95\%CI = [0.0002, 0.02]$ 。语义+语义组和知觉+知觉组在奇数被试→偶数被试和偶数被试→奇数被试( $M_{\text{语义}+\text{语义}} = 0.013$ ,  $SD = 0.011$ ;  $M_{\text{知觉}+\text{知觉}} = 0.020$ ,  $SD = 0.032$ )两个方向上的差异均不显著,  $ps > 0.05$ 。这表明在额下回→角回方向上的语义编码和知觉编码之间的流动模式为: 语义编码者→知觉编码者显著强于知觉编码者→语义编码者, 即知觉编码者追随语义编码者的模式。以上结果见图 7。

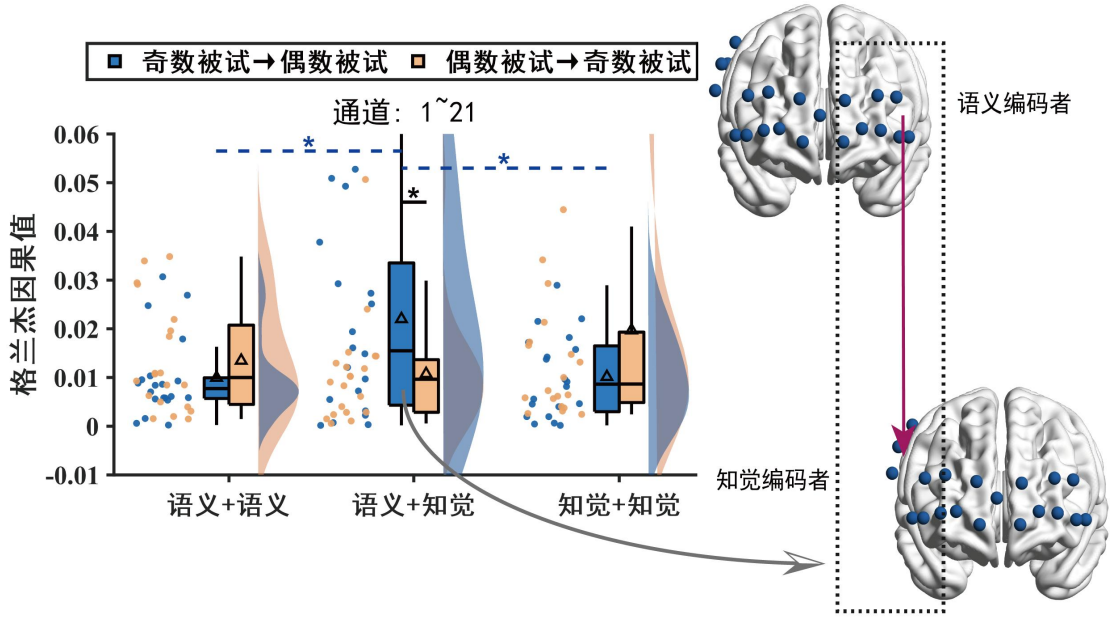


图 7 各协作组通道 1~21 的格兰杰因果值

注: 显著线说明: 虚线为固定方向时编码水平组合的差异检验; 实线为固定编码水平组合时方向的差异检验。图中右侧为语义+知觉协作组中奇数被试→偶数被试的脑区流动示例。

## 4 讨论

### 4.1 差异编码组的一次和二次提取优势

本研究发现, 在成员编码水平相同的协作组(语义+语义组、知觉+知觉组), 一次提取正确率均显著低于名义组, 呈现协作抑制。而唯一的成员编码水平有差异的协作组(语义+知觉组), 与相应名义组的提取正确率无差异, 消除了协作抑制。这与本研究的假设 1a 一致, 表明消除抑制的关键并非编码的水平, 而是协作者编码水平的差异性。一方面, 当协作组成员采用相似的编码方式, 无论是深层还是浅层编码, 均会在记忆提取过程中引发线索竞争, 导致部分记忆线索被破坏或抑制, 这种现象是由于成员间相似的提取路径(也即提取策略)相互干扰所致(Angne et al., 2024; Mannering et al., 2025)。而差异编码协作组(语义+知觉组)的成员在提取时, 采用了差异明显的提取策略, 有效减少了成员间的相互干扰, 保护了个体独特的记忆组织。这也与已有研究结果一致, 即编码组织方式差异性可消除协作抑制(刘希平等,

2014)。总之，本研究结果支持了提取策略干扰假说。

差异编码协作组的记忆优势延续到了二次提取——其成员在二次单独提取时正确率显著高于名义组，表现出协作后促进效应，而两个相同编码协作组则未出现此效应。支持了假设 1b。进一步分析可知，协作后促进效应主要来源于原协作组中的知觉编码者，其二次提取表现显著优于名义组中单独编码的知觉组。研究者认为，协作组二次提取优势源于在协作提取中，组内成员通过交叉线索和他人再现，可以共享其先前独有的信息(Greeley & Rajaram, 2023)，促进集体记忆的拓展(Rajaram & Maswood, 2017)。而在差异编码的协作组，采用深层编码方式的语义编码者比知觉编码者提取了更多信息，从而为知觉编码者提供了再学习及再巩固的机会，使知觉编码者在二次个人提取中获益更多。

#### 4.2 差异编码协作提取的神经机制

脑间同步的结果为上述行为模式提供了神经机制证据。本研究发现，在协作提取过程中，差异编码协作组(语义+知觉组)在右侧额中回(BA10)和右侧角回(BA39)区域表现出显著高于相同编码组合的脑间同步水平，与假设 2 一致。

已有研究表明，右侧额中回区域主要负责执行控制和认知协调，其同步性增强反映了协作双方在注意力分配和策略管理上的努力(Czeszumski et al., 2022; Liu, Han, et al., 2024)。本研究中，不同编码水平的成员需要实时监测同伴提供的新线索，并决定是否将其纳入自身独立的检索路径，或在何种程度上调整自己的策略以避免冲突，这一复杂的协调过程高度依赖于该脑区的同步活动(Cui et al., 2012; Xue et al., 2018)。而右侧角回作为颞顶联合区的关键枢纽，在多模态信息整合和意图推断中发挥作用(Czeszumski et al., 2022)。具体到本研究中，右侧角回脑间同步的增强可能反映了语义编码者与知觉编码者在协作时，对彼此独立检索意图的实时预测与理解(Liu, Cui, et al., 2024; Zhou et al., 2022)。这种机制使协作者能高效预测和处理同伴的输出，将其作为补充信息而非强制性线索，从而在保持自身独特记忆组织的同时，利用外部线索来填补回忆空白(Vanlangendonck et al., 2018)。已有研究支持了上述推断。如 Liu 和 Cui 等(2024)的 fNIRS 研究发现，在按键合作、七巧板拼图与 Jenga 积木搭建三种合作任务中，右侧额中回与右侧角回均表现出显著的脑间同步增强。一项元分析研究也表明，额中回和右侧颞顶联合区的脑间同步在多种协作任务中持续出现，是协作活动的重要神经基础(Czeszumski et al., 2022)。此外，本研究还发现，差异编码协作组在协作提取阶段的脑间同步水平，与协作后个人提取正确率显著正相关，表明协作提取期间神经层面的高同步性，对后续个体记忆表现产生了持续的积极影响。

总之，在编码水平差异协作组，与行为结果所揭示的提取策略独立性相呼应，更高水平

的脑间同步反映了协作双方为有效协调各自的检索过程所付出的认知努力(Pan et al., 2023; Tang et al., 2020; Zhang, Ye, et al., 2024)。这表明, 当协作组成员因编码水平差异导致提取策略存在差异时, 大脑需要额外的协调机制来管理和同步这些不匹配的线索, 从而在保持个体策略完整性的同时, 避免相互干扰(Angne et al., 2024; Hensen et al., 2024)。正是这种增强的神经协调, 促使协作者有效抑制了同伴策略干扰, 在消除协作抑制的基础上提升了整体协作表现。

#### 4.3 差异编码协作者协作过程的神经机制

使用格兰杰因果分析确定差异编码组(语义+知觉组)协作提取中的脑间同步方向, 发现在额中回→角回通路中, 语义编码者向知觉编码者的信息流动强度显著强于反方向的流动, 即呈现出知觉编码者追随语义编码者的神经模式, 支持了假设 3。

这一定向的通道流动模式与激活脑区的核心功能相符合。信息流从负责执行控制和高级社会认知的额中回(Shamay-Tsoory et al., 2025), 流向负责多模态信息整合和情景记忆重建的角回(Acconito et al., 2025), 反映了一种自上而下的策略引导。具体而言, 在差异编码协作中, 语义编码者通过其额中回区域发起执行控制信号, 有效引导和调控知觉编码者角回区域的信息整合过程。同时, 从记忆编码效果看, 语义编码者通过深层编码, 形成更稳定、更具结构的记忆组织, 而浅层知觉编码者则相反(Craik & Lockhart, 1972; Lawrence et al., 2024), 这进一步支持了语义编码者在协作中的主导作用。这种由语义编码者主导的定向信息流, 驱动并引导知觉编码者对记忆材料细节的提取与整合, 形成“语义控制, 知觉追随”的高效协作模式。

本研究发现的由语义编码者主导的不对称信息流, 也与先前在各种协作任务情境的 fNIRS 研究结果一致。例如, Jiang 等(2015)在团体讨论任务中发现, 从领导者到追随者的脑间因果连接显著强于相反方向; Pan 等(2018)也观察到从教师到学生的信息流动性更强。所以, 当协作双方存在角色地位或认知能力差异时, 主导方由于承担更多认知加工与信息整合的任务, 会通过更主动的神经信息传递引导非主导者, 在本研究中即表现为差异编码协作组中, 语义编码者对知觉编码者的引导。

因此, 本研究的格兰杰因果分析结果揭示了差异编码协作者协作提取的神经机制, 即依赖于语义编码者主导的定向神经信息流。这一信息流通过特定的跨脑区通路(额中回→角回)实现了对差异化策略的有效引导, 使差异编码的协作组成员在保持提取独立性的基础上规避了相互干扰, 在行为层面优化了协作提取。

## 5 本研究的创新与不足

本研究首次从协作者编码水平差异的视角，整合行为与神经生理数据，揭示了编码水平差异消除协作抑制的深层机制。具体地说，在行为层面，发现差异编码组合能够通过个体独特的检索策略消除了协作抑制，验证了提取策略干扰假说，这一结果为全方位理解协作提取的加工机制提供了协作者差异编码视角的关键证据；在神经层面，首次将近红外超扫描技术应用于协作记忆研究，发现在差异编码协作组，右侧额中回和右侧角回的脑间同步显著增强，揭示了协作成员通过增强认知协调和意图推断规避相互干扰的神经机制，同时利用格兰杰因果分析，发现了差异化协作中存在的主导-追随神经模式。由此可见，本实验中神经层面的研究，不仅从静态(脑同步)揭示了编码差异加工的机制，而且从动态(信息流)呈现了编码差异协作独特的协作方式。

本研究也存在以下不足：首先，研究主要聚焦于行为结果和脑间同步，但对于大脑内部具体的认知加工过程，如记忆提取的动态过程和表征重构，仍缺乏更精细的分析，未来研究可以结合事件相关电位(ERP)的时间序列分析，更精确地捕捉协作提取的动态认知过程。其次，由编码水平差异者共同完成认知任务，是日常工作和学习中的常见协作形态，但本研究使用的“单独编码—协作提取”的实验范式具有高度简化的特点，且预先设定了协作内容和方式，限制了研究结果对改进真实情境协作记忆的启发。未来研究可通过改进基础实验范式，引入实时反馈、任务的动态调整以及价值导向等变量，在更具生态效度的实验情境中探究差异编码者协作记忆的加工机制和影响因素。

## 6 结论

本研究从行为和认知神经两个层面探讨了协作者编码水平差异影响协作提取的机制。在行为层面，差异编码的协作组成员因采用了不同的提取策略，从而在一定程度上避免了提取策略干扰，消除了协作抑制效应，并表现出协作后提取优势。在神经机制层面，差异编码协作组在右侧额中回和右侧角回表现出更高的脑间同步，反映了协作过程中大脑为协调检索策略而主动适应的努力。而格兰杰因果分析进一步揭示了差异编码协作的神经信息流动模式：由语义编码者主导的“语义控制，知觉追随”的定向信息传递。

## 参考文献

Acconito, C., Rovelli, K., Saquella, F., & Balconi, M. (2025). Cognitive and emotional engagement in negotiation: insights from EEG and fNIRS Hyperscanning. *Experimental Brain Research*, 243(6), 1–17.  
<https://doi.org/10.1007/s00221-025-07093-w>

- Andersson, J. (2001). Net effect of memory collaboration: How is collaboration affected by factors such as friendship, gender and age? *Scandinavian Journal of Psychology*, 42(4), 367–375.  
<https://doi.org/10.1111/1467-9450.00248>
- Angne, H., Cornell, C. A., & Zhang, Q. (2024). A context-based model of collaborative inhibition during memory search. *Scientific Reports*, 14(1), 27645. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78517-w>
- Barnett, L., & Seth, A. K. (2014). The MVGC multivariate Granger causality toolbox: a new approach to Granger-causal inference. *Journal of Neuroscience Methods*, 223, 50–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2013.10.018>
- Bärthel, G. A., Wessel, I., Huntjens, R. J., & Verwoerd, J. (2017). Collaboration enhances later individual memory for emotional material. *Memory*, 25(5), 636–646. <http://dx.doi.org/1080/0965821.1.2016.1208248>
- Basden, B. H., Basden, D. R., Bryner, S., & Thomas III, R. L. (1997). A comparison of group and individual remembering: Does collaboration disrupt retrieval strategies? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23(5), 1176–1189. <http://dx.doi.org/10.1037/0278-7393.23.5.1176>
- Beijing Language Institute. (1986). *Modern Chinese Frequency Dictionary (in Chinese)*. Beijing Language Institute Publisher.  
[北京语言学院. (1986). *现代汉语频率词典*. 北京: 北京语言学院出版社]
- Brigadói, S., & Cooper, R. J. (2015). How short is short? Optimum source–detector distance for short-separation channels in functional near-infrared spectroscopy. *Neurophotonics*, 2(2), 025005.  
<https://doi.org/10.1117/1.NPh.2.2.025005>
- Blumen, H. M., & Stern, Y. (2011). Short-term and long-term collaboration benefits on individual recall in younger and older adults. *Memory & Cognition*, 39, 147–154. <https://doi.org/10.3758/s13421-010-0023-6>
- 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.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.22754>
- Cope, M., & Delpy, D. T. (1988). System for long-term measurement of cerebral blood and tissue oxygenation on newborn infants by near infra-red transillumination. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 26(3), 289–294. <https://doi.org/10.1007/BF02447083>
- Craik, F. I., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11(6), 671–684. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(72\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(72)80001-X)
- 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., 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), 1–9. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0268-21.2022>
- Danielsson, H., Dahlström, Ö., & Andersson, J. (2011). The more you remember the more you decide: Collaborative memory in adolescents with intellectual disability and their assistants. *Research in Developmental Disabilities*, 32(2), 470–476. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.12.041>
- Gao, Y. X., Chu, Y., Liu, X. P., & Tang, W. H. (2024). Post-collaborative benefits: A meta-analysis of the effect of collaboration on subsequent individual retrieval. *British Journal of Psychology*, 115, 740–758.  
<https://doi.org/10.1111/bjop.12723>
- Grainger, J. (2024). Letters, Words, Sentences, and Reading. *Journal of Cognition*, 7(1), 1–21.  
<https://doi.org/10.5334/joc.396>
- Greeley, G. D., & Rajaram, S. (2023). Collective memory: Collaborative recall synchronizes what and how people

- remember. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 14(4), e1641. <https://doi.org/10.1002/wcs.1641>
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561–566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Harris, C. B., Barnier, A. J., & Sutton, J. (2012). Consensus collaboration enhances group and individual recall accuracy. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(1), 179–194. <http://dx.doi.org/10.1080/17470218.2011.608590>
- Hensen, S., Koch, I., & Hirsch, P. (2024). Impact of process interference on memory encoding and retrieval processes in dual-task situations. *Memory & Cognition*, 52(6), 1246–1262. <https://doi.org/10.3758/s13421-024-01539-2>
- Hood, A. V. B., Whillock, S. R., Meade, M. L., & Hutchison, K. A. (2023). Does collaboration help or hurt recall? The answer depends on working memory capacity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 49(3), 350–370. <https://doi.org/10.1037/xlm0001155>
- 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. <https://doi.org/10.1016/10.1073/pnas.1422930112>
- Jiao, Z., Song, J., Yang, X., Chen, Y., & Han, G. (2024). Social pain sharing boosts interpersonal brain synchronization in female cooperation. *Acta Psychologica*, 243, 104138. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2024.104138>
- Ke, C. C., Nie A. Q., & Zhang R. Q. (2017). The modulation of recall task on collaborative inhibition and error pruning: The influence of emotional valence and level of processing. *Acta Psychologica Sinica*, 49(6), 733–744.
- [柯淳淳, 聂爱情, 张瑞卿. (2017). 回忆任务对合作抑制和错误修剪的调节——情绪效价和编码水平的影响. *心理学报*, 49(6), 733–744. ]
- Kirschner, P. A., Sweller, J., Kirschner, F., & Zambrano R, J. (2018). From cognitive load theory to collaborative cognitive load theory. *International Journal of Computer-supported Collaborative Learning*, 13(2), 213–233. <https://doi.org/10.1007/s11412-018-9277-y>
- Lawrence, C. O., Guitard, D., & Cowan, N. (2024). Short-term retention of words as a function of encoding depth. *Memory & Cognition*, 52(6), 1338–1356. <https://doi.org/10.3758/s13421-024-01546-3>
- Li, Y., Chen, R., Turel, O., Feng, T., Zhu, C. Z., & He, Q. (2021). Dyad sex composition effect on inter-brain synchronization in face-to-face cooperation. *Brain Imaging and Behavior*, 15, 1667–1675. <https://doi.org/10.1007/s11682-020-00361-z>
- Li, Y., Wang, Y. J., Su, C., Deng, F., & Pan, Y. (2025). Bidirectional information flow in cooperative learning reflects emergent leadership. *Communications Biology*, 8(1), 1000. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-08445-6>
- Lim, M., Carollo, A., Bizzego, A., Chen, A. S., & Esposito, G. (2024). Culture, sex and social context influence brain-to-brain synchrony: an fNIRS hyperscanning study. *BMC Psychology*, 12(1), 350. <https://doi.org/10.1186/s40359-024-01841-3>
- Liu, Q., Cui, H., Huang, B., Huang, Y., Sun, H., Ru, X., ... & Chen, W. (2024). Inter-brain neural mechanism and influencing factors underlying different cooperative behaviors: a hyperscanning study. *Brain Structure and Function*, 229(1), 75–95. <https://doi.org/10.1007/s00429-023-02700-4>
- Liu, S., Han, Z. R., Xu, J., Wang, Q., Gao, M., Weng, X., ... & Rubin, K. H. (2024). Parenting links to parent–child interbrain synchrony: a real-time fNIRS hyperscanning study. *Cerebral Cortex*, 34(2), 1–10. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad533>

- Liu, X. P., Zhang, H., & Tang, W. H. (2014). The mechanism of collaborative inhibition: Evidence from the encoding phase. *Journal of Psychological Science*, 37(3), 559–566.
- [刘希平, 张环, 唐卫海. (2014). 协作抑制的作用机制: 来自编码阶段的证据. *心理科学*, 37(3), 559–566.]
- Lu, K., & Hao, N. (2019). When do we fall in neural synchrony with others? *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 14(3), 253–261. <https://doi.org/10.1093/scan/nsz012>
- Luo, X., Zhao, B., Tang, W., Xiao, Q., & Liu, X. (2024). Meta-analysis of collaborative inhibition moderation by gender, membership, culture, and memory monitoring. *Behavioral Sciences*, 14(9), 763. <https://doi.org/10.3390/bs14090763>
- Mannering, W. M., Rajaram, S., Shiffrin, R. M., & Jones, M. N. (2025). Modeling collaborative memory with SAM. *Memory & Cognition*, 53(4), 1245–1258. <https://doi.org/10.3758/s13421-024-01647-z>
- Marion, S. B., & Thorley, C. (2016). A meta-analytic review of collaborative inhibition and postcollaborative memory: Testing the predictions of the retrieval strategy disruption hypothesis. *Psychological Bulletin*, 142(11), 1141–1164. <http://dx.doi.org/10.1037/bul0000071>
- Markus, A., & Shamay-Tsoory, S. G. (2024). Hyperscanning: from inter-brain coupling to causality. *Frontiers in Human Neuroscience*, 18, 1497034. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1497034>
- Maswood, R., Luhmann, C. C., & Rajaram, S. (2022). Persistence of false memories and emergence of collective false memory: collaborative recall of DRM word lists. *Memory*, 30(4), 465–479. <https://doi.org/10.1080/09658211.2021.1928222>
- Nie, A., & Guo, B. (2023). Benefits and Detriments of Social Collaborative Memory in Turn-Taking and Directed Forgetting. *Perceptual and Motor Skills*, 130(3), 1040–1076. <https://doi.org/10.1177/00315125231163626>
- Pan, Y., Novembre, G., Song, B., Li, X., & Hu, Y. (2018). Interpersonal synchronization of inferior frontal cortices tracks social interactive learning of a song. *NeuroImage*, 183, 280–290. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.08.005>
- Rajaram, S., Greeley, G. D., & Peña, T. (2024). Collaborative memory: A selective review. In J. T. Wixted (Ed.), L. Mickes (Section ed.), *Learning and memory: A comprehensive reference* (Vol. IV: Memory & Cognition, 3rd ed.). Academic Press
- Rajaram, S., & Maswood, R. (2017). Collaborative memory: A selective review of data and theory. In J. H. Byrne (Ed.), *Learning and memory: A comprehensive reference* (2nd ed.). Oxford, UK: Elsevier.
- Rajaram, S., & Pereira-Pasarin, L. P. (2010). Collaborative memory: Cognitive research and theory. *Perspectives on Psychological Science*, 5(6), 649–663. <https://doi.org/10.1177/1745691610388763>
- Reysen, M. B., Bliss, H., & Baker, M. A. (2018). Survival processing eliminates collaborative inhibition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71(6), 1340–1347. <https://doi.org/10.1080/17470218.2017.1318408>
- Saraiva, M., Albuquerque, P. B., & Garrido, M. V. (2023). Collaborative inhibition effect: The role of memory task and retrieval method. *Psychological Research*, 87, 2548–2558. <https://doi.org/10.1007/s00426-023-01821-z>
- Shamay-Tsoory, S. G., Anna, M., Markus, A., & Bitan, T. (2025). Inter-brain coupling during language learning contributes to learning outcomes. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 20(1), nsaf045. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaf045>
- Song, X., Dong, M., Feng, K., Li, J., Hu, X., & Liu, T. (2024). Influence of interpersonal distance on collaborative performance in the joint Simon task—An fNIRS-based hyperscanning study. *NeuroImage*, 285, 120473. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120473>
- Stewart, D. D., Stewart, C. B., & Walden, J. (2007). Self-reference effect and the group-reference effect in the recall of shared and unshared information in nominal groups and interacting groups. *Group Processes & Intergroup Relations*, 10(3), 323–339. <https://doi.org/10.1177/1368430207078693>
- Sun, B., Xiao, W., Lin, S., Shao, Y., Li, W., & Zhang, W. (2021). Cooperation with partners of differing social

- experience: An fNIRS-based hyperscanning study. *Brain and Cognition*, 154, 105803.  
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2021.105803>
- Takahashi, M. (2007). Does collaborative remembering reduce false memories? *British Journal of Psychology*, 98(1), 1–13. <http://dx.doi.org/10.1348/000712606X101628>
- Tang, Y., Liu, X., Wang, C., Cao, M., Deng, S., Du, X., ... & Li, F. (2020). Different strategies, distinguished cooperation efficiency, and brain synchronization for couples: An fNIRS-based hyperscanning study. *Brain and Behavior*, 10(9), e01768. <https://doi.org/10.1002/brb3.1768>
- van Knippenberg, D. (2024). Team diversity and team performance: Paths to synergetic and disruptive effects. *Current Opinion in Psychology*, 59, 101877. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2024.101877>
- Vanlangendonck, F., Takashima, A., Willems, R. M., & Hagoort, P. (2018). Distinguishable memory retrieval networks for collaboratively and non-collaboratively learned information. *Neuropsychologia*, 111, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.12.008>
- Wang, Y., Dong, Y., Leuk, J. S. P., Zhai, X., Xu, C., Fu, Y., & Teo, W. P. (2024). The role of functional near-infrared spectroscopy in collaborative research: a systematic review. *Educational Psychology Review*, 36, 1. <https://doi.org/10.1007/s10648-023-09836-z>
- Weldon, M. S., & Bellinger, K. D. (1997). Collective memory: collaborative and individual processes in remembering. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23(5), 1160–1175. <https://doi.org/10.1037//0278-7393.23.5.1160>
- Wessel, I., Zandstra, A. R. E., Hengeveld, H. M., & Moulds, M. L. (2015). Collaborative recall of details of an emotional film. *Memory*, 23(3), 437–444. <http://dx.doi.org/10.1080/09658211.2014.895384>
- Whillock, S. R., Meade, M. L., Hutchison, K. A., & Tsosie, M. D. (2020). Collaborative inhibition in same-age and mixed-age dyads. *Psychology and Aging*, 35(7), 963–973. <http://dx.doi.org/10.1037/pag0000490>
- Xue, H., Lu, K., & Hao, N. (2018). Cooperation makes two less-creative individuals turn into a highly-creative pair. *NeuroImage*, 172, 527–537. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.02.007>
- Yin, Z., Xuan, B., Liu, C., Yi, J., Zheng, X., & Zhang, M. (2025). The influence of task and interpersonal interdependence on cooperative behavior and its neural mechanisms. *NPJ Science of Learning*, 10(1), 9. <https://doi.org/10.1038/s41539-025-00303-8>
- Zhang, M., Yin, Z., Zhang, X., Zhang, H., Bao, M., & Xuan, B. (2024). Neural mechanisms distinguishing two types of cooperative problem-solving approaches: An fNIRS hyperscanning study. *NeuroImage*, 291, 120587. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2024.120587>
- Zhang, Y., Ye, W., Yin, J., Wu, Q., Huang, Y., Hao, N., ... & Cai, D. (2024). Exploring the role of mutual prediction in inter-brain synchronization during competitive interactions: an fNIRS hyperscanning investigation. *Cerebral Cortex*, 34(1), 1–11. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad483>
- Zhou, S., Zhang, Y., Fu, Y., Wu, L., Li, X., Zhu, N., ... & Zhang, M. (2022). The effect of task performance and partnership on interpersonal brain synchrony during cooperation. *Brain Sciences*, 12(635), 1–10. <https://doi.org/10.3390/brainsci12050635>

# **The Impact of Differences in Collaborators' Encoding Levels on Collaborative Retrieval: An fNIRS Hyperscanning Study**

SUN Yaru, LI Bingbing, DUAN Yajie, HU Jinhui, HE Yang, CHEN Ning, LIU Wei

*(College of Psychology, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)*

## **Abstract**

Collaborative retrieval refers to the joint recovery of encoded information by two or more individuals through social interaction. Although this process typically yields collaborative inhibition relative to nominal groups, it concurrently generates a post-collaborative facilitation effect that enhances subsequent individual retention. While previous studies have highlighted encoding level as a crucial moderating factor, they have predominantly focused on group-level manipulations rather than on the effects of within-group encoding disparities. By incorporating functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), this study investigated how such disparities influence inter-brain synchrony (IBS) and directional neural coupling, thereby revealing the leadership–followership dynamics and information transfer patterns during collaboration.

A total of 160 university students participated in a single-factor between-participants experiment. The study manipulated the encoding composition of dyads across three conditions: differential encoding (semantic + perceptual), homogeneous high-level encoding (semantic + semantic), and homogeneous low-level encoding (perceptual + perceptual), while matched nominal groups served as controls. The experimental stimuli comprised 32 neutral, low-frequency, two-character words balanced for grammatical category and structure. The procedure involved four phases: an encoding phase, distraction task, collaborative (or individual) retrieval phase, and secondary individual retrieval phase. During the collaborative retrieval phase, fNIRS hyperscanning was employed to record neural activity. This study primarily focused on the prefrontal cortex and right temporoparietal junction.

The behavioral results indicated that, compared with nominal groups, homogeneous dyads exhibited collaborative inhibition, whereas differential dyads (semantic + perceptual) effectively eliminated this inhibition and enhanced post-collaborative individual retrieval, particularly benefiting perceptual encoders. In terms of neural activity, the results showed that differential

encoding strengthened IBS in the right middle frontal gyrus (BA10) and right angular gyrus (BA39), with this synchrony positively predicting post-collaborative retrieval accuracy. Granger causality results further revealed the directional characteristics of the IBS, demonstrating a significant information flow from semantic encoders to perceptual encoders in the differential condition. This suggests a leader–follower dynamic in which semantic encoders guided the retrieval process.

In summary, the present study demonstrated that differential encoding composition promotes deeper social interaction, effectively eliminating collaborative inhibition and fostering post-collaborative facilitation. Inter-brain synchrony serves as a critical neural mechanism underlying the establishment of a leader–follower dynamic, thereby facilitating the effective transfer of information from semantic to perceptual encoders. These results provide empirical support for the optimization of collaborative memory through within-group encoding disparities. This study offers a novel perspective on the role of encoding levels and contributes to a deeper understanding of complex social–cognitive processes from the perspective of interpersonal neuroscience.

**Keywords** collaborative memory, encoding level, differential encoding, collaborative inhibition, inter-brain synchrony

附录:

附表 1 近红外通道的空间定位

通道编号	MNI 坐标	通道起止	Brodmann 模板 (脑区占通道的百分比)*	LPBA40 模板 (脑区占通道的百分比)*
CH01	-54 40 0	F5-F7	45 - pars triangularis Broca's area, 0.72	L inferior frontal gyrus, 0.92
CH02	-46 46 24	F5-F3	45 - pars triangularis Broca's area, 0.65	L middle frontal gyrus, 0.94
CH03	-48 51 0	F5-AF7	46 - Dorsolateral prefrontal cortex, 0.93	L inferior frontal gyrus, 0.94
CH04	-34 58 25	AF3-F3	46 - Dorsolateral prefrontal cortex, 0.95	L middle frontal gyrus, 1
CH05	-36 64 4	AF3-AF7	10 - Frontopolar area, 0.82	L middle frontal gyrus, 0.77
CH06	-24 70 5	AF3-Fp1	10 - Frontopolar area, 0.71	L middle frontal gyrus, 0.98
CH07	-13 69 22	AF3-Afz	10 - Frontopolar area, 1	L superior frontal gyrus, 0.61
CH08	-12 73 -3	Fpz-Fp1	10 - Frontopolar area, 0.51	L superior frontal gyrus, 0.73
CH09	3 69 13	Fpz-Afz	10 - Frontopolar area, 1	R superior frontal gyrus, 0.56
CH10	14 73 3	Fpz-Fp2	10 - Frontopolar area, 0.5	R middle frontal gyrus, 0.78
CH11	16 69 23	AF4-Afz	10 - Frontopolar area, 1	R middle frontal gyrus, 0.80
CH12	29 69 5	AF4-Fp2	10 - Frontopolar area, 0.71	R middle frontal gyrus, 0.99
CH13	36 57 27	AF4-F4	46 - Dorsolateral prefrontal cortex, 0.95	R middle frontal gyrus, 1
CH14	39 64 4	AF4-AF8	10 - Frontopolar area, 0.81	R middle frontal gyrus, 0.65
CH15	49 44 25	F6-F4	45 - pars triangularis Broca's area, 0.81	R middle frontal gyrus, 0.56
CH16	50 51 1	F6-AF8	46 - Dorsolateral prefrontal cortex, 0.92	R inferior frontal gyrus, 0.98
CH17	57 38 1	F6-F8	45 - pars triangularis Broca's area, 0.83	R inferior frontal gyrus, 0.99
CH18	62 -52 44	CP4-CP6	40 - Supramarginal gyrus part of Wernicke's area, 0.73	R angular gyrus, 0.96
CH19	50 -65 52	CP4-P4	39 - Angular gyrus, part of Wernicke's area, 0.76	R angular gyrus, 1

CH20	57 -34 57	CP4-C4	40 - Supramarginal gyrus part of Wernicke's area, 0.43	R supramarginal gyrus, 0.88
CH21	59 -66 26	P6-CP6	39 - Angular gyrus, part of Wernicke's area, 0.83	R angular gyrus, 0.72
CH22	48 -77 36	P6-P4	39 - Angular gyrus, part of Wernicke's area, 0.69	R angular gyrus, 0.5
CH23	70 -36 28	C6-CP6	40 - Supramarginal gyrus part of Wernicke's area, 0.42	R supramarginal gyrus, 0.61
CH24	66 -20 44	C6-C4	1 - Primary Somatosensory Cortex, 0.55	R supramarginal gyrus, 0.98

注：\*每条近红外通道可能覆盖多个脑区。为节省空间，此处仅列出与近红外通道重合度最大的脑区。

附表 2 任务材料

名词（全左右结构）	动词（全左右结构）	名词（非全左右结构）	动词（非全左右结构）
肌肤	汲取	气垫	录用
枫叶	狂欢	生肖	卖艺
秘诀	补课	燕麦	品尝
堤坝	拔河	柔道	窃听
冰砖	拷打	金库	赛马
妖怪	标价	书签	违约
收据	收纳	芒果	奏乐
佳作	扼制	写真	哀叹