

引用格式: 乔惠婷, 杨力瑞, 武迪, 等. 近红外脑功能成像技术发展及应用趋势[J]. 前瞻科技, 2026, 5(1): 9-21; doi: 10.3981/j.issn.2097-0781.20260003.

QIAO Huiting, YANG Lirui, WU Di, et al. Development and application trends of functional near-infrared spectroscopy[J]. Science and Technology Foresight, 2026, 5(1): 9-21; doi: 10.3981/j.issn.2097-0781.20260003.

近红外脑功能成像技术发展及应用趋势

乔惠婷¹, 杨力瑞¹, 武迪¹, 胡守波¹, 汪待发^{1,2†}

1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100083

2. 丹阳慧创医疗设备有限公司, 丹阳 212300

摘要 近红外脑功能成像 (fNIRS) 作为一种新兴的无创神经影像技术, 凭借良好的便携性、抗运动/电磁干扰能力, 以及在时间分辨率与空间分辨率之间的优良平衡, 为实现自然状态下高分辨脑观察提供了重要的技术平台。近年来, 中国 fNIRS 科研及产业发展蓬勃, 不仅研制出自主知识产权的高端设备, 逐步打破国外技术垄断, 还极大推动了 fNIRS 在临床的广泛应用。文章从技术与应用两个维度, 综述了 fNIRS 的发展现状, 分析当前面临的问题与挑战, 展望未来发展趋势, 并从装备迭代升级、标准构建、脑机接口技术工程化和复合型人才培养 4 个方面提出发展建议, 以期推动该技术在中国脑科学研究和临床转化中的深度应用。

关键词 脑功能成像; 近红外; fNIRS; 大脑皮层

近 10 年来, 全世界多个主要经济体与科技强国, 包括美国、欧盟、日本和中国, 均相继发布了国家级的脑科学计划, 聚焦最尖端的科学和技术, 抢占脑科学的战略高地。作为国家战略科技前沿方向, 中国脑计划 (科技创新 2030—“脑科学与类脑研究”重大项目) 明确提出, 在探索脑认知原理的同时, 必须同步发展脑疾病诊疗技术与类脑智能技术^[1]。脑功能成像技术的发展为脑科学探索和脑疾病诊断评估提供了有效手段, 成为中国脑计划实施的重要基石, 其发展具有重要战略意义。

当前, 主流脑功能成像技术包括功能磁共振 (fMRI)、正电子发射断层成像 (PET)、脑电图 (EEG)、脑磁图 (MEG) 和近红外脑功能成像 (fNIRS) 等。其中, fMRI、PET 和 MEG 等设备体积庞大、成本高昂, 严格要求被试保持静止状态; EEG 虽相对轻便, 但空间分辨率低, 而且对于头动、眼动、电磁的干扰均非常敏感。相较而言, fNIRS 具有无创、无辐射、抗运动/电磁干扰能力强和时空分辨率均衡等突出优势, 可在自然状态下实现对大脑皮层活动的稳定检测, 被誉为“戴

收稿日期: 2026-01-21; 修回日期: 2026-02-26

资助项目: 江苏省科技厅科技重大专项 (BG2024025); 国家重大科研仪器研制项目 (81927804)

[†]通信作者

在头上的功能核磁”，为脑功能研究及脑疾病诊疗提供了新的技术路径。

中国《“十四五”国民健康规划》《“十四五”国家临床专科能力建设规划》均强调，需加强脑疾病的早期筛查与精准干预，发展创新诊疗技术。fNIRS 作为兼具科研与临床潜力的脑功能检测手段，不仅用于探索疾病早期生物标志物与神经机制，也为开展大规模筛查、实现疾病的早诊早治提供了可行方案，对提升脑健康保障能力、服务健康中国战略具有积极意义。

文章围绕 fNIRS 的发展及应用展开评述，剖析当前面临的问题与挑战，并从装备迭代升级、标准构建、脑机接口技术工程化和复合型人才培养 4 个方面提出相应建议，以期为推动该领域的研究与应用发展提供参考。

1 fNIRS 发展现状

1.1 成像原理

近红外脑功能成像技术，又称功能性近红外光谱技术，是一种基于光学原理的非侵入性脑功能成像技术，该技术利用波长介于 700~900 nm 的近红外光对生物组织具有较强穿透能力的特性，实现对大脑皮层功能活动的无损探测^[2]。近红外光从头皮表面入射后，在生物组织内发生多重散射，形成漫

射传播，从而穿透颅骨到达深度 15~20 mm 的皮层组织。在距光源一定距离（通常 2~3 cm）处放置探测器，可采集并测量携带了局部组织光学特性信息的出射光，每一对相邻的光源和探测器组成一个通道，实现对局部组织的探测^[3]。

在近红外光谱窗口内，组织对光的吸收主要来源于水、血红蛋白及少量内源性色素。基于神经-血管耦合机制，神经活动的变化会引起局部脑血流及血氧代谢的改变，表现为大脑皮层局部血红蛋白浓度及氧合状态的动态变化^[4]。在脑功能活动过程中，水和其他色素对近红外光的吸收基本保持稳定，因此血红蛋白被视为反映脑功能活动的主要吸收发色团^[5]。

通过测量出射光强的变化即可展现血红蛋白浓度的变化（图 1（a））。当局部血红蛋白浓度升高时，组织对近红外光的吸收增强，导致探测到的出射光强减小；反之，当局部血红蛋白浓度降低时，探测到的出射光强增大。血红蛋白主要以氧合血红蛋白（HbO）和脱氧血红蛋白（HbR）两种形式存在，二者在近红外光谱窗口内对不同波长的近红外光具有可区分的光吸收特性（图 1（b））。通过采用两个及以上波长的近红外光源，并结合修正的比尔-朗伯定律，可以定量计算局部脑组织中 HbO 浓度与 HbR 浓度的相对变化，从而间接表征大脑皮层的功能活动状态^[6]。

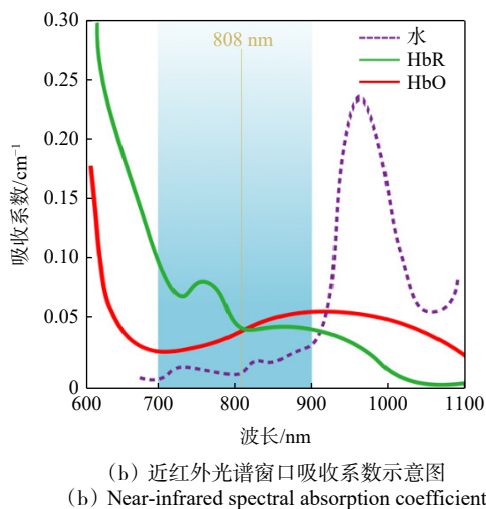
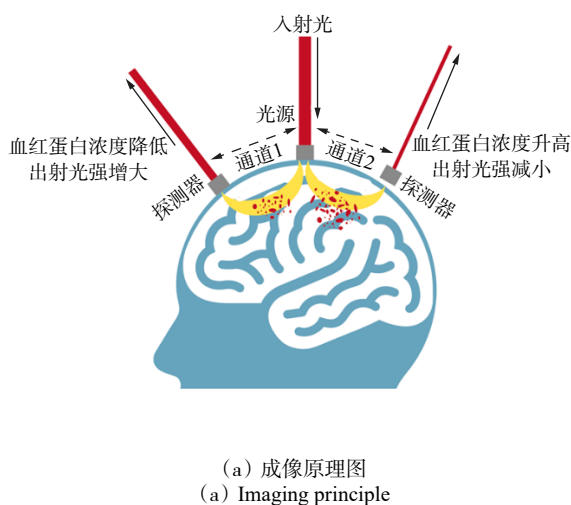


图 1 fNIRS 成像原理

Fig. 1 Principle of fNIRS

1.2 发展历程

近红外脑功能成像技术发展至今，经历了单通道检测、少量通道检测及多通道拓扑成像（图 2）等阶段。早期单通道系统主要用于血氧饱和度的监测。20 世纪 90 年代，研究证实了 fNIRS 用于监测脑功能活动的可行性^[7]。随着光学拓扑成像（Optical Topography, OT）、扩散光层析（Diffuse Optical Tomography, DOT）理论和技术的发展^[8]，fNIRS 逐渐发展成一种非侵入性光学脑功能成像技术。目前主流 fNIRS 可实现头皮下 1.5 cm 深度大脑皮层的实时探测，成像空间分辨率一般为 2~3 cm。

近 10 年，fNIRS 进入了快速发展阶段，主要体现在：通道数逐渐扩展到几十个甚至超百；实现了从局部脑区到全脑范围的覆盖；系统设计从实验室原型发展为实用化仪器并应用于临床；便携式与可穿戴式 fNIRS 的出现，进一步拓展了其在自然情境下的应用；与此同时，旨在提升成像质量实现高分辨率的高密度层析成像技术也在不断发展。在

成像模式方面，连续波成像（CW-fNIRS）技术因系统相对简单、成本较低而成为应用主流；能够提供更丰富组织光学特性信息（如散射系数、不同深度组织的光学特性）的频域成像（FD-fNIRS）和时域成像（TD-fNIRS）技术也在持续进步^[4]。这些先进的成像技术有望为实现更精确、更高空间分辨率的脑功能信息获取提供新的途径。

1.3 技术优势

相比现有脑成像技术，fNIRS 系统兼顾时空分辨率，在自然状态下高分辨脑功能成像应用方面有明显的独特优势。fNIRS 在检测参数、时空分辨率、抗运动/电磁干扰、应用环境及可移动性方面，与其他神经影像学方法的对比见表 1。

fNIRS 和 fMRI 均基于神经-血管耦合机制，通过检测神经活动引发的血流动力学变化来反映大脑功能状态，因此二者所测得的脑功能信号在空间分布和时间变化趋势上具有较高一致性。多项联合研究表明，fNIRS 测得的皮层 HbO、HbR 浓度相

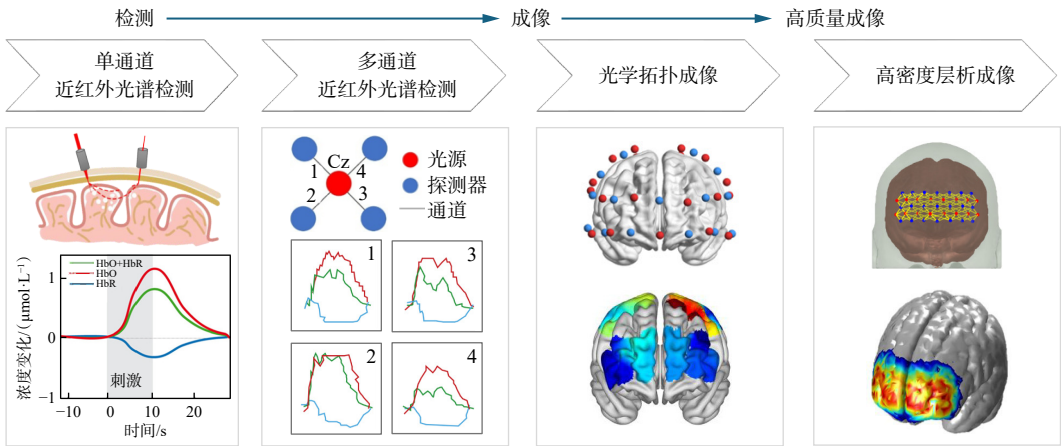


图 2 fNIRS 发展示意图
Fig. 2 Development of fNIRS

表 1 fNIRS 与其他神经影像学方法对比

Table 1 Comparison of fNIRS with other neuroimaging technologies

方法	检测参数	空间分辨率/mm	时间分辨率/Hz	抗运动干扰	抗电磁干扰	应用环境	可移动性
fMRI	血流动力学响应：BOLD信号	2~3	~2.0	弱	弱	专业成像室	—
PET	葡萄糖代谢	4	<0.1	弱	弱	专业成像室	—
EEG	神经电活动	60~90	>1 000.0	弱	弱	无电磁干扰	强
fNIRS	血流动力学响应：HbO/HbR	20~30	~10.0	强	强	无限制	强

对变化与 fMRI-BOLD 信号显著相关^[9]，因此 fNIRS 常被称为“戴在头上的功能核磁”。

fNIRS 在实用性方面具有一系列独特优势。fNIRS 系统成本相对较低，且设备易于实现便携化和可穿戴设计；基于光学探测，对头部运动和环境电磁干扰具有较好的耐受性，因此能够在实验室外相对复杂的环境中使用。更重要的是，fNIRS 不涉及电离辐射或强磁场，安全性高、兼容性强，特别适用于婴幼儿、老年人等特殊人群的长期或床旁监测^[10]。这些优势使得 fNIRS 为在自然情境下研究大脑功能提供了革命性的技术平台，fNIRS 允许在受试者自由运动、自然交流或康复治疗的同时，同步记录受试者脑功能活动，能够实现边运动边检测、边言语边检测、边干预边检测，从而实现了传统固定式、高约束性成像技术难以企及的研究范式。基于此，fNIRS 已成为探索真实世界中脑认知机制、推动脑疾病诊疗与开展康复研究不可或缺的重要工具。

1.4 关键技术

当前 fNIRS 已实现超百通道多脑区实时功能成像，以下关键技术在发展中起到了决定性作用。

1) 光源与波长选择

fNIRS 通常采用 LED 或激光器作为光源，产生波长介于 700~900 nm 的近红外光。在连续波成像系统中，光的探测深度主要取决于光源与探测器的间距，而与光源类型无直接关联。为区分 HbO、HbR 的浓度变化，系统通常配置两种特定波长的光源，选取分别位于 HbO、HbR 吸收谱等吸收点两侧的波长，利用不同波长对两种物质吸收的差异进行方程组求解^[6]。具体的波长选择将直接影响信号质量，通过优化光源波长组合可提升成像质量。此外，新型系统采用 3 种或更多波长^[11]，旨在获取更丰富的脑组织代谢信息，并有助于分离和校正生理噪声，从而实现更精准的成像。

2) 高灵敏度探测技术

经头皮和颅骨漫射透出的近红外光信号极其微弱，因此，高灵敏度探测技术是实现非侵入式 fNIRS 成像的关键，该技术的核心在于提升系统在

强背景噪声下提取微弱有效信号的能力。采用雪崩光电二极管或光电倍增管等高性能探测器，能够在极低光强下准确捕捉到脑血氧水平变化的微小波动，相比早期的光电二极管，检测灵敏度显著提升。同时，结合分时复用检测、低噪放大电路等方案可以有效抑制干扰，提升检测系统的信噪比^[12]。此外，通过增设小于 1 cm 的短距离通道，专门监测头皮浅层生理活动（如皮肤血流变化），可将该信号用于噪声估计，从而校正反映皮层活动的常规通道信号，进一步提升信号检测质量^[13]。

3) 宽动态范围信号探测

fNIRS 信号的强度受年龄、颅骨厚度、肤色、头发颜色和浓密程度等多种因素的显著影响。即使对于同一被试、不同脑区，由于颅骨结构、头发覆盖等差异，透射出的光信号强度存在很大差异^[12]。为准确捕捉不同人群所有脑区的活动，fNIRS 系统必须具备足够宽的动态范围，以应对个体间及个体内不同脑区的巨大信号强度差异。高端系统支持每个通道独立的动态增益调节，从而确保系统能够同时兼顾低信号与高信号的探测能力。

4) 全脑超百通道成像

fNIRS 通过光源与探测器的有效排布实现了超百通道成像，为单被试乃至多被试全脑成像提供了技术支撑。为控制探头数量并避免光源间干扰，fNIRS 采用光源多路复用方式，并通过分频编码或分时编码来区分各光源信号^[14]。分频编码基于对不同光源的驱动信号进行频率调制来区分信号来源。该技术需配置调制解调系统，虽然对时间同步的要求相对宽松，通道数量也易于扩展，但容易出现频率混叠问题。分时编码基于严格的时间序列控制光源发光，通过发光时序来区分信号来源。该技术对系统的采样速率和时间同步精度要求极高，但其硬件架构和控制逻辑相对简洁，信号串扰低，且系统能耗较小。

需要指出的是，实现高质量的全脑成像远非简单地增加通道数量。其核心挑战在于克服不同脑区（尤其是深色头发覆盖区域）的信号衰减问题^[15]，解决有黑头发覆盖区信号有效采集，而这正是以超

高灵敏度探测和宽动态范围信号采集为基础的。

5) 便携式可穿戴技术

目前, fNIRS 已实现小型化、轻便化, 这是 fNIRS 能够适用于自然场景的一大优势^[12]。随着柔性光纤和微型传感器技术的进步, fNIRS 探头的小型化、舒适化和高适应性, 能够满足自然环境下的脑功能监测需求。便携式无线 fNIRS 设备集成了发射、检测模块和数据采集系统, 可放置于背包内随身携带, 并通过电池供电和无线传输实现真正的可穿戴测量。可穿戴技术的发展使 fNIRS 的研究与应用进入新阶段, 为实时认知状态评估、情绪识别、运动控制等光学脑机接口应用提供了可行的解决方案。

6) fNIRS 脑功能数据处理分析

fNIRS 检测的原始信号为光强信号, 需经过一系列预处理和分析来提取有意义的脑功能信息。首先对原始信号进行预处理, 滤波选取合理频段分离心率、呼吸信号, 并去除运动干扰消除噪声。尽管 fNIRS 具有较强的抗运动干扰能力, 但头部剧烈运动仍会造成滑动伪迹等噪声, 采用主成分分析、自适应滤波等算法可以进行运动伪迹校正^[16]。近年来, 深度学习等方法也被应用于运动伪迹去除, 显著提升了 fNIRS 数据质量。

对于基于通道的拓扑成像系统, 预处理后的光强数据需通过修正的朗伯-比尔定律转换为 HbO 与 HbR 的相对浓度变化时间序列^[17], 根据探头的空间排布, 通过插值方法将这些通道数据生成直观的脑功能激活拓扑图。在此基础上, 可进一步进行统计分析、任务态激活检测和基于图论的脑功能连接分析。fNIRS 图像的处理分析专业性较强, 具体数据分析方法不断发展。近年来, 小波变换多频段时频分析方法、动态贝叶斯推理方法用于建立脑功能连接和效应连接的近红外脑功能动态评估技术^[18]。

层析成像系统的目标是通过求解逆问题来重建脑组织内部光学参数的三维分布。这需要构建头部的光学扩散模型, 并利用从表面测量到的多源-多探测器光强数据, 通过重建算法来估计脑组织内光学参数变化, 进而体现更细致的大脑活动^[19]。

同时, 随着多模态联用场景的大量应用, 发展有效的多模态数据融合算法变得至关重要。多模态数据融合算法旨在时空尺度上整合不同模态的神经信息, 实现优势互补, 以提供更全面、更可靠的大脑活动解读, 是当前神经影像数据分析的前沿方向之一。

2 fNIRS 应用现状

作为一种无创脑功能神经影像技术, fNIRS 目前已被学术界和临床领域视为脑科学研究及脑疾病诊疗的重要工具。全球范围内基于 fNIRS 的研究成果逐年增长, 尤其在临床应用层面, 在卒中康复、精神障碍识别、退行性疾病评估与儿童发育障碍辅助诊断等前沿主题呈显著增长趋势。fNIRS 凭借良好的时空分辨率、抗运动/电磁干扰能力和无创且便携等特点, 可用于脑功能障碍评估、疾病筛查识别、脑功能纵向检测、康复疗效评价和闭环神经调控。基于 fNIRS 的光学脑机接口也在不断拓展其应用边界。

2.1 在卒中康复领域的临床应用

脑卒中是突发性局部脑血管病变, 累及局部脑组织, 常导致运动、认知等功能障碍。人脑具有高度的可塑性, 受损后神经重塑是卒中康复的重要机制之一。然而, 卒中康复是一个长期的过程, 涉及大量运动康复训练, 如何在临床康复场景下无创、定量监测脑功能康复过程是卒中康复的重要需求。不同于其他影像技术, fNIRS 对受试者检测姿势没有过多限制, 甚至支持在康复运动状态下进行脑功能监测, 反映康复训练过程中脑功能的变化, 并指导康复方案优化。

Kato 等^[20]分别用 fMRI 和 fNIRS 观察卒中患者和健康被试在完成特定任务时脑功能变化, 两种成像模式均反映出同侧激活, 这既反映了脑卒中患者的大脑激活模式, 也验证了 fNIRS 在卒中脑功能评价中的有效性。fNIRS 可用于对比康复前后大脑皮层激活与网络连接的变化情况, 甚至在行走、上肢多关节任务和四肢联动等康复训练过程中实时

观测卒中患者大脑皮层的活动情况^[21]。Chen 等^[22]利用 fNIRS 纵向跟踪康复过程中卒中患者脑功能恢复的动态信息,发现基于 fNIRS 得到的辅助运动区偏侧化指数变化与上肢运动功能评定量表评分显著相关,这说明 fNIRS 可以为早期评估和个性化康复方案提供依据。

近年来,神经调控技术大量用于卒中康复,具有抗电磁干扰性能的 fNIRS 也可实时评估神经调控技术对卒中患者的干预效果。fNIRS 能够在开展经颅磁刺激或经颅电刺激的同时观察特定脑区的皮层激活与功能连接情况。2021 年,《近红外脑功能成像临床应用专家共识》^[2]明确指出, fNIRS 为脑卒中患者提供一种无创、实时、动态可重复的脑功能状态检测方法,可为临床康复方案制定提供重要的影像学依据,并可实时反馈康复干预疗效,反映和判断神经功能重建情况,在指导和优化康复方案方面有重要的临床应用价值。

2.2 在精神障碍领域的临床应用

精神障碍又称精神疾病、心理疾病等,是以精神症状为主要病症的一类疾病的总称。精神障碍通常不呈现器质性病变,难以用结构成像进行识别。对精神障碍的诊断多通过行为观察、言语沟通和临床量表开展,诊断难度大、主观性较强,难以做到客观定量。尽管 fMRI 和 PET 能够发现精神障碍患者脑功能异常,但受限于成像条件,无法在自然交流过程中进行评估诊断,难以在临床中推广,而适用于自然场景下脑功能定量检测的 fNIRS 为精神障碍的快速客观定量检测提供了有利手段,对于开展精神障碍的临床诊疗具有重要的意义。

欧美精神病认知功能筛查评估专家共识明确指出,在特定任务下 fNIRS 功能指标可以用于辅助精神疾病诊疗^[23]。Wei 等^[24]利用 fNIRS 对 316 名精神障碍患者(包括 198 名精神分裂症患者、54 名重度抑郁症患者和 64 名双相情感障碍患者)与 101 名健康被试在言语流畅性任务(VFT)下进行额、颞叶脑功能检查。研究发现,额叶区域氧合血红蛋白变化的积分值、颞叶区域氧合血红蛋白变化的质心值在区分精神障碍患者和健康对照方面均显

示出敏感性。采用结合积分值和质心值的综合指标,区分精神障碍与健康对照的准确率达 91.3%,fNIRS 可为中国人群精神障碍鉴别诊断提供候选生物标志物。Ho 等^[25]对 70 名重度抑郁症患者进行为期 6 个月的纵向研究,发现任务期间背外侧前额叶皮质中总血红蛋白的变化与治疗反应显著相关,使用 fNIRS 数据预测治疗效果准确率超过 70%,充分体现了 fNIRS 在精神疾病诊疗方面的潜力。

2.3 在退行性疾病领域的临床应用

在当前人口结构老龄化的趋势下,神经退行性疾病(如阿尔茨海默病、帕金森病)的发病率呈显著增长趋势,给社会及家庭带来沉重压力,已成为公共卫生领域面临的严峻挑战。退行性疾病通常前期具有隐匿性,早期无症状或症状轻微,导致诊断滞后,病情进行性发展,无法治愈,仅能通过干预手段控制或延缓病情。早期筛查早期干预,将治疗窗口主动前移,是目前延缓或阻止退行性疾病进展的有效途径。

非侵入式便携 fNIRS 为开展中老年群体退行性疾病筛查提供了技术平台,其成本可控、操作简便,可在自然场景下完成脑功能检测,有利于在社区及基层医疗机构开展大规模筛查与长期随访,从而提升疾病管理的普及性和连续性。

Ung 等^[26]利用 fNIRS 比较了健康对照者(HC)、轻度认知障碍(MCI)患者和阿尔茨海默病(AD)患者执行在视觉空间工作记忆任务中脑功能差异。在低负荷状态下,MCI 患者与 HC 的双侧前额叶激活无显著差异;在中等负荷状态下,MCI 患者双侧前额叶激活程度更高。对于 MCI 组,fNIRS 所检测的双侧前额叶皮质激活与任务负荷显著相关;而 AD 组并未出现过度激活,这可能与 AD 患者因神经退行性病变程度较重而无法进行代偿有关。VFT、工作记忆和心算等不同的任务被尝试用于 MCI 的识别^[27],Wang 等^[28]提出利用 fNIRS 通过双任务增加认知负荷来实现 MCI 的识别,为辅助认知障碍患者的诊断提供了新的途径。

帕金森病(PD)所表现出的运动迟缓、强直和静止性震颤等体征背后是脑功能的退化,监测

PD 患者脑功能变化是控制病情发展的必要环节。PD 患者难以静止平卧,使得利用 fMRI 获得其脑功能影像变得异常困难;而 fNIRS 凭借良好的抗运动干扰能力,能够完全胜任 PD 患者脑功能检测任务,为临床提供了一种辅助诊断手段。

Ranchet 等^[29]通过 fNIRS 测量 18 名 HC 和 18 名早期 PD 患者在完成站立运算、行走、行走计数和行走运算 4 种不同任务时的背外侧前额叶皮质活动,发现 PD 组在常规行走过程中背外侧前额叶皮质活动增强,可能存在对执行功能障碍的潜在代偿。Maidan 等^[30]对比了 HC、PD 和轻度 PD 患者在姿势控制任务过程中的脑功能情况,发现 PD 和轻度 PD 患者前额叶脑区表现出更强的激活程度,并且激活程度随 PD 症状严重程度而增强。这一研究结果为 PD 患者运动功能障碍诊断与干预效果定量评估提供了依据。Lu 等^[31]利用 fNIRS 采集了 50 名 PD 患者和 41 名 HC 的脑功能数据,建立大脑动态功能连接,并量化功能连接状态用于分类 PD 与 HC。结果显示,与 HC 相比,PD 病患者更有可能转换到信息传递水平较高的大脑连接状态,基于 fNIRS 的动态脑功能连接分析也能够有效表征 PD 的功能性神经退行性变化,且有望成为 PD 诊断的功能性生物标志物。Yu 等^[32]对比不同频率脑深部电刺激(DBS)下 PD 患者脑功能和步态行为的变化,发现全局和区域脑效率均随刺激参数动态变化;值得注意的是,使每位患者达到最高脑网络全局效率的 DBS 刺激频率,与其临床步态评估结果高度一致。这一发现表明,任务态 fNIRS 能够量化评估 DBS 参数优化过程中的脑功能响应,为退行性疾病的个体化精准调控提供了一种客观定量的解决方案。

2.4 在儿科领域的临床应用

fNIRS 作为探索儿童脑功能的最理想神经成像技术之一,近年来越来越多地被用于描述儿童脑皮质活动、脑功能连接和网络拓扑特征的发展。fNIRS 对头部和肢体晃动的敏感性远低于 fMRI,可在自然场景下完成脑功能检测,更适合用于检测自闭症谱系障碍(ASD)和注意缺陷多动障碍

(ADHD)等害怕封闭环境、焦虑不安或无法安静的儿童群体。无创安全的特点推动 fNIRS 快速在儿科应用,尤其是使用 LED 光源的 fNIRS,可以将其放心地应用于新生儿监测^[10],甚至适用于对早产儿的长期临床监测。

Zhang 等^[33]利用 fNIRS 进行新生儿缺氧缺血性脑损伤评估,通过静息态成像,从大脑网络特性中提取有效的特征作为识别指标,识别新生儿缺氧缺血性脑损伤准确率可达 79%。与健康儿童相比,ADHD 儿童在执行 Go/No-go 任务时,左、右背外侧前额叶皮层脑激活有显著差异,可作为辅助诊断的生物标志物^[34]。此外,fNIRS 也可对发育障碍儿童的训练疗效进行评估,Chen 等^[35-36]利用 fNIRS 评价经颅电刺激、抑制控制或体育游戏干预对 ASD 儿童的疗效。fNIRS 对于各类发育障碍及儿科疾病的辅助筛查、辅助干预效果评估、辅助疗效预测具有重要的临床价值。

2.5 基于 fNIRS 的光学脑机接口

fNIRS 作为一种利用光学原理获取皮层脑功能信号的读脑手段,已被应用于脑机接口(BCI)领域,被称为光学脑机接口。fNIRS 因无创、便携、抗运动干扰能力强、具有空间分辨优势等特性,被越来越多的权威机构和专家视为脑机接口的关键技术路径之一。《神经系统疾病脑机接口临床研究实施与管理的中国专家共识》^[37]明确指出,fNIRS 采用无创手段获取中枢神经信号,属于非植入式 BCI 技术路线。

光学脑机接口可以分为主动式和被动式。在主动式光学脑机应用中,需要通过被试主动想象特定任务来表达意愿,如通过完成心算任务来主动表达“是”,通过保持放松状态来表达“否”^[38]。Paulmurugan 等^[39]总结了光学脑机接口更复杂的主动想象控制任务,如通过想象左、右手运动,引发对侧运动皮层血流变化,用于控制轮椅的转向;或者结合视觉刺激,让用户利用脑信号移动屏幕上的光标以拼写字母。在被动式光学脑机接口应用中,用户无需主动想象特定任务,被动接受 fNIRS 读取脑信号。基于 fNIRS 的光学脑机接口在情绪识别、监测

脑负荷和注意状态识别等领域展现出独特优势。虽然 fNIRS 时间分辨率较低，响应速度较低，但其所采集的慢变信号使得光学脑机接口在康复脑功能监测、情绪识别和疲劳检测等应用中更稳健可靠。

目前，已有研究突破传统脑机接口依赖单一信号源的限制，利用 fNIRS 和 EEG 采集实现了双模态脑机接口，同步捕捉了“时间动态”与“空间定位”两个维度的关键信息，分别实现运动意图的解码和情绪识别^[40-41]，性能全面超越传统单一模态脑机接口。

3 未来挑战

fNIRS 作为快速发展的非侵入性脑功能检测技术，在神经科学与临床应用中展现出重要潜力。近年来，在国家科研项目支持下，国内研究团队经过近 20 年的持续攻关，在关键技术上实现重要突破，成功研制出全球首个超百通道 fNIRS 全脑成像系统，并获国家药品监督管理局医疗器械注册认证。该成果填补了中国在高端功能光学成像设备领域的空白，实现了“替代进口”，在多项性能指标上达到国际先进水平。未来，fNIRS 将向高分辨、深部探测、标准化、智能化和多模态融合方向发展，但在关键技术与应用落地中仍面临诸多挑战。

3.1 空间分辨率与深部探测能力难以支撑精细化脑功能解析

当前主流 fNIRS 产品的空间分辨率为 2~3 cm，虽明显优于 EEG，但与 fMRI 的 mm 级空间分辨相比仍存在明显差距。这一差距直接限制了 fNIRS 在精细脑区定位、局部脑网络功能识别及小病灶评估的能力边界。高空间分辨率是当前 fNIRS 发展的瓶颈。

同时，深层皮层的信号探测是基于 fNIRS 脑机接口的关键技术难题。fNIRS 受限于探测原理，仅能检测大脑皮层信息，连续波近红外光检测系统探测深度约为 1.5 cm，仅能探测到浅层皮层，难以触及更深的皮层结构及皮层下结构，因此对高级认知过程的表征能力受限。

3.2 数据处理与指标解读缺乏统一标准

fNIRS 数据分析涉及信号预处理、伪迹剔除、激活分析、功能连接分析和统计分析等多个环节。现有开源软件（如 HOMER、NIRX 等）在功能覆盖、流程整合和临床友好性方面仍存在一定局限，导致非工程背景的临床用户在实际应用中难以入门。

fNIRS 数据分析处理方法不断发展，从经典信号处理逐步发展到小波变换、时频分析、动态因果建模、贝叶斯推理和深度学习等多路径并行，目前尚未形成统一的数据分析处理标准。

在临床层面，fNIRS 指标的解释仍较依赖医生经验，缺乏基于中国人群的常模数据库和客观阈值体系，导致不同中心、不同设备和不同任务范式之间结果可比性不足。这一问题直接影响 fNIRS 从科研应用走向临床普及、从试点探索走向常规诊疗的可行性。

3.3 信号质量有限和人群异质性影响结果的可靠性和可迁移性

fNIRS 信号强度较弱，易受到心跳、呼吸、血压波动等生理噪声及运动伪迹影响，尤其在儿童、卒中患者和精神疾病患者等群体中更为显著。临床真实场景下，被试配合度、头部运动、发量差异和头皮血流变化等因素会导致信号质量显著下降，从而降低检测结果的可靠性。

个体解剖及生理差异（头皮/颅骨厚度、头发密度与颜色、脑血流基线差异等）也会造成信号基线与响应幅度存在系统性偏移，使得不同人群之间难以直接比较。由此产生的跨个体、跨设备和跨中心的可迁移性不足，成为 fNIRS 在临床推广中的关键障碍。

3.4 多模态融合与闭环应用的工程化范式尚不成熟

fNIRS 与 EEG、fMRI 等模态在时空分辨率和生理机制表征方面具有互补性，多模态融合已成为神经影像的发展趋势。然而，多模态联用在实际落地中仍面临同步采集、硬件接口一致性、跨模态时

间对齐和融合算法统一性等问题，尚缺乏成熟的标准化实施范式。

此外，fNIRS 与经颅磁刺激、经颅电刺激等神经调控技术结合，可形成“监测-解码-反馈-调控”的闭环系统，但该应用对系统同步、接口实时传输、低延迟、高鲁棒性的实时信号解析提出更高要求。现阶段在实时信号解析、在线控制、闭环反馈稳定性和安全性评估等方面仍存在明显工程化短板，限制了其从科研验证走向临床常规应用。

3.5 医工交叉复合型人才队伍不足

fNIRS 作为脑科学与工程交叉的新兴领域，代表着科技前沿发展方向之一。人才是科技发展的基石，在 fNIRS 这一高度交叉的领域尤为突出。中国的 fNIRS 研究起步虽晚于美国、欧洲和日本，但近年来发展迅速。国内多所高校和研究机构建立了 fNIRS 研究团队，包括北京航空航天大学、北京师范大学、华中科技大学等，在相关技术及应用领域产出了一批有国际影响的成果，基本形成了一支以中青年为主的科研队伍。然而，顶尖领军人才和国际认可度仍有提升空间，随着 fNIRS 在多方向应用的拓展，医工交叉复合人才不足是该技术产业及临床应用面临的一大挑战。

4 发展建议

面向未来发展趋势，为推动 fNIRS 向临床基础设备升级，提出如下 4 点建议。

1) 以核心部件与系统设计为牵引，持续推动自主高端装备迭代升级

建议将 fNIRS 核心部件与系统设计作为持续攻关重点，形成从部件到系统再到应用的全链条协同机制。重点方向包括高灵敏度探测器、低噪声探测系统、时域/频域成像关键模块和全脑覆盖可穿戴结构设计等。

在组织方式上，可通过国家级重点专项等组织形式，支持龙头企业联合高校、医院形成稳定联合体，建立可持续迭代的国产高端装备体系，推动高端产品实现从“可用”到“好用”、从“替代进

口”到“国际竞争”。

2) 建立面向临床的标准、规范和中国人群常模数据库，形成可复制诊疗方案

建议以标准构建、常模数据库建立和临床验证为着力点，推进 fNIRS 临床转化与推广。一方面，应由国家相关部门或学会层面推动形成统一的采集标准，规范任务范式、明确质量控制要求与数据处理流程；另一方面，组织多中心队列研究，建立覆盖不同年龄、地区、教育水平和高发神经系统疾病的中国人群常模数据库，形成可用于临床解释的参考区间与阈值体系。同时，推动形成临床指南与临床专家共识，建立规范、可参考、可解释、可复核的临床应用方案，使 fNIRS 真正具备跨医院、跨地区推广的条件。

3) 推动多模态与闭环脑机接口技术的工程化验证，助力主动健康

建议将多模态融合与联合神经调控的闭环脑机接口作为未来 5~10 年的重点发展方向，分别从一体化产品、示范应用和安全监管 3 方面推进工程化落地。首先，推动 fNIRS 与 EEG 等模态的硬件接口、同步协议、数据格式和融合分析流程标准化，加速新型一体化设备的研制及应用。然后，基于设备产品的发展，建设多模态脑功能评估与神经调控示范平台，在卒中康复、抑郁焦虑、儿童神经发育障碍等重点场景开展临床研究与验证，实现示范应用。最后，完善闭环脑机接口的安全监管流程，建立贯穿“实验室验证-临床试验-真实世界应用”的全链条分级验证体系，同步完善安全性、伦理和监管路径，形成安全、有保障、可复制的推广模式，助力主动健康。

4) 培养交叉复合型人才，为产业升级与应用拓展提供生力军

fNIRS 的持续攻关与应用拓展有赖于生物、医学、光学、电子和心理等多领域专家的通力合作，建议以交叉融合双负责人制（PI）项目为牵引，鼓励多学科交叉合作，进一步培养能够引领前沿的复合型创新人才。加强与海外团队的交流互动，提升中国学者在国际 fNIRS 领域的学术话语权。

建议建设产学研协同平台,汇集高校、医院和企业的资源,在承担国家任务的同时培养一批跨学科人才,将人才培养嵌入科研全过程,实现“研以育才”。同时,鼓励由高校或企业牵头,定期举办高层次学术沙龙与培训班,普及 fNIRS 技术和推广应用案例,快速提升现有人才队伍的技能,形成 fNIRS 交叉复合型人才培养的长效机制。

5 结束语

fNIRS 作为新一代无创神经影像技术,凭借实时性、便携性及较强的抗运动/电磁干扰能力,为自然状态下大脑皮层功能活动的动态监测提供了重要手段。近 10 年,我国 fNIRS 技术发展迅速,在高通道全脑皮层检测、支持超大群体超扫描的穿戴式设备等方面已走在世界前列。面向未来,服务于精细化脑功能解析和主动健康国家战略需求, fNIRS 技术需要在空间分辨率和探测深度上取得关键突破, fNIRS 技术将朝着 mm 级高分辨和深部皮层探测方向发展,以缩小与 fMRI 在成像精度上的差距。同时, fNIRS 大规模临床推广依赖于系统可靠性、跨场景跨被试稳定性、数据分析和指标解释的标准化进程。

从全球产业竞争来看,美国、欧洲和日本在 fNIRS 核心部件上仍长期占据主导地位,但在系统集成、应用场景挖掘和临床落地方面,国内外差距正快速减小,在部分领域实现“并跑”乃至“领跑”。未来,应聚焦核心部件自主可控与系统架构优化的关键技术攻关,突破关键技术瓶颈;加快构建多中心、大样本的临床数据库,主导或参与国际标准制定,并围绕多模态融合与闭环脑机接口等前沿方向,推动自主高端装备的持续迭代升级与示范应用。通过技术创新、临床转化与产业协同的系统推进,我国有望在神经功能影像这一战略领域确立竞争优势。在此过程中,更需着力培养具备医学与工学多学科背景的复合型人才梯队,为技术的持续迭代、产业升级和应用拓展提供坚实的人才支撑。

参考文献

- [1] Liu X X, Gao T, Lu T S, et al. China brain project: from bench to bedside[J]. *Science Bulletin*, 2023, 68(5): 444-447.
- [2] 近红外脑功能成像临床应用专家共识编写组. 近红外脑功能成像临床应用专家共识[J]. *中国老年保健医学*, 2021, 19(2): 3-9.
Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology writing group. Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology[J]. *Chinese Journal of Geriatric Care*, 2021, 19(2): 3-9. (in Chinese)
- [3] Yücel M A, Selb J J, Huppert T J, et al. Functional near infrared spectroscopy: Enabling routine functional brain imaging[J]. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 2017, 4: 78-86.
- [4] Liao L D, Tsytsarev V, Delgado-Martínez I, et al. Neurovascular coupling: *in vivo* optical techniques for functional brain imaging[J]. *BioMedical Engineering OnLine*, 2013, 12(1): 38.
- [5] Barstow T J. Understanding near infrared spectroscopy and its application to skeletal muscle research[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2019, 126(5): 1360-1376.
- [6] Ekkekakis P. Illuminating the black box: Investigating prefrontal cortical hemodynamics during exercise with near-infrared spectroscopy[J]. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 2009, 31(4): 505-553.
- [7] Villringer A, Chance B. Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function[J]. *Trends in Neurosciences*, 1997, 20(10): 435-442.
- [8] Frijia E M, Billing A, Lloyd-Fox S, et al. Functional imaging of the developing brain with wearable high-density diffuse optical tomography: A new benchmark for infant neuroimaging outside the scanner environment[J]. *NeuroImage*, 2021, 225: 117490.
- [9] Sato H, Yahata N, Funane T, et al. A NIRS-fMRI investigation of prefrontal cortex activity during a working memory task[J]. *NeuroImage*, 2013, 83: 158-173.
- [10] Wu Y J, Hou X L, Peng C, et al. Rapid learning of a phonemic discrimination in the first hours of life[J].

- [Nature Human Behaviour](#), 2022, 6(8): 1169-1179.
- [11] Li Y L, Li X X, Zhaung W, et al. Relationship between cognitive function and brain activation in major depressive disorder patients with and without insomnia: A functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study[J]. [Journal of Psychiatric Research](#), 2024, 169: 134-141.
- [12] Doherty E J, Spencer C A, Burnison J, et al. Interdisciplinary views of fNIRS: Current advancements, equity challenges, and an agenda for future needs of a diverse fNIRS research community[J]. [Frontiers in Integrative Neuroscience](#), 2023, 17: 1059679.
- [13] Wyser D G, Kanzler C M, Salzmann L, et al. Characterizing reproducibility of cerebral hemodynamic responses when applying short-channel regression in functional near-infrared spectroscopy[J]. [Neurophotonics](#), 2022, 9(1): 015004.
- [14] Park C H, Woo S W, Kim N, et al. Simultaneous discrimination of multiple chromophores with frequency division multiplexed four-color functional near-infrared spectroscopy[J]. [IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement](#), 2023, 72: 4504313.
- [15] Yücel M A, Anderson J E, Rogers D, et al. Quantifying the impact of hair and skin characteristics on fNIRS signal quality for enhanced inclusivity[J]. [Nature Human Behaviour](#), 2025, 9(12): 2651-2668.
- [16] Klein F. Optimizing spatial specificity and signal quality in fNIRS: An overview of potential challenges and possible options for improving the reliability of real-time applications[J]. [Frontiers in Neuroergonomics](#), 2024, 5: 1286586.
- [17] Ye J C, Tak S, Jang K E, et al. NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy[J]. [NeuroImage](#), 2009, 44(2): 428-447.
- [18] Liu Q Y, Wang B T, Liu Y, et al. Frequency-specific effective connectivity in subjects with cerebral infarction as revealed by NIRS method[J]. [Neuroscience](#), 2018, 373: 169-181.
- [19] Wu D, Xia M Y, Li D Y, et al. DGDOT-net: a deep generative model with attention fusion for enhanced high-density diffuse optical tomography[J]. [IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement](#), 2025, 74: 4507820.
- [20] Kato H, Izumiyama M, Koizumi H, et al. Near-infrared spectroscopic topography as a tool to monitor motor reorganization after hemiparetic stroke: A comparison with functional MRI[J]. [Stroke](#), 2002, 33(8): 2032-2036.
- [21] Huo C C, Xu G C, Xie H, et al. Functional near-infrared spectroscopy in non-invasive neuromodulation[J]. [Neural Regeneration Research](#), 2024, 19(7): 1517-1522.
- [22] Chen S M, Zhang X L, Chen X X, et al. The assessment of interhemispheric imbalance using functional near-infrared spectroscopic and transcranial magnetic stimulation for predicting motor outcome after stroke[J]. [Frontiers in Neuroscience](#), 2023, 17: 1231693.
- [23] McIntyre R S, Anderson N, Baune B T, et al. Expert consensus on screening and assessment of cognition in psychiatry[J]. [CNS Spectrums](#), 2019, 24(1): 154-162.
- [24] Wei Y Y, Chen Q, Curtin A, et al. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) as a tool to assist the diagnosis of major psychiatric disorders in a Chinese population[J]. [European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience](#), 2021, 271(4): 745-757.
- [25] Ho C S H, Wang J Y, Tay G W N, et al. Application of functional near-infrared spectroscopy and machine learning to predict treatment response after six months in major depressive disorder[J]. [Translational Psychiatry](#), 2025, 15: 7.
- [26] Ung W C, Yap K H, Ebenezer E G M, et al. Assessing neural compensation with visuospatial working memory load using near-infrared imaging[J]. [IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering](#), 2020, 28(1): 13-22.
- [27] Liampas I, Danga F, Kyriakouloupoulou P, et al. The contribution of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) to the study of neurodegenerative disorders: A narrative review[J]. [Diagnostics](#), 2024, 14(6): 663.
- [28] Wang Z H, Ren K, Li D Y, et al. Assessment of brain function in patients with cognitive impairment based on fNIRS and gait analysis[J]. [Frontiers in Aging Neuroscience](#), 2022, 14: 799732.
- [29] Ranchet M, Hoang I, Cheminon M, et al. Changes in prefrontal cortical activity during walking and cognitive functions among patients with Parkinson's disease[J].

- Frontiers in Neurology*, 2020, 11: 601686.
- [30] Maidan I, Nieuwhof F, Bernad-Elazari H, et al. The role of the frontal lobe in complex walking among patients with Parkinson's disease and healthy older adults: An fNIRS study[J]. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2016, 30(10): 963-971.
- [31] Lu J W, Zhang X Y, Wang Y, et al. An fNIRS-based dynamic functional connectivity analysis method to signify functional neurodegeneration of Parkinson's disease[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2023, 31: 1199-1207.
- [32] Yu N B, Liang S Q, Lu J W, et al. Quantified assessment of deep brain stimulation on Parkinson's patients with task fNIRS measurements and functional connectivity analysis: A pilot study[J]. *Chinese Neurosurgical Journal*, 2021, 7: 34.
- [33] Zhang S, Peng C, Yang Y, et al. Resting-state brain networks in neonatal hypoxic-ischemic brain damage: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Neuro-photonics*, 2021, 8(2): 025007.
- [34] Wu T, Liu X L, Cheng F, et al. Dorsolateral prefrontal cortex dysfunction caused by a go/no-go task in children with attention-deficit hyperactivity disorder: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2023, 17: 1145485.
- [35] Chen L, Du B, Li K, et al. The effect of tDCS on inhibitory control and its transfer effect on sustained attention in children with autism spectrum disorder: An fNIRS study[J]. *Brain Stimulation*, 2024, 17(3): 594-606.
- [36] Chen H, Liang Q, Wang B J, et al. Sports game intervention aids executive function enhancement in children with autism - An fNIRS study[J]. *Neuroscience Letters*, 2024, 822: 137647.
- [37] 中华医学会神经外科学分会, 中国卒中学会脑血管外科分会. 神经系统疾病脑机接口临床研究实施与管理的中国专家共识[J]. *中华医学杂志*, 2024, 104(23): 2105-2112.
- Society of Neurosurgery of Chinese Medical Association, Society of Cerebrovascular Surgery of Chinese Stroke Association. Chinese expert consensus on implementation and management of brain-computer interface clinical research in neurological diseases[J]. *National Medical Journal of China*, 2024, 104(23): 2105-2112. (in Chinese)
- [38] Naseer N, Hong K S. fNIRS-based brain-computer interfaces: A review[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015, 9: 3.
- [39] Paulmurugan K, Vijayaragavan V, Ghosh S, et al. Brain-computer interfacing using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS)[J]. *Biosensors*, 2021, 11(10): 389.
- [40] Si X P, Zhang S, Yang Z B, et al. A bidirectional cross-modal transformer representation learning model for EEG-fNIRS multimodal affective BCI[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 266: 126081.
- [41] Chen D Y, Shi J, Tao B, et al. A novel transfer learning-based hybrid EEG-fNIRS brain-computer interface for intracerebral hemorrhage rehabilitation[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(43): e05426.

Development and Application Trends of Functional Near-infrared Spectroscopy

QIAO Huiting¹, YANG Lirui¹, WU Di¹, HU Shoubo¹, WANG Daifa^{1,2†}

1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

2. Danyang Huichuang Medical Equipment Co., Ltd., Danyang 212300, China

Abstract Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), as an emerging non-invasive neuroimaging technology, provides a vital technical platform for high-resolution brain observation in naturalistic conditions owing to its excellent portability, robustness against motion/electromagnetic interference, and favorable balance between temporal and spatial resolution. In recent years, China has witnessed vigorous growth in fNIRS-related scientific research and industrial development, marked by the successful development of high-end equipment with independent intellectual property rights, which gradually breaks foreign technological monopolies, and by the active promotion of its widespread clinical applications. This paper comprehensively reviews the current state of fNIRS

development from both technical and application perspectives, analyzes current challenges, and outlines future trends. Furthermore, it proposes constructive recommendations focusing on equipment upgrades, standardization initiatives, optical brain-computer interfaces, and cultivating interdisciplinary talent. This aims to provide strategic insights for advancing the deep integration of fNIRS into brain science research and clinical translation in China.

Keywords brain functional imaging; near-infrared; fNIRS; cerebral cortex



乔惠婷，副教授，博士研究生导师。主要从事医学影像及生理系统建模仿真研究。主持国家自然科学基金及省部级项目等 20 余项。获北京市青年英才、北京航空航天大学蓝天新星称号。发表学术论文 40 余篇，授权发明专利 7 件。

电子信箱：qht@buaa.edu.cn。



汪待发，副教授，博士研究生导师。丹阳慧创医疗设备有限公司创始人、董事长、首席科学家。中国康复医学会脑功能检测与调控康复专业委员会常务委员、中国妇幼保健研究会婴幼儿心理健康专业委员会常务委员、中国康复医学会阿尔茨海默病与认知障碍康复专业委员会青年工作组副组长。主要从事近红外脑功能成像、神经调控、神经反馈及脑功能评价等研究。主持国家自然科学基金及省部级项目等 30 余项。荣获工业和信息化部“先进制造技术人才”、江苏省“双创人才”称号；入选江苏省高层次人才培养计划（“333 工程”）等。发表学术论文 40 余篇，授权发明专利 10 余件。

电子信箱：daifa.wang@buaa.edu.cn。

[†]Corresponding author