中国心理学前沿
2021 年 11 月第 3 卷第 11 期

功能性近红外光谱技术研究综述

崔 旸

上海师范大学教育学院心理系，上海

摘　要 | 近年来，新兴的脑功能成像技术—功能性近红外光谱（fNIRS），已运用于自然情境下的高级认、发展、异常心理学等多个心理学领域。本文从 fNIRS 的概念和原理出发，介绍了近红外光谱技术中的生理干扰和运动伪迹信号的处理方法、近几年心理学领域中的 fNIRS 的应用以及和其他成像技术的结合使用情况，最后讨论了功能性近红外光谱技术的优势和不足。

关键词 | 近红外光谱技术；噪声源；去噪方法；心理学；认知

1　引言

功能性近红外光谱技术（fNIRS）是一种测量大脑皮层神经元激活的血流动力学反应来研究人类大脑运作的非侵入性技术[1]，要了解 fNIRS，首先要了解它的基本原理。在认知神经活动过程中，大脑神经活动区域增加的脑血流所携带的氧大大超过大脑活动所需的氧，而氧通过血液中的血红蛋白进行传输，故而认知活动过程中大脑活动区域会出现血液中氧合血红蛋白（oxy -Hb ）浓度的上升，脱氧血红蛋白（deoxy -Hb ）浓度的下降。fNIRS 利用了近红外光谱的原理，近红外光谱分析基于以下事实：近红外光谱窗口（650–1000nm）下，人体组织对光相对透明；近红外光要么被色素化合物（色素团）吸收，要么分散在组织中；近红外光能够穿透人体组织，因为组织运输的主要因素是散射，其可能性通常是吸收的 100 倍左右；近红外光在组织中会因为微循环中位于毛细血管、小动脉、小静脉等小血管（直径 <1mm）内的主发色团血红蛋白导致相对较高的衰减[2]。含氧血红蛋 白（O2Hb）和脱氧 血 红 蛋 白（HHb）是血液中与氧代谢有关的物质，在近红外波区间内有吸收低、散射高的特性。近红外光可以通过组织，头皮和头骨传播几厘米，并通过探测器探测大脑内的氧合、脱氧和总血红蛋白的浓度。当

作者简介：崔旸，上海师范大学基础心理学硕士研究生，E-mail：694941297@qq.com。
文章引用：崔旸．功能性近红外光谱技术研究综述［J］．中国心理学前沿，2021，3（11）：1300–1306.
https://doi.org/10.35534/pc.0311148

近红外光照射到离探测器几厘米远的头皮上时，到达探测器的漫射光量的变化对应于光源和探测器之间下方组织光学性质的变化。被探测到的光的一部分已经对大脑进行了采样，从而提供了一种测量大脑血红蛋白浓度变化的方法[3]。

fNIRS 不仅能测量认知活动过程中的脱氧血红蛋白和氧合血红蛋白浓度的变化[4]，还能测量出认知活动过程中总体的血红蛋白以及脱氧细胞氧化酶的变化。在统计和报告中，常用的指标主要有三种：氧合血红蛋白浓度、脱氧血红蛋白浓度以及总体血红蛋白指数。

2　对其生理干扰和运动伪迹信号的处理方法

fNIRS 监测到的脑功能信号易受到生理活动和人的相对运动的干扰，分别称为生理干扰和运动伪迹，这些干扰的存在严重影响信号质量，因此需要开发消除生理干扰和运动伪迹的信号处理方法。

2.1　去除运动伪迹

2.1.1　方法

处理运动伪像的一般简便方法是通过获得足够多的试验来最小化伪迹的影响，并通过检测 fNIRS 测量中尺度的独特变化或违反信号的定义质量标准来简单地拒绝刺激试验[5]，而相位排斥不仅会减少可用的试验次数和血流动力学响应函数的对比噪声比，而且不可避免地会导致 fNIRS 信号中重要信息的丢失。

但在大多数实验情况下，试验的数量是有限的，并且存在多个运动伪迹是常见的，尤其是在具有挑战性的被试群体中。最近已经提出了许多校正运动伪影的方法，基于信号的空间特点的方法有主成分分析[6]、卡尔曼滤波[7]和 ICA[8]和基于时间特点的方法有小波变换[9]、样条插值法[7]。

尽管平滑方法（例如小波滤波）在消除运动引起的尖峰信号方面非常出色，但在进行此类滤波后，信号的基线偏移仍然存在。另一方面，样条插值之类的方法可以正确地校正基线偏移。但是，它们会留下残留的高频尖峰。Sahar 等人提出了一种利用不同校正算法的混合方法。该方法首先识别基线偏移，然后使用样条插值法或目标主成分分析对其进行校正。另一方面，其余的尖峰则通过平滑方法进行校正：Savitzky-Golay（SG）滤波或鲁棒的局部加权回归和平滑。并使用以下指标在血液动力学响应函数估计方面将的新方法与现有的校正算法进行了比较：均方误差，峰值误差（Ep），皮尔逊相关性（R2）和接收者操作者特征以下的面积曲线[10]。

2.1.2　方法对比

Robert 等人通过将模拟功能激活信号添加到 20 个包含运动伪影的真实 NIRS 数据集中，系统地比较了已有的 NIRS 运动校正技术的效用。使用恢复的模拟血液动力学响应函数（HRF）的准确性，将主成分分析，样条插值，小滤波分析和卡尔曼滤波方法相互比较，并与标准方法进行比较。与未进行校正和与过程相比，测试的四种运动校正技术均会显著降低均方误差（MSE），并显著的提高回收的 HRF 的对比度噪声比（CNR）。样条插值法产生的 MSE 平均减少量最大（55%），而小波分析产生的 CNR 的平均增加量最大（39%）。在此分析的基础上，建议常规应用运动校正技术（尤其是样条插值或小滤波分析），以最大限度地减少运动伪影对 fNIRS 数据的影响[11]。

https://doi.org/10.35534/pc.0311148

以上方法没有在实际功能数据上对其进行评估。Sabrina 等人基于实际功能数据比较这些运动校正技术对认知任务期间获取的实际功能数据的性能，这些功能数据要求参与者大声讲话，从而导致与血液动力学响应相关的低频、低振幅运动伪迹。为了比较这些方法的功效，得出了与血液动力学反应的生理学相关的客观指标。结果表明，校正运动伪迹总是比拒绝试验更好，并且小波滤波是纠正这种伪迹的最有效方法，在 93% 的概率下，减小了伪迹出现在曲线下方的面积。因此，结果支持以前的研究，表明小波滤波是校正 fNIRS 数据中的运动伪影的最有前途和最强大的技术[12]。

2.2 消除生理干扰

因为人体存活所必需的呼吸、心跳等行为是不可避免的，而上述生理噪声是血氧信号的重要噪声源，因此采用合适的去噪手段是非常必要的[33]。为了克服生理干扰的障碍，最常见的是恢复真实大脑信号，最简单的方法是通过对一定数量的获得性试验中的信号在时域中求平均值来进行块平均。Dommer 等人通过计算每个试验和受试者的 HBO 和 HHT 的时程平均值，通过块平均值获得的血红蛋白浓度变化。假定生理干扰与功能响应无关，并且综合的生理成分在相位上互不相同。此方法的主要缺点是有效记录的数量必须超过 50[13]。

另一种常用的方法是带通滤波。此方法可以消除 fNIRS 信号的心跳和高频成分（f>0.7Hz）。通过这种方式，可以仔细消除 fNIRS 测量中的较低频率干扰，因为呼吸和 Mayer 波的频带与功能响应的频带相同。该技术通常用于 fNIRS 研究中，以消除采集数据中的高（>0.7Hz）或极低（<0.1Hz）频率干扰。为了减少心率和呼吸活动的影响，Kaiser 等人使用了一个滤波器以去除 0.07–0.13Hz 和 0.2–0.4Hz 范围内的频率分量[14]。

短距离校正也是消除生理干扰的有效技术。短源 – 检测器距离法可测量大脑浅表皮肤的血流动力学变化，但较少反映出大脑的功能反应。Gagnon 等人[15]设计了一种新的短源 – 探测器装置，以测量皮肤上皮肤的系统性噪声头，并且该测量作为减少生理噪音和恢复诱发力的回归功能反应。短距离方法的重要因素是如何确定权重从长距离分离通道信号中减去参考通道信号的因素。

3 功能性近红外光谱技术在心理学研究中的运用

近年来，fNIRS 在心理学上的应用很广泛：例如，在运动心理学方面，Wanja 等人（2019）使用 fNIRS 来评估男性参与者在短跑开始时 lPFC 的脑氧合情况证实了短跑开始时需要自我控制[16]；白雪军等人（2019）探究了连续触点运动中障碍物对个体运动轨迹的影响，利用运动捕捉系统及近红外光谱脑成像技术监测大学生 在 有 、 无 障 碍 物 情 境 下 完 成 连 续 触 点 运 动 时 的运动 轨迹及大脑皮层活动。结果支持了物体可供性及计划再利用的观点，背外侧前额叶及布罗卡区岛盖部可能参与了这一加工的假设[17]。

发展心理学方面，Ferry 等人（2016）使用 fNIRS 发现新生儿阶段就已存在语音感知的序列位置效应。实验中让新生儿熟悉一个六音节的语音序列后，交换首尾音节比交换中间音节激活了更强的颞叶和额叶活动。这是由于当交换首尾音节时，新生儿将该序列识别为新序列，而交换中间音节时，新生儿仍将其识别为已熟悉的旧序列，表明新生儿对首尾音节的编码比中间音节更准确[18]。Chiara

Bulgarelli 等人（2019）使用 fNIRS 收集婴儿的静息状态数据来研究镜像自我认知与婴儿期自我意识之间的关系。研究假设：如果镜像自我识别涉及到自我意识，那些表现出镜像自我识别的幼儿，相对于那些还没有表现出镜像自我识别的幼儿，可能会表现出大脑额叶和颞顶叶区域之间功能性连接的增强。结果发现：识别者的额颞联系明显强于非识别者，支持了婴儿时期镜像自我识别和自我意识之间的假设关系 [19]。

决策心理学方面，张丹丹等人利用 fNIRS 探究了抑郁倾向对合作的影响，结果表明，抑郁群体在社会奖赏加工、冲突控制及心理理论脑区均存在功能性缺陷，为理解抑郁人群合作意愿下降提供了脑成像方面的证据 [20]。等人使用修改后的最后通牒博弈任务，探究了经济和道德决策中的性别差异和不公平处理。结果发现不利的报价与增加广泛的皮质激活有关。此外，还发现以牺牲他人为代价的有利的道德选择与右侧前额叶的激活有关。在经济任务中女性的 DLPFC 显著激活，在道德框架中男性的 DLPFC 显著激活 [21]。

4 fNIRS 与其他技术的结合应用

由于大脑活动可以提供多种生理信息，因此近年来开发了多种技术来研究来自不同神经生理机制的大脑信号。由于缺乏可以记录这些信号所产生信息的整个频谱的特定技术，因此在过去的十年中，对大脑状态的同时多模态研究越来越普遍 [22]。

4.1 fNIRS 与 EEG 的结合应用

脑电图（EEG）是利用头皮电极测量由大脑皮层表面上存在的神经元的电活动引起的电压波动 [23]。脑电图记录可提供较高的时间分辨率，同时具有相对较低的空间分辨率。脑电图还被认为对环境噪声敏感，容易被运动伪影破坏，这使得该技术难以在神经退行性疾病研究领域独立实施。fNIRS -EEG 系统的使用具有像独立式 EEG 一样的灵活性。两种方法的集成提供了有关大脑皮层的电和血液动力学代谢活动的信息，而没有电光干扰。 fNIRS 和 EEG 可以在非实验室环境中合并用于同时采集，而不会给患者带来严重不适 [24]。

4.2 fNIRS 与 fMRI 的结合应用

功能性磁共振成像（FMRI）其原理是利用磁振造影来测量神经元活动所引发的血液动力的改变。由于 fMRI 的非侵入性、没有辐射暴露问题的特点，使其得到了较为广泛的应用，从 1990 年代开始就在脑部功能定位领域占有一席之地。目前主要是运用在研究人及动物的脑或脊髓上。fMRI 和 fNIRS 分别通过血液氧合水平依赖性（fMRI–BOLD 增加）对比信号的变化以及氧合和脱氧血红蛋白的浓度间接测量大脑的功能活动，分别与神经元活动增加（即神经血管耦合）后局部脑血流量增加有关。

还有的研究者将两种结合手段再结合在一起应用在研究中。例如 Pouliot 等人利用 fMRI–EEG 结合技术用于对癫痫病灶的定位，再利用 fNIRS–EEG 结合技术，对氧合和脱氧血红蛋白进行测量。用于连续的患者监测，语言偏侧化和焦点定位 [25]。

https://doi.org/10.35534/pc.0311148

4.3 对不同非侵入性神经影像学方法的对比

由于每种神经影像学方法都有其自身的特征，特别是在空间和时间分辨率方面，因此以前的研究已经同时测量了运动和认知任务中两种模态的组合，并发现这些技术之间存在良好的关系。Muthalib 第一次确定三种非侵入性神经影像学方法（fNIRS，fMRI 和 EEG-EMG 相关性）之间的一致性，并发现，在简单和复杂的运动任务中，fNIRS，fMRI 和同时从 SMC1 收集的源水平 EEG 数据之间存在良好的时间相关性。无创神经影像技术同时监视由运动任务引起的生理变化的时间进程的能力可能被证明对于基础神经科学和临床应用的发展和优化都是非常有益的[26]。

5 fNIRS 的优势与不足

5.1 优势

与其他神经成像方法相比，近红外光谱有许多优点：灵活、易用、成本低、非侵入性，fNIRS 可以测量广泛的功能对比，如 HbO、HbR 和全血红蛋白（HbT）；fNIRS 具有较高的时间分辨率，使其能够研究神经激活时血流动力学响应的时间行为；它只需要一个紧凑的测量系统和对运动伪迹的稳健性，因此可以在日常工作、锻炼和康复期间对大脑进行研究[4]。不仅能实时监测脑区认知活动在自然情境中的情况，还可以同时与 EEG、fMRI、PET 等其他脑功能成像技术研究手段进行测量，还能用于对大量被试进行反复多次实验。

5.2 不足

任何事物都有两面性，fNIRS 的缺点是信号会因测量噪声和生理系统的干扰而被严重破坏。因此，在实验中需要仔细的统计分析来从近红外光谱数据中提取与神经元活动相关的信号。定位能力较差，探测深度也有限。空间分辨率较差，这些不足还有待在今后的研究中改进。

6 小结

近年来，利用功能性近红外光谱技术的研究越来越多的发表在国内外的期刊上，功能性近红外光谱技术在心理学研究中展现出明显的优势。其和其他技术的结合使用也更加全面、多角度的的帮助人们深入的了解大脑功能。在新生儿语言加工的研究、语言和认知发展、 认知切换能力等各个认知神经科学领域中都可以发现功能性近红外技术的应用。该技术还有待进一步的发展与完善，随着这项新技术的不断改进，其在心理学各领域的应用范围也将会不断扩大。

参考文献

[1] Kirilina E，Jelzow A，Heine A，et al. The physiological origin of task-evoked systemic artefacts in functional near infrared spectroscopy [J]. Neuroimage，2012，61 (1)：70-81.
[2] Ferrari M，Quaresima V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS)

development and fields of application [J] . Neuroimage，2012，63 (2) : 921-935.

[3] Boas D A，Elwell C E，Ferrari M，et al. Twenty years of functional near-infrared spectroscopy：introduction for the special issue [J] . Neuroimage，2014，85：1-5.

[4] 周嵩煜. 近红外光谱技术在药物分析中的应用 [J] . 中国药业，2010，19 (18) : 84-87.

[5] Piper S K，Krueger A，Koch S P，et al. A wearable multi-channel fNIRS system for brain imaging in freely moving subjects [J] . Neuroimage，2014，85：64-71.

[6] De Cheveigné A，Simon J Z. Denoising based on time-shift PCA [J] . Journal of neuroscience methods，2007，165 (2) : 297-305.

[7] Izzetoglu M，Chitrapu P，Bunce S，et al. Motion artifact cancellation in NIR spectroscopy using discrete Kalman filtering [J] . Biomedical engineering online，2010，9 (1) : 1-10.

[8] Hsu S H，Pion-Tonachini L，Palmer J，et al. Modeling brain dynamic state changes with adaptive mixture independent component analysis [J] . NeuroImage，2018，183：47-61.

[9] Molavi B，Dumont G A. Wavelet-based motion artifact removal for functional near-infrared spectroscopy [J] . Physiological measurement，2012，33 (2) : 259.

[10] Sahar Jahani，Seyed K，Setarehdan David A，et al. Boas Motion artifact detection and correction in functional near-infrared spectroscopy：a new hybrid method based on spline interpolation method and Savitzky-Golay filtering [J] . Neurophoton，2018，5 (1) .

[11] Cooper R J，Selb J，Gagnon L，et al. A systematic comparison of motion artifact correction techniques for functional near-infrared spectroscopy [J] . Front Neurosci，2012，6：147.

[12] Brigadoi S，Ceccherini L，Cutini S，et al. Motion artifacts in functional near-infrared spectroscopy：A comparison of motion correction techniques applied to real cognitive data [J] . Neuroimage，2014，85：181-191.

[13] Dommer L，Jäger N，Scholkmann F，et al. Between- brain coherence during joint n- back task performance：A two-person functional near-infrared spectroscopy study [J] . Behavioural Brain Research，2012，234 (6) : 212-222.

[14] Kaiser V，Bauernfeind G，Kreilinger A，et al. Cortical effects of user training in a motor imagery based brain-computer interface measured by fNIRS and EEG [J] . NeuroImage，2014，85 (5) : 432-444.

[15] Gagnon L，Yücel M A，Boas D A，et al. Further improvement in reducing superficial contamination in NIRS using double short separation measurements [J] . NeuroImage，2014，85 (1) : 127-135.

[16] Wolff W，Thürmer J L，Stadler K M，et al. Ready，set，go：Cortical hemodynamics during self-controlled sprint starts [J] . Psychology of Sport and Exercise，2019，41：21-28.

[17] 白学军，张琪涵，赵光，等. 连续触点运动中障碍物影响个体运动的认知神经机制 [J] . 心理与行为研究，2019，17 (2) : 145.

[18] Ferry A L，Fló A，Brusini P，et al. On the edge of language acquisition：Inherent constraints on encoding multisyllabic sequences in the neonate brain [J] . Developmental science，2016，19 (3) : 488-503.

[19] Bulgarelli C，Blasi A，CCJMD Klerk，et al. Fronto-temporoparietal connectivity and self-awareness in 18-month-olds：A resting state fNIRS study [J] . Developmental Cognitive Neuroscience，2019，38：100676.

[20] 张丹丹，王驹，赵君，等. 抑郁倾向对合作的影响：双人同步近红外脑成像研究 [J] . 心理学报，2020，52 (5) : 609.

https://doi.org/10.35534/pc.0311148

[21] Vanutelli M E，Meroni F，Fronda G，et al．Gender differences and unfairness processing during economic and moral decision–making：a fNIRS study [J]．Brain Sciences，2020，10（9）：647.
[22] Chiarelli A M，Zappasodi F，Di Pompeo F，et al．Simultaneous functional near–infrared spectroscopy and electroencephalography for monitoring of human brain activity and oxygenation：a review [J]．Neurophotonics，2017，4（4）：18.
[23] Liberson W T．Electroencephalography；review [J]．The American journal of psychiatry，1952，108（7）：508–511.
[24] Pinti P，Aichelburg C，Lind F，et al．Using Fiberless，Wearable fNIRS to Monitor Brain Activity in Real–world Cognitive Tasks [J]．Jove–Journal of Visualized Experiments，2015（106）.
[25] Pouliot P，Tremblay J，Robert M，et al．Nonlinear hemodynamic responses in human epilepsy：A multimodal analysis with fNIRS–EEG and fMRI–EEG [J]．Journal of neuroscience methods，2012，204（2）.
[26] Muthalib M，Anwar A R，Perrey S，et al．Multimodal integration of fNIRS，fMRI and EEG neuroimaging [J]．Clinical Neurophysiology，2013，124（10）：2060–2062.

A Review Of Functional Near-Infrared Spectroscopy

Cui Yang

Department of Psychology, School of Education, Shanghai Normal University, Shanghai

Abstract: Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) is a non-invasive technique for studying the operative organization of the human brain by measuring haemodynamic responses to neuronal activation in the cerebral cortex. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) has become an important research tool for exploring the neural mechanisms of psychology gradually. First, this article introduces the concepts and basic principles of functional near-infrared and technology, and introduces the processing methods of physiological interference and motion artifact signals in the near-infrared spectroscopy technology. Then, it briefly introduces the application of some functional near-infrared technology in the field of psychology and its combined use with other imaging technologies. Finally, the advantages and disadvantages of functional near-infrared technology are discussed.

Key words: Functional Near-Infrared Spectroscopy; Psychology; Cognition; Noise source; Denoising method