

• 研究方法(Research Method) •

近红外光学成像在社会认知神经科学中的应用*

叶佩霞¹ 朱睿达¹ 唐红红¹ 买晓琴² 刘超¹

(¹北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室, 北京 100875)

(²中国人民大学心理学系, 北京 100872)

摘要 社会认知神经科学是运用认知神经科学的研究手段, 探讨社会科学问题与理论的多学科交叉领域。近来, 功能性近红外光学成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)凭借生态效度高、成像安全、对头动耐受性高、成本低等优势, 成为了该领域新兴的热点技术。无论是在婴儿发育和社会经济决策的单脑研究中, 还是在人际互动的多脑研究中, 它都有广泛应用。未来近红外光学成像的应用可以向多脑神经反馈、脑机接口技术、设备无线化和多模态成像做进一步探索。

关键词 功能性近红外光学成像技术; 社会认知神经科学; 多人交互同步技术; 多脑研究

分类号 B845; B849:C91

1 引言

社会认知神经科学结合了认知神经科学的研究工具和社会科学的问题与理论, 是一个年轻又充满活力的多学科交叉领域。它致力于揭示传统行为经济学、社会心理学和政治科学所关心的人类认知过程及其背后的神经机制。无论对于个人还是社会群体而言, 该领域的探索和研究都具有重要意义(Lieberman, 2007)。在早期的几十年里, 社会认知神经科学研究受到方法技术的局限, 发展较为缓慢。功能神经影像学技术的出现, 给社会认知神经科学研究提供了重要机遇, 使得该领域的研究蓬勃开展(Adolphs, 2003)。

功能性近红外光学成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)作为重要的功能神经影像学技术之一, 已在国外得到了一定的关注与

应用。Jöbsis (1977)首次提出了它在人体应用的可能性。随后, Brazy 等人(1985)将其用于组织血氧变化情况的临床监测。1993 年, 它成为神经影像学领域的一种技术手段(Hoshi, 2005)。如今, 在 PubMed、Scopus 和 Web of Science 等数据库里, 以“fNIRS”作为关键词搜索可以发现, 近 5 年的相关文献数量已达到 842 篇左右, 其中有将近 45 篇相关的外文综述。

近年来, 国内一些研究者也已经注意到 fNIRS 的优势, 并使用该技术取得了一些研究成果。为促进这项技术的推广和应用, 本文先简要介绍了 fNIRS 技术的成像原理及与其他功能神经影像学技术对比下的优缺点。接着本文重点总结了 fNIRS 在社会认知神经科学中的一些具体的研究和应用。最后结合当下脑成像领域的研究热点提出 fNIRS 技术的运用前景。

2 fNIRS 的基本介绍

2.1 fNIRS 成像原理

放置在头皮上的多对光极构成了 fNIRS 的基本观测单元, 又叫做导或通道(channel)。每个观测单元有一个发射光极和一个接收光极, 近红外光(波长为 700~1300 nm)从发射光极发出, 穿过大脑组织衰减后由接收光极接收。近红外光穿透生物组

收稿日期: 2016-07-14

* 国家重点基础研究发展计划(2013CB837300)、国家自然科学基金(31170971, 31400888)、国家社科基金重大项目(12&ZD228)、北京市科学技术委员会资助计划(Z151100003915122)、中组部“万人计划”青年拔尖人才计划, CNLYB1212

通讯作者: 买晓琴, E-mail: maixq@ruc.edu.cn

刘超, E-mail: liuchao@bnu.edu.cn

织时具有低吸收率和低衰减性的特点,传播路径长度可以达到8 cm左右。相比之下,可见光(波长为450~700 nm)只能穿透不到1 cm的生物组织,这是fNIRS技术选取近红外光而非其他波长的光进行成像的主要原因。光在生物组织中的传播路径为半弧形,即光从发射光极发出到被接收光极接收,期间走过的光路形成了“香蕉形”通路(Kopton & Kenning, 2014)。光极间的距离越短,皮层外组织导致光衰减的效应越强,因此每对光极的距离一般不小于2.5~3 cm (Pellicer & del Carmen Bravo, 2011)。

与功能磁共振成像(Functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术的成像理念相同,基于神经血管耦合机制,fNIRS技术假设大脑皮层的血氧状态与局部的神经元活动之间存在联系,因此可以通过测量脑组织血红蛋白浓度变化,来观察大脑局部区域血流量的动态变化,间接获取到大脑的神经活动(Tong, Lindsey, & deB Frederick, 2011)。但与fMRI利用磁场获取信号的方式不同,近红外光在组织的散射传播过程中,光子被吸收导致光衰减,fNIRS利用这一特性计算出血氧变化情况。生物组织中吸收光子的化合物主要有红细胞的氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, O₂Hb)和脱氧血红蛋白(deoxygenated hemoglobin, HHb)两种。根据脑组织中O₂Hb、HHb以及水对各个波长光的吸收系数,选取波长在700~900 nm之间的近红外光研究认知功能,这个波长范围也被认为是生物学的“光学窗口”(Jöbsis, 1977)。由于O₂Hb和HHb的消光系数(extinction coefficient)不同,即被测对象对光的吸收能力不同,要同时计算出O₂Hb和HHb的浓度变化需要使用两个或多个不同波长(如695和830 nm)的光源。最后通过朗伯比尔定律(Beer-Lambert Law)量化方程,计算出光衰减的密度得到血红蛋白的浓度变化(Pellicer & del Carmen Bravo, 2011)。

2.2 与其他功能神经影像学技术相比的优势和局限性

fNIRS在社会认知神经科学领域的广泛应用,与它相较于其他功能神经影像学技术特有的优势紧密相关。在时间采样率方面,fMRI通常在0.3~0.6 Hz左右,而fNIRS的采样率可以达到10 Hz以上。在空间分辨率上,相较于脑电图(Electroencephalography, EEG),fNIRS的空间分辨率更高,可以到达厘米级。在成本方面,fMRI和

脑磁图(Magnetoencephalography, MEG)的设备昂贵,维护成本高;EEG的使用需要持续购买脑电图;相比之下,fNIRS设备价格较低且维护成本低。在使用灵活性方面,fMRI和MEG的使用需要固定的屏蔽室且仪器庞大,相对而言,fNIRS设备可移动,能够实现各种场合和地点的数据采集,可做长时间的床边监测。在身体移动所造成的噪音方面,fMRI、MEG和EEG技术都需要被试严格的保持身体静止,而fNIRS技术对被试的头动不敏感,这使得它的数据信噪比较高,对被试身体移动的容忍度更高。同时,该特点使得fNIRS在多人同时交互的研究中应用前景广泛。在创伤性研究方面,开颅光学成像技术的空间分辨率虽然高达80~100 μm ,能观察功能柱水平上的神经元对刺激的反应。但是手术需要打开不透明的硬脑膜来获得良好清晰的图像,长期实验中个体的皮层表面脑膜会再生长,毛细血管增生会加大出血风险,并且脑组织的意外感染可能导致死亡(Zepeda, Arias, & Sengpiel, 2004)。因此该技术一般应用在老鼠或猴子等动物的视觉等基本感知觉领域实验中,在人类上的应用只局限在如癫痫病人、脑出血或者中风患者等需要进行开颅手术的群体,难以广泛用于高级的认知和社会功能等研究,同时难以对比术前术后脑活动变化。相比于开颅光学成像技术,fNIRS技术的非侵入性使得该技术不仅更容易被被试所接受,也能够提供长时间的脑活动监测。

fNIRS也存在一些局限性:首先,血液动力学响应相对于神经元自发放电活动是一种慢信号,因此时间分辨率难以达到EEG的毫秒级。其次,空间分辨率相对于fMRI较低;光极探测深度在3 cm左右,无法探测到皮下组织和深部核团的大脑活动。定位需要利用颅骨参考点,要获得大脑具体的解剖信息必须与其他技术结合获得,如在头皮的光极探测点放置鱼肝油等物质进行核磁扫描获得精确的大脑结构信息,而这会大大提高实验的成本。最后,光信号穿过头发、头皮、颅骨、脑膜、脑脊液等介质后才能到达外皮质,因此难以获得纯净的关于大脑皮层的血氧活动浓度变化(Hoshi, 2005)。

3 fNIRS在社会神经科学领域的单脑研究

3.1 婴儿的大脑和心理发展

大脑和心理的常规发育轨迹已经在认知、发

展、教育、儿科和神经病学等多个领域进行研究,然而因为婴儿群体尚未发展言语能力和任务执行能力,传统心理学研究只能将面部表情、眼动、肌电和皮电等作为认知上的指标,许多大脑和心理发展问题处于未知的状态(Vanderwert & Nelson, 2014)。功能神经影像学技术的出现提供了婴儿在发育过程中大脑结构和功能改变的信息,有利于我们更好的了解婴儿大脑和心理的发展,诊断和预防发展性疾病。但各种功能神经影像学技术在婴儿领域存在不同的局限性。

fMRI 获取高质量的大脑结构像通常需要一次或多次扫描,每次平均时间大概为 4~8 分钟。这对于 4 岁及以上的儿童尚需要一些外在的指令、练习以及激励才能实现(Gabard-Durnam et al., 2014),对于年龄更小的婴儿来说几乎是不可能实现的。fMRI 在研究内容上通常是观察睡眠状态下的婴儿脑活动(Alcauter et al., 2014),少数几篇婴儿领域的 fMRI 研究是给一些如音调、言语、演讲以及非言语的真实声音等听觉刺激,来看婴儿的大脑活动(Blasi et al., 2011),但这些刺激在嘈杂的仪器噪声下,基线与真实状态是不同的。相较之下,fnIRS 成像技术的噪音小,这使得实验者可以在安静的背景环境中给被试呈现听觉刺激,并同时获得 O₂Hb 和 HHb 数据。fMRI 和 fnIRS 同样是采集脑部血液动力学响应信息,fnIRS 的时间采样率可高达几百赫兹,可以提供更完整的时间像(Lloyd-Fox, Blasi, & Elwell, 2010)。大部分的 EEG 研究集中于观察新生儿的睡眠状态(Geva, Yaron, & Kuint, 2016),还有一部分通过采集婴儿睡眠时异常的放电活动,来诊断患癫痫的可能性并进行早期干预(Glass, 2014; Nunes & da Costa, 2010; Shellhaas, 2015),也有 EEG 研究会清醒状态下的婴儿进行功能成像(Rigato, Farroni, & Johnson, 2009)。总而言之,EEG 或 fMRI 需要被试保持不动或被局限在一个狭小的空间里,不利于婴儿行为模式的观察和大脑数据的采集。

作为一项一问世就运用在监测临床新生儿大脑血氧变化的技术,fnIRS 具有以下优势:光学成像技术安全且无仪器噪音,更易为婴儿的监护人所接受;它可以灵活根据婴儿头骨发育情况来制作舒适度更高的光极帽;对头动的不敏感性使其能够监测清醒状态下的婴儿并获得信噪比较高的脑数据(Cristia et al., 2013);可做长时间的床边

监测,如对重症监护室的新生儿进行脑数据采集(Bozkurt, Rosen, Rosen, & Onaral, 2005)。

fnIRS 在婴儿群体上的应用范围十分广泛,包括视听觉、运动感觉、工作记忆和语言等。但在社会认知神经科学领域中,fnIRS 主要研究婴儿更加高级和社会性的认知和情绪。自我关联性,指的是婴儿对指向自己的交互或沟通行为中信号改变的敏感性。这种特性在 4 个月大(目前 fnIRS 技术在视觉社会感知方面能检测的最小年龄)的婴儿身上就已经体现出来(Grossmann et al., 2008)。Saito 等人(2007)发现,母亲以指向成人和指向婴儿这两种不同的阅读口吻给婴儿读相同的故事,指向婴儿的阅读方式在内侧前额叶处激活更强。这种自我关联信号,除了亲子特定的言语交流,还有眼神接触等方式,而婴儿是否对眼神接触有特异性激活,也被认为是在早期发育中,对是否存在自闭症发展倾向的一个可预测的警告信号(Elsabbagh et al., 2012)。共同参与,指婴儿在与人交流时,对彼此共享的外部客体或事件的敏感性。实验研究表明,5 个月大的婴儿的右侧前额叶,在共同注意条件下存在特异性激活(Grossmann & Johnson, 2010)。在面孔知觉方面,无论是在处理倒置和正置面孔还是处理规范和杂乱面孔上都观察到了右半球的颞叶优势效应(Honda et al., 2010; Otsuka et al., 2007)。在面部表情识别上,不同代价的情绪在大脑半球激活上存在差异。Nakato 等人(2011)发现 6.5 个月大的婴儿看快乐和愤怒的面部表情时,分别激活了颞叶皮层的左侧和右侧。表情识别能力可能在生命最初的第一年就已经产生。fnIRS 还可以研究清醒状态下婴儿在动作的观察、执行和理解上的发育情况。Lloyd-Fox 等人(2011)测量婴儿观看眨眼、张嘴闭嘴以及握拳的动作视频时,发现双侧额下回在眼部和手部运动条件下 O₂Hb 增加;Grossman 等研究者却发现婴儿在观看他人动作时额下回的 O₂Hb 并没有增加(Grossmann, Cross, Ticini, & Daum, 2013)。以上两项研究虽然结果有矛盾,但填补了动作的观察、执行和理解能力的发展空白,也是首次尝试用 fnIRS 技术测量婴儿镜像神经系统的激活情况。

3.2 社会经济决策

大部分为人熟知的关于社会经济决策的研究,通常是基于 fMRI 技术,以不同的经济学角度来研究决策的一系列过程。但它的低外部效度使许

多研究人员质疑它的适用性,即在这种局限的扫描环境下得到的研究结果,是否能真正反映被试的心理过程并进行推广(Ayaz et al., 2013; Shimokawa, Suzuki, Misawa, & Miyagawa, 2009)。

fMRI 研究需要被试躺在核磁舱里接受扫描,所以目前为止的神经经济学研究主要采用“虚构”任务,并不能反映“真实世界”的情况(Ariely & Berns, 2010)。fNIRS 技术则可以尽可能地模拟真实环境中的经济决策过程,考察人们在博弈和风险决策中的大脑活动。已经有相当一部分的研究使用 fNIRS 技术,来研究经济学领域中经典的范式,从而揭示其背后的神经机制。爱荷华博弈任务在临床上,被用于考查药物滥用、病理性赌博、强迫症、精神分裂症等患者的决策能力是否受损。一些研究者质疑将任务的失败作为患者决策能力受损的诊断标准是不合理的,认为还可能与其他因素有关。Suhr 和 Hammers (2010)使用 fNIRS 技术测查了健康被试在爱荷华任务中的行为表现,并且测查了负性情绪、智力、个性、执行能力等因素。结果发现:与大脑的执行功能和工作记忆能力相关的额叶的激活,与任务的成功与否紧密相关。这表明爱荷华任务考察的是被试的执行能力和工作记忆能力,任务失败是否能作为临床上诊断病理性决策的标准,需要进一步综合其他指标进行慎重考虑。Holper 和 Murphy (2014)考查与皮电技术结合的主客观风险决策游戏的神经机制。实验任务为哥伦比亚纸牌游戏,被试需要在一系列风险逐步增加变大的选项中,选择合适停止的时机使得获得的收益最大。结果发现寻求冒险的个体的内侧前额叶,对于高风险选项激活提高,对于低风险选项激活降低,反映了个体对风险的主观价值判断。此外, Holper, Wolf 和 Tobler 等人同年发现,在决策阶段, fNIRS 记录到的血氧活动与皮电反应对于不同风险的选项激活呈相反模式,而在结果阶段两种手段没有显著的差异。这项研究表明 fNIRS 在外侧前额叶处测量到的血氧活动反映了个体对于风险的主观价值,而皮电记录到的反应更多的反映了个体对风险的客观评估。

fMRI 研究由于扫描成本大,通常被试样本量较小,不太适用于性别差异研究。Cazzelli 等人(2012)使用 fNIRS 技术,探究在气球模拟风险决策游戏中,前额叶皮层血氧活动的性别差异。与 Rao 等人(2008)相同游戏范式中的性别差异的结

果一致,发现女性与男性相比,双侧背外侧前额叶皮层激活显著增强。这项研究表明:使用 fNIRS 研究神经机制上的性别差异是切实可行的,而且成本更低,使用更加方便。

基于上述研究结果可以发现, fNIRS 的高生态效度不仅可以衡量自然状态下更接近真实的经济决策过程,还可以与其他技术手段结合,提供更丰富全面的信息。同时,对于考查性别差异等需要大样本的研究来说, fNIRS 结果更可靠,也更经济方便。

4 fNIRS 在社会神经科学领域的多脑研究

传统神经影像学技术对社会交互的研究主要集中于“离线”的社会认知,在“伪交互”的情境下记录单个被试的大脑活动。然而,人类大部分的社会交互是“在线”形式的信息传递,这种社会交互的效应不能被认为是社会认知中单一大脑的效应简单相加之和(Scholkman, Holper, Wolf, & Wolf, 2013)。因此,我们需要研究实时的多人神经科学,同时获得多人关于行为和大脑两方面的数据。Montague 等 (2002)提出了多人交互同步技术(hyperscanning)这一概念,即在人类行为实验的执行过程中,同时记录下交互过程中的大脑活动数据。多人交互同步技术的出现使我们能够探索多人交互的神经机制。

4.1 其他功能神经影像学技术在双脑研究上的局限性

Montague 等人将两台 fMRI 扫描仪通过互联网连接在一起,研究简单社会交互过程中个体的脑活动。这项研究中的被试无法看到也无法听到对方,只通过简单的按键来感知对方的行为并给出反馈。随后,研究者基于这种方法开展了一系列信任游戏的 fMRI 研究(Chiu et al., 2008; King-Casas et al., 2005; Tomlin et al., 2006)。基于 fMRI 的双脑研究可以很好的将行为和背后的脑机制联系在一起,但是这些研究大多通过录像传输实时的画面,或者直接用两台 fMRI 仪器通过互联网连接进行交互活动。面对面交流在现实生活中比录像或网络的消息传输更具有广泛性和真实性。一些 fMRI 的双脑研究将两名被试固定在一个核磁舱内进行面对面互动(Lee, Dai, & Jones, 2012),这种近距离下被强制要求与对方面对面的做法对于大多数被试,尤其是相互陌生的被

试,是极其不自然的。

EEG 技术已经开展了一些双脑研究,包括研究囚徒困境范式下的皮层活动(Astolfi et al., 2009, 2010)、决策过程的脑间因果关系对结果的预测(De Vico Fallani et al., 2010)、自发性的非言语交流和协调活动的脑活动(Dumas, Nadel, Soussignan, Martinerie, & Garnero, 2010)以及乐器合奏时的神经活动(Lindenberger, Li, Gruber, & Müller, 2009)等。上述研究被试都在同一个房间里,可以进行直接的眼神交流。一些研究使用 MEG 技术研究双脑互动:通过互联网以及通话设备同步言语交流(Baess et al., 2012);研究母子进行面部表情交流时的大脑同步性(Hirata et al., 2014)。基于 EEG 和 MEG 技术的双脑研究探测到的是神经的电信号,毫秒级的高时间分辨率可以将不同频段的波长区分开来,适用于快速的社会交互形式。在真实社会互动中,这两种技术无法定位神经信号的来源,并且对头动的敏感性会使得采集到的数据信噪比低。

fNIRS 技术在一定程度上弥补了其他技术手段在研究社会交互中的局限性。基于 fNIRS 的多脑研究具有很高的生态效度,被试间可进行面对面交流,如言语沟通、社会决策、合作竞争等一系列双人及多人的真实社会交互过程,不必局限于核磁舱的扫描环境或受仪器噪声的干扰,同时可达到脑电技术难以做到的大脑外皮层上厘米级的空间分辨率。近年来随着研究者们的推动,基于 fNIRS 的多人同步交互技术的研究开始探索多人互动的认知神经科学。

4.2 双脑交互

4.2.1 合作、竞争的互动研究

Funane 等人(2011)首次将 fNIRS 多人交互同步技术应用于研究中。被试随机配对后,面对面执行倒计时按键任务,并同步记录大脑数据。结果表明两人按键的时间间隔越短,脑间活动同步性越高。这说明双人脑间的同步模式与双方在合作任务下的行为表现相关。Cui 等人(2012)考查被试在合作和竞争这两种实验条件下,按键反应的脑间活动同步性,发现合作条件下,右上额叶皮层的血氧反应增加,且合作表现越好,脑间活动同步性越高。上述研究揭示了合作表现与脑间活动同步性的特殊关系。Dommer, Jäger, Scholkmann, Wolf 和 Holper (2012)采取双向 n-back 任务来看合

作条件下的脑间活动同步性。结果发现双人交互条件相对于个体独立完成任务的条件,前额叶皮层低频率段(约 0.1 Hz)的同步性显著增加。Cordes 等人(2000)发现低频范围内的功能连接网络反映出自发的神经活动,低频脑间活动同步性代表了协调行为以一种合作的方式来进行。这在一定程度说明了额叶的低频脑间活动在合作中发挥重要的作用。刘涛等研究者同时测量成对被试双侧额下回和顶下小叶的神经活动,研究非即时轮流人际互动的神经机制。实验中被试分别担当游戏的建造者和搭档,建造者需将给定的圆盘图形复制出来,而搭档的任务是帮助他达成目标(合作条件)或阻碍他达成目标(竞争条件)。结果发现脑间活动同步性在竞争条件下比合作条件更强。这可能是由于竞争会使搭档根据建造者的圆盘操作来积极调整自己的策略,而合作可能导致消极跟随建造者的选择,反而同步性更弱(Liu, Saito, & Oi, 2015)。

关于合作伙伴的性别因素是否会影响脑间活动的同步性,目前已有两篇 fNIRS 的双脑研究来探讨“男女搭配干活不累”的科学依据。国内研究者 Cheng 等人(2015)发现异性合作条件下,面对面执行倒计时按键任务时,双方额叶的脑间活动同步性出现了任务相关,而同性合作条件下则没有这种相关性。Baker 等人(2016)在同样的范式下考查合作伙伴的性别因素是否会影响脑间活动的同步性,结果发现,同性别男性组和不同性别组行为表现显著高于同性别女性组,而同性别女性组的脑区同步性在右侧颞叶区,同性别男性组则在右下额叶皮质,异性合作未发现脑区同步性。

4.2.2 模仿、意图推断的互动研究

人们在真实社会互动中会往往涉及到模仿与意图推断,比如模仿他人的动作、神态、语言,在互动中对他人的意图进行推断,预测他人的行为,并不断调整自己的行为以建立更好的互动关系等。

在模仿他人运动的任务下,相对于控制条件(自行执行按键任务),被试在模仿任务中左侧额叶脑间活动同步性增加,且在有外部节奏辅助下比无节奏辅助同步性更弱。Holper 等人认为单纯的运动相似性并不能增加脑间活动同步性,只有社会交互真正产生时双脑的活动模式才会表现出一致性(Holper, Scholkmann, & Wolf, 2012)。在最后通牒游戏范式中,对比陌生人在面对面交流和隔板交流时的行为和大脑活动,发现面对面交流

不仅能促进合作行为的整性决策和收益,而且互动过程中,双方大脑的右侧颞顶联合区在面对面交流时脑间活动同步性显著增强。这说明在日常生活中,人与人之间的相互作用受意图的不确定性影响,而面对面交流通过提供外部可见的线索,如面部表情或肢体语言,减少这种不确定性,促进意图共享、合作决策的信念和实际合作行为(Tang et al., 2015)。

另一项研究将孩之宝层层叠(Hasbro's Jenga)游戏应用到实验情景中。该游戏是一种面对面口头沟通以及采用非电脑操作的多人益智类游戏,被广泛应用于社会心理学、社交障碍孩童的心理健康教育等研究中。实验者设计了三种实验条件:完全合作、平行游戏、阻碍性交互(让对方更快的失败)。结果表明,被试在完全合作和阻碍性交互这两种条件下,右侧额中回和额上回有强烈的脑间活动同步性,而这种同步性在对话阶段和平行游戏条件并未出现。这表明该脑区与目标导向的社会交互行为紧密相关;而背内侧前额叶皮层只在合作条件下出现脑间同步性,表明该脑区参与了使用心理理论进行意图推断的合作性社会交互加工(Liu et al., 2016)。

4.2.3 言语交流的互动研究

Jiang 等人(2012)的研究发现对话能够增加脑间活动同步性,研究中被试使用不同的沟通方式一面对面的对话、背靠背的对话、面对面的独白、背靠背的独白。被试通过以上4种方式讨论两个热点的新闻话题,结果发现只有在面对面的对话状态下左侧额下回脑间同步性显著增加。此外,额下回的同步性可以准确预测轮流说话和肢体语言等非言语交际行为的产生。目光注视交流在合作任务中对脑间联系的影响研究发现,只在目光注视条件下,成对被试右侧额下回脑间活动同步性增强(Osaka, Minamoto, Yaoi, Azuma, & Osaka, 2014)。随后2015年在双人面对面和面对墙唱歌时的研究中发现,面对面唱歌下大脑的活动同步性增强(Osaka et al., 2015)。对比蒋静等人的研究(Jiang et al., 2012),可以发现不同于言语对话在左半球的脑间同步性,非言语的如哼曲的脑间同步性在右半球。Holper 等人(2013)使用fNIRS技术研究双人经典教学活动—苏格拉底式对话,发现成功实现知识迁移的比没有实现知识迁移的激活更小,而对教师和学生脑间活动的相关分析发

现,成功的教育对话是双方以一致的节奏沟通。这是第一篇同时测量教师和学生双脑活动的研究,也推动了对复杂教学交互的脑网络的探索。

4.3 多脑交互

随着双人交互脑研究的进行,一些研究者开始使用MRI手段和EEG手段来共同测量多人(3~5人左右)交互过程,致力于探索脑成像技术在群体脑网络构建上的应用,推动了认知神经科学由双脑向多脑发展。

对该扩展的第一个尝试是测量群体在共同观看电影时的大脑活动。不同研究者使用fMRI技术做了一系列相关研究(Hasson, Furman, Clark, Dudai, & Davachi, 2008; Hasson, Nir, Levy, Fuhrmann, & Malach, 2004; Kauppi, Jääskeläinen, Sams, & Tohka, 2010),以多脑的角度去看待共同刺激下的脑间相关性。然而这类研究中,被试仍旧独立地躺在核磁舱里,并不存在直接的眼神、言语或者其他形式的交流,因而并不能真正体现多人互动中的神经机制。随后,一些研究者尝试用EEG技术探索多人交互的神经机制。在合奏乐曲时,使用EEG设备同步记录下4名专业的萨克斯管吹奏者的脑电活动,并且采集他们的声音、图像、眼电和肌电。结果发现8~12 Hz的阿尔法波段与音乐体验紧密联系(Balconi, Bortolotti, & Gonzaga, 2011)。随后Babiloni 等人在2012年发现该波段与共情也存在联系(Babiloni et al., 2012)。与EEG在双脑应用上的局限性一致,虽然在严格训练下数据的信噪比有所提高,但对头动的敏感性仍然需要大量的后期数据处理步骤,数据容易失真,并且对加工单人行为或多人共同行为的相应大脑区域难以定位。

近来,一些研究者开始基于fNIRS多人交互技术研究多人交互行为。Jiang 等人(2015)在三人无领导讨论小组的对话过程中,研究领导角色出现的外在行为指标和神经活动,结果发现左侧颞顶联合脑区,在领导与跟随者上的脑间活动同步性高于追随者相互之间的同步性,行为上领导与跟随者比追随者间沟通的频率更高,这种同步性与沟通上的技巧和能力呈正相关,并且在任务完成一半前就可以预测领导的出现。研究结果表明领导出现是因为他们能够在正确的时间说正确的事情。Nozawa 等人(2016)要求被试4人一组参加单词接龙游戏,要求第二个被试说的单词必须要

与前一个被试说出的单词最后两个音节一样,任务要求相互合作使得产生的单词链尽可能的长。该任务与日常生活中的创造性小组会议相似,没有经验或专业知识上的限制,被试之间只有相互揣测对方的思想和知识,才能成功的进行这项任务。研究结果不仅证明了面对面交流会提高额极的脑间神经同步性,还发现脑间同步性受时间调制,这表明了 fNIRS 技术时间采样率上相对于 fMRI 技术的优势。

多人交互的信息交换过程比双人交互更复杂。为了描述群体社会交互过程的特性,段炼等人提出了“群体脑网络成像”的概念,这是一种基于图论和网络理论的多脑建模方法。实验同时采集九人在击鼓任务下的大脑活动并进行建模分析,验证了 fNIRS 创建高生态效度的社会交互情境的切实可行性(Duan et al., 2015)。该项研究中运用了多台设备采集大脑数据,包括采用频分复用系统的 ETG-4000 设备和时分复用系统的 LABNIRS 设备,不同设备由于系统差异导致采样率上存在差异。通过 ETG-4000 采集的数据的时间采样率为 10 Hz,而通过 LABNIRS 采集到的数据的时间采样率可达 55.5 Hz。不同设备采集到的数据采样率不同的问题,可通过线下预处理如下采样的方式得到解决。

5 研究展望

尽管如此, fNIRS 在该领域的应用仍处于初步发展阶段。未来,研究者在完善现有研究的基础上,可以从以下几个方面开展研究。

基于 fNIRS 的神经反馈成为临床治疗方向上的研究前沿。神经反馈技术将大脑活动实时反馈给个体,以实现个体对大脑功能的自我管理。而 fNIRS 技术可以将神经反馈的治疗研究扩展到双脑或多脑的维度上。Duan 等人(2013)首次提出了脑间神经反馈技术这一概念,提出可以通过研究多人脑间同步性和人类社会互动行为表现的关系来搭建实验平台,为探索人类社交行为的神经机制提供新见解。2014 年,作者所在研究组以双脑神经反馈为例,建立了基于单台 fNIRS 的高生态效度双脑神经反馈平台(刘伟杰等, 2014)。这为孤独症、社交焦虑症、自闭症等社交障碍类疾病开辟了治疗新方向。不仅如此,将该技术与多人互动研究相结合,能更为广泛地应用于构建和谐

人际关系、提高团队合作能力、揭示组织行为学领域的大脑加工机制。

脑机接口(brain-computer interface, BCI)通过人类大脑的原始神经信号与外部设备间建立直接通路,从而控制外部应用程序或工具。大多数当前的 BCI 系统依赖脑电图采集到的神经电信号,然而由于脑电图信号存在固有噪声和非线性的特点,研究者尝试探索一种可以更加直接测量大脑的技术,来实现对输出设备的控制。fNIRS 技术采集到的信号具有高信噪比和高空间分辨率的特点,使其被认为是一个替代脑电图信号的可能手段(Naseer & Hong, 2015)。基于近红外的脑机接口技术正在尝试为用户提供一些不同于大脑传统传输的通道,如神经系统和肌肉的联结通道,能够帮助一些由于生理缺陷在生活上不能自理的人群,这项技术的开发在临床上有重要意义。

近年来由于传统近红外设备使用的光纤束过于沉重、灵活性有限以及可能会引发佩戴时的不适感(尤其是对临床病人来说),多通道可穿戴或无线系统近红外设备的出现使得测量更舒适(Ferrari & Quaresima, 2012)。fNIRS 设备倾向于小型化、无线化发展,可用于运动医学和运动生理学上对大脑或肌肉血氧活动的监测。在这一技术开发的新倾向下,具体的研究已经开展起来,包括模拟的汽车加速和减速过程中的大脑额叶激活情况(Yoshino, Oka, Yamamoto, Takahashi, & Kato, 2013a)、高速公路模拟曲线驾驶(Oka et al., 2015)、青少年模拟驾驶(Foy, Runham, & Chapman, 2016)、实际公路中驾驶的前额叶激活情况(Yoshino, Oka, Yamamoto, Takahashi, & Kato, 2013b)、户外骑行运动皮层的大脑激活情况(Piper et al., 2014)等。这些研究结果表明:新型的无线可移动近红外设备不仅外部效度高,而且进一步扩大社会认知神经科学研究对象的覆盖面,来研究人们的日常生活。

目前的脑成像技术有多种手段,不同手段对大脑数据的共同采集被称为多模态成像研究。一方面,对同一研究问题的不同模态数据进行相互比较,可证明在某些研究领域新的技术手段的有效性。fNIRS 技术与 fMRI 技术同步记录验证了前者在静息态功能连接上的效度(Duan, Zhang, & Zhu, 2012)。另一方面,多模态成像可提供较全面的有关研究社会神经科学领域的神经机制信息。在该领域, fNIRS 作为光学成像技术,与 fMRI、

EEG/ERP、MEG、TMS 和 tDCS 等技术兼容,是多模态成像研究的理想技术。举例来说,它与 fMRI 同时测量,可分离 fNIRS 技术皮层深浅不同的信号,来提高该技术的信效度(Funane et al., 2015); 与 EEG 结合,来分类听觉和视觉的感知过程(Putze et al., 2014); 与 tDCS 结合,为 tDCS 的临床疗效提供评估,从而指导运动康复(McKendrick, Parasuraman, & Ayaz, 2015)等。

参考文献

- 刘伟杰, 段炼, 戴瑞娜, 肖翔, 李征, 黄宇霞, ... 朱朝喆. (2014). 高生态效度的双脑神经反馈平台. *中国生物医学工程学报*, 33, 652–658.
- Adolphs, R. (2003). Cognitive neuroscience of human social behaviour. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 165–178.
- Alcauter, S., Lin, W. L., Smith, J. K., Short, S. J., Goldman, B. D., Reznick, J. S., ... Gao, W. (2014). Development of thalamocortical connectivity during infancy and its cognitive correlations. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 34, 9067–9075.
- Ariely, D., & Berns, G. S. (2010). Neuromarketing: The hope and hype of neuroimaging in business. *Nature Reviews Neuroscience*, 11, 284–292.
- Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., De Vico Fallani, F., Salinari, S., Marciani, M. G., ... Babiloni, F. (2009). Estimation of the cortical activity from simultaneous multi-subject recordings during the prisoner's dilemma. In *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 1734–1737). Minneapolis, MN: IEEE.
- Astolfi, L., Cincotti, F., Mattia, D., De Vico Fallani, F., Salinari, S., Vecchiato, G., ... Babiloni, F. (2010). Imaging the social brain: Multi-subjects EEG recordings during the "Chicken's game". In *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 1734–1737). Buenos Aires: IEEE.
- Ayaz, H., Onaral, B., Izzetoglu, K., Shewokis, P. A., McKendrick, R., & Parasuraman, R. (2013). Continuous monitoring of brain dynamics with functional near infrared spectroscopy as a tool for neuroergonomic research: Empirical examples and a technological development. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 871.
- Babiloni, C., Buffo, P., Vecchio, F., Marzano, N., Del Percio, C., Spada, D., ... Perani, D. (2012). Brains "in concert": Frontal oscillatory alpha rhythms and empathy in professional musicians. *NeuroImage*, 60, 105–116.
- Baess, P., Zhdanov, A., Mandel, A., Parkkonen, L., Hirvenkari, L., Mäkelä, J. P., ... Hari, R. (2012). MEG dual scanning: A procedure to study real-time auditory interaction between two persons. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 83.
- 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, 26492.
- Balconi, M., Bortolotti, A., & Gonzaga, L. (2011). Emotional face recognition, EMG response, and medial prefrontal activity in empathic behaviour. *Neuroscience Research*, 71, 251–259.
- Blasi, A., Mercure, E., Lloyd-Fox, S., Thomson, A., Brammer, M., Sauter, D., ... Murphy, D. G. M. (2011). Early specialization for voice and emotion processing in the infant brain. *Current Biology*, 21, 1220–1224.
- Bozkurt, A., Rosen, A., Rosen, H., & Onaral, B. (2005). A portable near infrared spectroscopy system for bedside monitoring of newborn brain. *Biomedical Engineering Online*, 4, 29.
- Brazy, J. E., Lewis, D. V., Mitnick, M. H., & Jobsis vander Vliet, F. F. (1985). Noninvasive Monitoring of Cerebral Oxygenation in Preterm Infants: Preliminary Observations. *Pediatrics*, 75, 217–225.
- Cazzell, M., Li, L., Lin, Z.-J., Patel, S. J., & Liu, H. L. (2012). Comparison of neural correlates of risk decision making between genders: An exploratory fNIRS study of the balloon analogue risk task (BART). *NeuroImage*, 62, 1896–1911.
- Cheng, X. J., Li, X. C., & Hu, Y. (2015). Synchronous brain activity during cooperative exchange depends on gender of partner: A fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping*, 36, 2039–2048.
- Chiu, P. H., Kayali, M. A., Kishida, K. T., Tomlin, D., Klinger, L. G., Klinger, M. R., & Montague, P. R. (2008). Self responses along cingulate cortex reveal quantitative neural phenotype for high-functioning autism. *Neuron*, 57, 463–473.
- Cordes, D., Haughton, V. M., Arfanakis, K., Wendt, G. J., Turski, P. A., Moritz, C. H., ... Meyerand, M. E. (2000). Mapping functionally related regions of brain with functional connectivity MR imaging. *American Journal of Neuroradiology*, 21, 1636–1644.
- Cristia, A., Dupoux, E., Hakuno, Y., Lloyd-Fox, S., Schuetze, M., Kivits, J., ... Minagawa-Kawai, Y. (2013). An online database of infant functional near infrared spectroscopy studies: A community-augmented systematic review. *PLoS ONE*, 8, e58906.
- Cui, X., Bryant, D. M., & Reiss, A. L. (2012). NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *NeuroImage*, 59, 2430–2437.
- De Vico Fallani, F., Nicosia, V., Sinatra, R., Astolfi, L.,

- Cincotti, F., Mattia, D., ... Babiloni, F. (2010). Defecting or not defecting: How to “read” human behavior during cooperative games by EEG measurements. *PLoS ONE*, 5, e14187.
- Dommer, L., Jäger, N., Scholkmann, F., Wolf, M., & Holper, L. (2012). Between-brain coherence during joint n-back task performance: A two-person functional near-infrared spectroscopy study. *Behavioural Brain Research*, 234, 212–222.
- Duan, L., Dai, R. N., Xiao, X., Sun, P. P., Li, Z., & Zhu, C. Z. (2015). Cluster imaging of multi-brain networks (CIMBN): A general framework for hyperscanning and modeling a group of interacting brains. *Frontiers in Neuroscience*, 9, 267.
- Duan, L., Liu, W. J., Dai, R. N., Li, R., Lu, C. M., Huang, Y. X., & Zhu, C. Z. (2013). Cross-Brain Neurofeedback: Scientific Concept and Experimental Platform. *PLoS ONE*, 8, e64590.
- Duan, L., Zhang, Y. J., & Zhu, C. Z. (2012). Quantitative comparison of resting-state functional connectivity derived from fNIRS and fMRI: A simultaneous recording study. *NeuroImage*, 60, 2008–2018.
- Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *PLoS ONE*, 5, e12166.
- Elsabbagh, M., Mercure, E., Hudry, K., Chandler, S., Pasco, G., Charman, T., ... Johnson, M. H. (2012). Infant neural sensitivity to dynamic eye gaze is associated with later emerging autism. *Current Biology*, 22, 338–342.
- Ferrari, M., & Quaresima, V. (2012). A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *NeuroImage*, 63, 921–935.
- Foy, H. J., Runham, P., & Chapman, P. (2016). Prefrontal cortex activation and young driver behaviour: A fNIRS study. *PLoS ONE*, 11, e0156512.
- Funane, T., Kiguchi, M., Atsumori, H., Sato, H., Kubota, K., & Koizumi, H. (2011). Synchronous activity of two people's prefrontal cortices during a cooperative task measured by simultaneous near-infrared spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*, 16, 077011.
- Funane, T., Sato, H., Yahata, N., Takizawa, R., Nishimura, Y., Kinoshita, A., ... Kiguchi, M. (2015). Concurrent fNIRS-fMRI measurement to validate a method for separating deep and shallow fNIRS signals by using multidistance optodes. *NeuroPhotonics*, 2, 15003.
- Gabard-Durnam, L. J., Flannery, J., Goff, B., Gee, D. G., Humphreys, K. L., Telzer, E., ... Tottenham, N. (2014). The development of human amygdala functional connectivity at rest from 4 to 23 years: A cross-sectional study. *NeuroImage*, 95, 193–207.
- Geva, R., Yaron, H., & Kuint, J. (2016). Neonatal sleep predicts attention orienting and distractibility. *Journal of Attention Disorders*, 20, 138–150.
- Glass, H. C. (2014). Neonatal seizures: Advances in mechanisms and management. *Clinics in Perinatology*, 41, 177–190.
- Grossmann, T., Cross, E. S., Ticini, L. F., & Daum, M. M. (2013). Action observation in the infant brain: The role of body form and motion. *Social Neuroscience*, 8, 22–30.
- Grossmann, T., & Johnson, M. H. (2010). Selective prefrontal cortex responses to joint attention in early infancy. *Biology Letters*, 6, 540–543.
- Grossmann, T., Johnson, M. H., Lloyd-Fox, S., Blasi, A., Deligianni, F., Elwell, C., & Csibra, G. (2008). Early cortical specialization for face-to-face communication in human infants. *Proceedings: Biological Sciences*, 275, 2803–2811.
- Hasson, U., Furman, O., Clark, D., Dudai, Y., & Davachi, L. (2008). Enhanced intersubject correlations during movie viewing correlate with successful episodic encoding. *Neuron*, 57, 452–462.
- Hasson, U., Nir, Y., Levy, I., Fuhrmann, G., & Malach, R. (2004). Intersubject synchronization of cortical activity during natural vision. *Science*, 303, 1634–1640.
- Hirata, M., Ikeda, T., Kikuchi, M., Kimura, T., Hiraishi, H., Yoshimura, Y., & Asada, M. (2014). Hyperscanning MEG for understanding mother–child cerebral interactions. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 118.
- Holper, L., Goldin, A. P., Shalóm, D. E., Battro, A. M., Wolf, M., & Sigman, M. (2013). The teaching and the learning brain: A cortical hemodynamic marker of teacher-student interactions in the Socratic dialog. *International Journal of Educational Research*, 59, 1–10.
- Holper, L., & Murphy, R. O. (2014). Hemodynamic and affective correlates assessed during performance on the Columbia Card Task (CCT). *Brain Imaging and Behavior*, 8, 517–530.
- Holper, L., Scholkmann, F., & Wolf, M. (2012). Between-brain connectivity during imitation measured by fNIRS. *NeuroImage*, 63, 212–222.
- Holper, L., Wolf, M., & Tobler, P. N. (2014). Comparison of functional near-infrared spectroscopy and electrodermal activity in assessing objective versus subjective risk during risky financial decisions. *NeuroImage*, 84, 833–842.
- Honda, Y., Nakato, E., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Kojima, S., Yamaguchi, M. K., & Kakigi, R. (2010). How do infants perceive scrambled face?: A near-infrared spectroscopic study. *Brain Research*, 1308, 137–146.
- Hoshi, Y. (2005). Functional near-infrared spectroscopy: Potential and limitations in neuroimaging studies. *International Review of Neurobiology*, 66, 237–266.
- 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 of the United States of America*, 112, 4274–4279.
- Jiang, J., Dai, B. H., Peng, D. L., Zhu, C. Z., Liu, L., & Lu, C. M. (2012). Neural synchronization during face-to-face communication. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 32, 16064–16069.
- Jöbsis, F. F. (1977). Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 198, 1264–1267.
- Kauppi, J. -P., Jääskeläinen, I. P., Sams, M., & Tohka, J. (2010). Inter-subject correlation of brain hemodynamic responses during watching a movie: Localization in space and frequency. *Frontiers in Neuroinformatics*, 4, 5.
- King-Casas, B., Tomlin, D., Anen, C., Camerer, C. F., Quartz, S. R., & Montague P. R. (2005). Getting to know you: Reputation and trust in a two-person economic exchange. *Science*, 308, 78–83.
- Kopton, I. M., & Kenning, P. (2014). Near-infrared spectroscopy (NIRS) as a new tool for neuroeconomic research. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 549.
- Lee, R. F., Dai, W., & Jones, J. (2012). Decoupled circular-polarized dual-head volume coil pair for studying two interacting human brains with dyadic fMRI. *Magnetic Resonance in Medicine*, 68, 1087–1096.
- Lieberman, M. D. (2007). Social cognitive neuroscience: A review of core processes. *Annual Review of Psychology*, 58, 259–289.
- Lindenberger, U., Li, S. -C., Gruber, W., & Müller, V. (2009). Brains swinging in concert: Cortical phase synchronization while playing guitar. *BMC Neuroscience*, 10, 22.
- Liu, N., Mok, C., Witt, E. E., Pradhan, A. H., Chen, J. E., & Reiss, A. L. (2016). NIRS-based hyperscanning reveals inter-brain neural synchronization during cooperative Jenga game with face-to-face communication. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 82.
- Liu, T., Saito, H., & Oi, M. (2015). Role of the right inferior frontal gyrus in turn-based cooperation and competition: A near-infrared spectroscopy study. *Brain and Cognition*, 99, 17–23.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., & Elwell, C. E. (2010). Illuminating the developing brain: The past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34, 269–284.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., Everdell, N., Elwell, C. E., & Johnson, M. H. (2011). Selective cortical mapping of biological motion processing in young infants. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23, 2521–2532.
- McKendrick, R., Parasuraman, R., & Ayaz, H. (2015). Wearable functional near infrared spectroscopy (fNIRS) and transcranial direct current stimulation (tDCS): Expanding vistas for neurocognitive augmentation. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 27.
- Montague, P., Berns, G. S., Cohen, J. D., McClure, S. M., Pagnoni, G., Dhamala, M., ... Fisher, R. E. (2002). Hyperscanning: Simultaneous fMRI during linked social interactions. *NeuroImage*, 16, 1159–1164.
- Nakato, E., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Yamaguchi, M. K., & Kakigi, R. (2011). Distinct differences in the pattern of hemodynamic response to happy and angry facial expressions in infants-A near-infrared spectroscopic study. *NeuroImage*, 54, 1600–1606.
- Naseer, N., & Hong, K. -S. (2015). fNIRS-based brain-computer interfaces: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 3.
- Nozawa, T., Sasaki, Y., Sakaki, K., Yokoyama, R., & Kawashima, R. (2016). Interpersonal frontopolar neural synchronization in group communication: An exploration toward fNIRS hyperscanning of natural interactions. *NeuroImage*, 133, 484–497.
- Nunes, M. L., & da Costa, J. C. (2010). Sleep and epilepsy in neonates. *Sleep Medicine*, 11, 665–673.
- Oka, N., Yoshino, K., Yamamoto, K., Takahashi, H., Li, S. G., Sugimachi, T., ... Kato, T. (2015). Greater activity in the frontal cortex on left curves: A vector-based fNIRS study of left and right curve driving. *PLoS ONE*, 10, e0127594.
- Osaka, N., Minamoto, T., Yaoi, K., Azuma, M., & Osaka, M. (2014). Neural synchronization during cooperated humming: A hyperscanning study using fNIRS. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 126, 241–243.
- Osaka, N., Minamoto, T., Yaoi, K., Azuma, M., Shimada, Y. M., & Osaka, M. (2015). How two brains make one synchronized mind in the inferior frontal cortex: FNIRS-based hyperscanning during cooperative singing. *Frontiers in Psychology*, 6, 1811.
- Otsuka, Y., Nakato, E., Kanazawa, S., Yamaguchi, M. K., Watanabe, S., & Kakigi, R. (2007). Neural activation to upright and inverted faces in infants measured by near infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 34, 399–406.
- Pellicer, A., & del Carmen Bravo, M. (2011). Near-infrared spectroscopy: A methodology-focused review. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, 16, 42–49.
- Piper, S. K., Krueger, A., Koch, S. P., Mehnert, J., Habermehl, C., Steinbrink, J., ... Schmitz, C. H. (2014). A wearable multi-channel fNIRS system for brain imaging in freely moving subjects. *NeuroImage*, 85, 64–71.
- Putze, F., Hesslinger, S., Tse, C. Y., Huang, Y., Herff, C., Guan, C., & Schultz, T. (2014). Hybrid fNIRS-EEG based classification of auditory and visual perception processes. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 373.
- Rao, H. Y., Korczykowski, M., Pluta, J., Hoang, A., & Detre, J. A. (2008). Neural correlates of voluntary and

- involuntary risk taking in the human brain: An fMRI study of the balloon analog risk task (BART). *NeuroImage*, 42, 902–910.
- Rigato, S., Farroni, T., & Johnson, M. H. (2009). The shared signal hypothesis and neural responses to expressions and gaze in infants and adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 5, 88–97.
- Saito, Y., Aoyama, S., Kondo, T., Fukumoto, R., Konishi, N., Nakamura, K., ... Toshima, T. (2007). Frontal cerebral blood flow change associated with infant-directed speech. *Archives of Disease in Childhood. Fetal and Neonatal Edition*, 92, F113–F116.
- Scholkmann, F., Holper, L., Wolf, U., & Wolf, M. (2013). A new methodical approach in neuroscience: Assessing inter-personal brain coupling using functional near-infrared imaging (fNIRI) hyperscanning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 813.
- Shellhaas, R. A. (2015). Continuous long-term electroencephalography: The gold standard for neonatal seizure diagnosis. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, 20, 149–153.
- Shimokawa, T., Suzuki, K., Misawa, T., & Miyagawa, K. (2009). Predictability of investment behavior from brain information measured by functional near-infrared spectroscopy: A bayesian neural network model. *Neuroscience*, 161, 347–358.
- Suhr, J., & Hammers, D. (2010). Who fails the Iowa gambling test (IGT)? Personality, neuropsychological, and near-infrared spectroscopy findings in healthy young controls. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 25, 293–302.
- Tang, H., Mai, X., Wang, S., Zhu, C., Krueger, F., & Liu, C. (2015). Interpersonal brain synchronization in the right temporo-parietal junction during face-to-face economic exchange. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11, 23–32.
- Tomlin, D., Kayali, M. A., King-Casas, B., Anen, C., Camerer, C. F., Quartz, S. R., & Montague, P. R. (2006). Agent-specific responses in the cingulate cortex during economic exchanges. *Science*, 312, 1047–1050.
- Tong, Y. J., Lindsey, K. P., & deB Frederick, B. (2011). Partitioning of physiological noise signals in the brain with concurrent near-infrared spectroscopy and fMRI. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 31, 2352–2362.
- Vanderwert, R. E., & Nelson, C. A. (2014). The use of near-infrared spectroscopy in the study of typical and atypical development. *NeuroImage*, 85, 264–271.
- Yoshino, K., Oka, N., Yamamoto, K., Takahashi, H., & Kato, T. (2013a). Correlation of prefrontal cortical activation with changing vehicle speeds in actual driving: A vector-based functional near-infrared spectroscopy study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 895.
- Yoshino, K., Oka, N., Yamamoto, K., Takahashi, H., & Kato, T. (2013b). Functional brain imaging using near-infrared spectroscopy during actual driving on an expressway. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 882.
- Zepeda, A., Arias, C., & Sengpiel, F. (2004). Optical imaging of intrinsic signals: Recent developments in the methodology and its applications. *Journal of Neuroscience Methods*, 136, 1–21.

The application of functional near-infrared spectroscopy in social cognitive neuroscience

YE Peixia¹; ZHU Ruida¹; TANG Honghong¹; MAI Xiaoqin²; LIU Chao¹

(¹ State Key Laboratory of Cognitive Science and Learning, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(² Department of Psychology, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Social cognitive neuroscience is an interdisciplinary field that explores the theory and practice of social science with cognitive neuroscience research methods. Recently, functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) has become a hot technique used in social cognitive neuroscience for its advantage of high ecological validity, image security, high reliability and low cost. Currently, fNIRS is widely used in single brain research studying the neural mechanism of infant development, social economic decision-making and interpersonal interaction. In the future, it could be a very useful imaging tool in multi-brain research including neurofeedback, brain-computer interface, wireless equipment and multi-modality imaging.

Key words: functional near-infrared spectroscopy (fNIRS); social cognitive neuroscience; hyperscanning; multi-brain research