

近红外脑功能成像临床应用专家共识

近红外脑功能成像临床应用专家共识编写组 100000

基金项目:国家重点研发计划(2020YFC2004200)、国家自然科学基金重点项目(61633018)、
重点国际合作项目(82020108013)

【摘要】 近红外脑功能成像,又称功能近红外光谱(Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS),作为一种无创脑功能神经影像技术,具有操作简单、使用成本低、抗干扰性强、兼容性好等优势,可实现临床多种自然场景下患者脑功能的快速检查,在临床领域得到广泛应用。在此背景下,本专家共识介绍了 fNIRS 技术在脑卒中神经康复、精神疾病(抑郁症、精神分裂症、双相情感障碍、焦虑症等)、儿童发育障碍(新生儿脑损伤、脑瘫、孤独症、注意力缺陷多动障碍)及神经退行性疾病(阿尔茨海默病、轻度认知障碍、帕金森)等领域的临床应用价值,并强调了相关的操作规范,旨在指导 fNIRS 在临床的规范应用和结果的合理解读,更好地服务临床。

【关键词】 近红外脑功能成像 功能近红外光谱 临床应用 专家共识

doi: 10.3969/j.issn.1672-2671.2021.02.000

Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology (Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology writing group, Beijing 100000, China.)

【Abstract】 As a non-invasive functional neuroimaging technology, functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), also called near-infrared brain functional imaging, has the advantages of easy operation, low cost, good motion tolerance and compatibility. It can realize the rapid examination of brain function in multiple natural scenes, and is widely used in clinical fields. Under this background, the expert consensus introduced the clinical application of fNIRS in the fields of stroke neurological rehabilitation, psychiatric diseases (depression, schizophrenia, bipolar disorder, anxiety disorder, etc.), children's development and disorders (neonatal brain injury, cerebral palsy, autism, hyperactivity disorder, etc.), and neurodegenerative diseases (Alzheimer's disease, mild cognitive impairment, Parkinson's disease) and emphasized the relevant operation specifications. This paper aimed to guide the standard application of fNIRS in clinical practice and reasonable interpretation of the results for better clinical service.

【Key words】 Near-infrared brain functional imaging, functional near-infrared spectroscopy, clinical application, expert consensus

皮层功能激活与神经网络重塑是多数神经系统疾病恢复的内部过程,神经环路的激活与重建是实现功能恢复的必由之路。临床上,脑功能恢复需要经历评估-治疗-康复-再评估-持续治疗-康复-疗效随访的过程和体验,需要在精准评估的基础上不断优化治疗、康复方案和技术路径。

无创脑功能成像技术的发展为我们检测各种脑功能障碍疾病患者的脑功能提供了重要手段。常用的无创脑功能检测技术有脑电图(Electroencephalogram, EEG)、事件相关脑电位(Event-related potentials, ERPs)、脑磁图(Magnetoencephalography, MEG)、正电子发射断层扫描(Positron Emission Computed Tomography, PET)、功能磁共振成像(Functional magnetic resonance imaging, fMRI)和近红外脑功能成像(Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)等,各检测技术在空间和时间分辨率、覆盖范围、对仪器的应用要求等方面具有各自特点,例如:临床上应用广泛的 fMRI 有较高的空间分辨率,能够全脑检测,但需要专门的仪器室,更多用于静止状态的脑功能活动检查,难以实现言语、运动状态或电磁治疗下的脑功能评定。

fNIRS 是一种新型脑功能成像技术,具有安全无创、便于

移动、抗运动干扰、抗电磁干扰、时空分辨率高、允许长时程监测等优点,已在脑卒中神经康复、抑郁症、精神分裂症、双相情感障碍等精神疾病诊疗,新生儿脑损伤、孤独症、注意力缺陷多动障碍等儿童发育障碍,以及阿尔茨海默病、轻度认知障碍、帕金森等神经退行性疾病辅助诊断等领域广泛应用。随着逐步普及,近红外脑功能成像技术的临床规范应用和解读成为迫切需求。该共识从 fNIRS 技术的成像原理出发,旨在论述 fNIRS 技术在临床领域的应用价值和意义,规范临床操作,为临床规范应用和结果的合理解读提供指导,推动其更好地服务临床。

1. 近红外脑功能成像技术

1.1 fNIRS 技术成像原理 fNIRS 是一种基于光学原理的无创神经活动成像技术,利用了近红外光(650~950nm)对生物组织的强穿透性^[1]。光源通过向特定脑区发射近红外光,光以香蕉型的路径漫射传播,离光源一定距离的光源探测器可以收集到被组织漫射回来的光(原理见图1)。在近红外光谱窗口内,近红外光穿透力强,可穿透一定深度的组织,达到颅内 20~30mm 的脑皮层。生物组织内占主导地位并具有生理

依赖性的吸收发色团为血红蛋白,其存在两种形式,即氧合血红蛋白(HbO_2)和脱氧血红蛋白(HbR)。二者在此光谱窗口具有可区分的光吸收特性,主要表现为 HbO_2 的吸收系数在波长大于 805nm 时更高;相反, HbR 的吸收系数在波长小于 805nm 时更高。在大脑皮层血管中的 HbO_2 和 HbR 对近红外光波段的光波产生不同程度的吸收,造成近红外光衰减。根据光衰减量与组织中发色团浓度变化的相关性,fNIRS 可以定量分析脑组织中 HbO_2 和 HbR 的浓度变化(表示为 HbO_2 和) [2]。

从测量原理上看,fNIRS 与 fMRI 类似,都是基于血流动力学的功能性脑成像技术。不同之处在于:fMRI 基于磁场手段检测由血红蛋白变化所引起的顺磁性变化 [3],而 fNIRS 是基于光学手段检测的血红蛋白变化引起光谱吸收的变化。基于神经-血管耦合机制,脑功能活动的变化会引起局部脑血流的变化。大脑皮层在被激活时会引起局部氧代谢率和局部脑血流的动力学改变。具体来说,为满足神经元活动所必需的能量需求 [4],神经元活动的增加伴随脑氧代谢的增加。在神经元的氧代谢过程中,血氧被消耗以产生能量,导致 HbO_2 浓度降低, HbR 浓度增加 [5]。神经元活动的增加伴随着脑血流动力学局部改变,表现为局部脑血流增加,即功能性充

血 [6]。其生理意义是大脑代谢需求增加,氧耗增加的代偿响应,以满足神经元对营养物质(葡萄糖和氧)需求的增加。大脑激活区域局部脑血流增加率远超过局部氧耗率,最终表现为激活区域 HbO_2 浓度增加和 HbR 浓度降低 [4]。

1.2 fNIRS 技术临床应用领域 多项 fMRI-fNIRS 联合研究验证了 fMRI-BOLD 信号与 fNIRS 测量大脑皮质 HbO_2 和 HbR 变化参数具有极高的相关一致性(工作记忆任务下 HbO_2 / HbR 与 BOLD 相关系数分别高达 0.77/0.85 [7])。与 fMRI 相比,fNIRS 系统检测两种血流动力学参数(HbO_2 和 HbR),可更全面地描述脑功能 [8];fNIRS 适用人群广泛,对特殊人群具有更好的适用性,如身体内的金属植入物(心脏起搏器、电子耳蜗等)不受影响,可广泛应用于婴幼儿及病患患者的临床检查 [9,10];支持长时间连续检测及短时间内多次检查,可广泛应用于脑功能监护和疗效评价;fNIRS 技术对运动干扰具有良好的容忍性,应用场景无限制,方便众多脑功能障碍患者在各种自然状态下进行脑功能活动检查。随着技术的发展,便携式 fNIRS 设备体积更小、重量更轻,对于身体运动具有更好的耐受性。表 1 为 fNIRS 在检测指标、时间分辨率、空间分辨率、抗运动干扰、抗电磁干扰、应用环境及可移动性方面与其他神经影像学方法的对比情况。

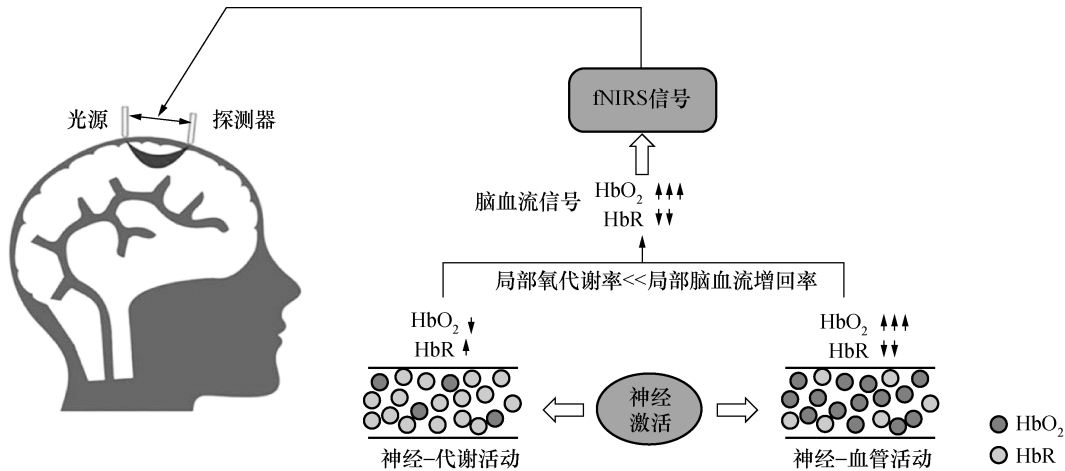


图 1 fNIRS 技术成像原理

表 1 fNIRS 与其他神经影像学方法的对比情况

	检测参数	空间分辨率	时间分辨率	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	3mm	0 ~ 2Hz	弱	弱	大型、专业仪器室	/
PET	葡萄糖代谢	4mm	<0. 1Hz	弱	弱	大型、专业仪器室	/
EEG	神经电活动	6 ~ 9cm	>1000Hz	弱	弱	不适合电磁干扰环境	强
fNIRS	血流动力学响应:HbO ₂ /HbR	2 ~ 3cm	0 ~ 10Hz	强	强	无限制	强

fNIRS 是一种光学设备,不会干扰电磁场,因此 fNIRS 特别适用于多模态成像(例如 fNIRS-fMRI [11],fNIRS-EEG [12]),以检测与神经血管耦合相关的更完整信息;此外,临床治疗应用中电磁场的存在也不会对 fNIRS 检查造成干扰,可与临床

上多模态神经调控技术(经颅磁刺激、经颅电刺激等)广泛联用并作为即时评估疗效的有力手段。

综上所述,基于时空分辨率高、抗干扰性强、人群适用广泛、应用场景无限制、可移动性好等技术优势,fNIRS 越来越

多地应用于脑卒中神经康复、精神疾病、儿童发育障碍以及神经退行性疾病等临床领域。

2. 近红外脑功能成像的临床应用和意义

2.1 fNIRS 在脑卒中康复领域的临床应用 脑卒中发病常有包括运动、认知等功能障碍。卒中后神经重塑是功能障碍恢复的重要机制之一。fNIRS 检测的大脑皮层活动可评价皮质以及皮质下脑卒中疾病的大脑功能重塑^[13]。BOLD-fMRI 研究证实皮质下脑卒中会导致大脑皮质功能活动改变及功能重组^[14]。因此, fNIRS 配合特定的功能障碍任务范式, 可对执行任务时的卒中患者脑功能活动进行实时动态检测, 完整评定脑卒中患者大脑激活模式, 反映患者的神经重塑情况^[15-17]。如 Kato 等人的研究分别用 fMRI 和 fNIRS 观察 6 例卒中患者和 5 例正常对照患在执行上肢运动任务时的皮质激活情况, 两种成像方法均观察到患者同侧运动皮质代偿性激活^[18]; Takeda 等人利用 fNIRS 检测康复过程中脑卒中患者在执行患侧手部运动任务时初级感觉运动皮层激活功能偏侧性的纵向变化, 发现卒中初期患侧手部运动会激活双侧感觉运动皮质, 而康复后受损半球前运动皮层激活增加, 说明随着脑卒中患者运动功能的恢复, 大脑激活模式逐渐趋向正常^[19]。这种激活模式在 fMRI 研究中也得到了证实^[20]。

此外, fNIRS 为观察康复训练中大脑皮层激活情况提供一种实时可视化检测手段, 指导设计患者的临床康复干预实施方案和疗效评估。不同康复任务(上下肢运动^[21,22]、步态^[23]、姿势平衡^[24,25]、约束诱导运动^[26,27])中, 脑卒中患者的大脑皮层激活情况的临床报道不断涌现。Mihara 等人利用 fNIRS 观察 20 例脑卒中患者姿势平衡控制任务下的大脑激活情况, 发现卒中后姿势控制涉及到广泛皮层区域(前额叶、运动前辅助运动区和双侧半球的顶叶皮层区域)的参与^[24]; 行走过程中脑卒中患者受损半球的前运动皮层激活增加有助于步态功能恢复^[23]。Huo 等人利用 fNIRS 观察 20 例右侧偏瘫患者正中神经电刺激(MNES)治疗中的脑功能网络连接情况, 发现 MNES 可增强健侧前额叶在功能网络中的调控功能, 促进卒中后认知功能改善^[28,29]。Lin 等人利用 fNIRS 比较了 17 例脑卒中患者在有速度反馈、无速度反馈和动力辅助骑行时的大脑皮层激活情况, 发现显示速度反馈可更好地激活健侧前运动皮质区域, 并改善脑卒中患者辅助骑行过程的运动表现^[30]。这些证据表明基于 fNIRS 技术的大脑激活模式评定是评价脑卒中患者脑功能状态的有效生物学指标。Hara 等人利用 fNIRS 观察 16 例慢性脑卒中患者在接受为期 5 个月的肌电控制功能电刺激(EMG-FES)治疗时脑皮层灌注情况, 结果显示 EMG-FES 治疗后患者上肢 Fugl-Meyer 评分和最大握力参数显著改善, 临床功能的改善同步伴随着脑皮层灌注的增加^[22]。张颖彬等人利用 fNIRS 检测 60 例脑卒中后轻度认知障碍患者重复经颅磁刺激(rTMS)治疗前后脑功能情况, 结果发现 rTMS 治疗后前额叶 HbO₂ 浓度增加与患者认知功能改善存在相关性^[31]。以上研究表明基于 fNIRS 技术监测的脑皮层灌注增加程度可用于评价临床干预疗效。

共识意见: fNIRS 技术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 fNIRS 在精神疾病领域的临床应用 fNIRS 作为一种无创、生态效度高的神经成像技术, 可在自然情境下进行认知任务状态下的脑功能检测, 已广泛用于临床上多种精神疾病, 如抑郁症、精神分裂症、双相情感障碍、焦虑症等。

fNIRS 检测的血流动力学模式可以辅助医生开展精神类疾病的诊断和分型。Takizawa 等人利用 fNIRS 检测 673 例精神障碍患者言语流畅测试任务下脑功能状态, 基于额叶-颞叶皮质血流动力学反应模式的时空特征分析, 提取积分值、重心值等指标, 可准确区分重度抑郁症患者、双相情感障碍与精神分裂症^[32]。基于 fNIRS 在神经心理学任务测试下发现抑郁症、精神分裂症和双相情感障碍患者与功能障碍有关的前额叶脑区激活有特异性变化^[33-35]。相比于抑郁症患者, 精神分裂症患者皮层活动更慢且降低的幅度更大^[36]。进一步研究发现精神分裂症患者任务后 HbO₂ 异常再增与工作记忆缺陷相关^[37]。2019 年欧美精神病学中认知功能筛查和评估的专家共识中指出, fNIRS 在执行认知任务期间对血流动力学的评估指标可作为精神病学潜在的生物标志物, 指导精神疾病的诊疗^[38]。

fNIRS 检测的大脑血流动力学信号是预测患者临床疗效的生物学标记。通过 fNIRS 技术检测 25 例抑郁症患者在药物治疗前后的脑功能激活变化, 发现抑郁症患者双侧额下和颞中回区域 HbO₂ 指标与药物治疗后症状的改善存在显著相关性^[39]。Shinba 等人应用 fNIRS 研究 15 例重度抑郁症患者在接受 rTMS 治疗过程中的大脑功能变化, 结果发现 rTMS 诱发的脑激活增加与蒙哥马利抑郁评定量表得分呈负相关, 与量表评分的降低呈正相关^[40]。以大脑背外侧前额叶皮层为靶点的有效 rTMS 刺激可以提高处理认知任务中神经效率^[41]。联合 fNIRS 检测双相情感障碍患者脑激活模式和肠道菌群特征, 可以反映脑肠轴的动态平衡及其与双相情感障碍患者细胞免疫的相关性^[42]。

共识意见: 在精神疾病临床应用中, fNIRS 可对各类精神疾病患者在执行认知功能任务, 例如典型的言语流畅性任务时的脑功能进行实时检测, 已形成一些包括积分值、重心值等与精神疾病相关的特异性生物学指标^[32], 为精神疾病提供了定量的检查和评价手段。在患者的用药、rTMS 等神经调控治疗的前、中、后期开展 fNIRS 检查, 对于疗效评估具有重要价值。

2.3 fNIRS 在儿科领域的临床应用 婴幼儿身心发育尚不成熟, 自我控制能力差。fNIRS 利用其安全、无创、易操作性及抗运动干扰能力强特点, 在儿科领域具有独特的技术优势, 在临床上特别适用于婴幼儿, 尤其是脑功能发育障碍儿童等特殊群体, 如脑性瘫痪、孤独症谱系障碍、注意力缺陷多动障碍等^[43]。临床上对新生儿脑组织血、氧代谢的检测具有重要意义^[44]。在新生儿脑功能评估中应用 fNIRS 技术检测新生儿

局部脑组织血氧参数,根据组织的血氧变化来评估新生儿脑发育及脑损伤,实现脑发育异常和脑损伤的早期诊断。另外,基于 fNIRS 研究,发现早产儿出生后其神经血管的发育、脑的结构和功能,与足月儿不同^[45]。Imai 等人利用 fNIRS 基于皮质功能连接网络指标评估早产儿、患有染色体疾病的新生儿与正常新生儿之间大脑皮层发育的差异,并进一步追踪其大脑发育轨迹^[46]。

在儿童发育障碍领域,fNIRS 技术可用于追踪探索婴幼儿感知功能的发展,如对视觉^[47]、情绪^[48,49]的反应,可为婴幼儿的神经发育提供客观的生物标记^[50]。Yang 等人利用 fNIRS 研究 5~7 月大的幼儿对颜色感知的神经相关性,研究发现不同类别的颜色刺激在语前儿童的视觉皮层中表现不同,这一结果意味着视觉系统中颜色类别在语言习得之前可能是独立发展的^[51]。此外,fNIRS 检测和分析为脑功能发育障碍疾病的诊断与评估提供有力的生物指标。Tian 等人利用 fNIRS 检测 10 例偏瘫型脑瘫患儿与 8 例正常儿童在一侧手指运动过程中大脑感觉运动脑区的激活情况,可以准确识别偏瘫患儿半球间运动功能的异常情况^[52]。针对孤独症患儿,fNIRS 可检测不同孤独症风险的幼儿前额叶的功能活动及连接网络的特点^[53];提示孤独症患儿存在额叶皮质功能异常,这是导致孤独症患儿社交、沟通障碍的关键神经病理机制之一^[54,55]。廖文静等人利用 fNIRS 检测 20 例注意缺陷多动障碍(ADHD)患儿及 20 例正常儿童静息态下的脑皮层信息,结果发现 ADHD 儿童大脑静息态下脑区自发活动增强,且这一异常情况与多动症状严重程度显著相关^[56]。同时,ADHD 患儿大脑存在与任务无关的非典型动态网络的激活,这一现象可能与 ADHD 患儿无法抑制与任务无关的功能活动有关。Monden 等人通过 fNIRS 检测 12 例 ADHD 患儿大脑活动情况发现药物(哌甲酯)治疗后认知功能改善与患儿右外侧前额叶皮质的激活有关,结果表明大脑激活情况可作为检测 ADHD 患儿药物治疗效果的生物指标^[57],为疾病诊疗随访过程提供一个辅助诊断工具。

共识意见: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,为脑功能障碍(脑性瘫痪、孤独症谱系障碍、注意力缺陷多动障碍等)提供定量的脑功能检测指标,对于疾病的识别、评价、疗效评估、疗效预测具有重要的临床价值。

2.4 fNIRS 在神经退行性疾病领域的临床应用 阿尔茨海默病(Alzheimer disease,AD)是发生于老年前期的中枢神经退行性病变。轻度认知功能障碍(Mild cognitive impairment,MCI)是 AD 的早期征兆,MCI 的有效诊断有利于预防认知障碍的持续发展。fNIRS 可检测大脑中与认知障碍疾病相关的脑功能特异性改变,用于 AD 的诊断与评价^[58,59]。利用 fNIRS 检测 8 例 MCI 患者和 16 例健康对照者发现 MCI 人群左侧额叶和颞叶激活下降,这一结果提示 fNIRS 信号可以作为 AD 早期诊断的指标^[60]。Arai 等人通过 fNIRS 对 15 例 AD 患者、15 例 MCI 患者和 32 例正常对照组在言语流畅测试任务下进行

脑功能检测,结果发现脑功能激活情况与认知障碍程度存在显著相关^[61]。基于视空间及短期记忆任务下 11 例正常人和 11 例 AD 患者的 fNIRS 信号计算的复杂度指标对认知障碍的识别具有良好的特异性和敏感性^[62]。利用 fNIRS 检测 16 例 MCI 患者在双任务行走状态下的大脑激活情况,发现左侧前额叶的 HbO₂ 与执行功能显著相关,进一步解释了双任务训练促进认知康复的神经机制,并证实了 fNIRS 在认知评估中运用的可行性^[63]。基于 fNIRS 的大脑皮质活动性的检查可以判断认知功能的改善情况,进而进行疗效评价^[43]。首都医科大学宣武医院神经内科利用 fNIRS 进行了为期 90 天的临床观察,检测了 240 例中老年人在参肽茶多酚干预前后的大脑皮层功能状态,并同步进行临床神经心理学量表评估,结果表明干预后认知功能和健康状态得到有效改善,脑功能网络连接增强^[64]。以上应用表明基于 fNIRS 检测的大脑激活及脑网络指标可用于认知功能损伤程度评估及干预措施疗效评价。

帕金森病(Parkinson's disease,PD)是一种中枢神经系统变性疾病,常伴有黑质纹状体神经末梢退行性改变^[65]。PD 患者由于多巴胺缺乏导致运动神经环路受损,引起大脑皮质在内的广泛的功能和结构改变^[66]。皮质-基底节-丘脑-皮质作为锥体外系环路,通过基底节和丘脑分别与不同的大脑皮质区相联系,如运动前区、背外侧前额区、辅助运动区等,主要参与运动障碍疾病的发病机制^[67,68]。PD 常伴有震颤、静坐不能等典型运动功能障碍,难以静止平卧或执行一些行为运动任务,常规影像学检查如 fMRI 无法提供帮助,因此临床上对 PD 的诊断主要依赖于临床表现,缺乏早期临床诊断依据。fNIRS 因具有良好的运动抗干扰性,可直观地反映特异性运动任务下 PD 患者大脑皮质激活情况,为临床提供了一种辅助诊断手段^[69]。与健康对照相比,PD 和轻度 PD 患者在姿势控制任务中前额叶脑区表现出更强的激活程度^[70,71],以代偿运动控制功能的不足。这种代偿机制同时也在 fMRI 研究中得到证明,并且在运动症状越重的患者中表现越明显^[72]。这一研究结果为 PD 患者疾病的运动功能障碍诊断提供依据。通过对 9 例 PD 患者深部脑刺激术(DBS)治疗前后脑功能状态检测发现 DBS 治疗可导致 PD 患者基底神经节向前额叶回路发生功能改变^[73]。利用 fNIRS 对接受 DBS 的 6 例 PD 患者进行了脑皮质激活变化的纵向追踪,结果发现术后患者与运动相关的皮质活动更集中于运动皮层^[74],证实 fNIRS 在干预治疗效果评价方面具有临床应用潜力。

共识意见:fNIRS 技术获取脑血氧信号后结合信号分析方法,提取脑激活、脑网络连接等有效的度量参数,可作为 MCI、AD 及 PD 诊断和评价的生物学指标。此外,fNIRS 可提供与治疗相关的大脑皮质激活、脑网络连接变化信息,在病情程度评估、指导治疗以及疗效评价方面具有重要的临床应用价值。

3. 操作规范

3.1 检测前确认采集探头覆盖正确脑区,推荐的做法是将探头头帽、探头架在标准头模精准定位的特征点,与被试头顶对

应特征点(如全头帽通常参考 Cz 点、前额带状头帽通常参考 Fpz 点、小范围板状头帽通常参考自定义目标区域特征点)对齐。

3.2 预采集和采集时,为确保结果的效度,应关注各通道(设定相邻发射探头-接收探头组成有效通道)的信号质量。原始光强信号曲线应稳定且伴随 1~2Hz 心跳信号波动,同时数值应符合设备设定合理阈值。

3.3 评估环境要求勿将 fNIRS 装置设置在易受过度震动或冲击、电源电压异常变动及日光直射的环境中,以免影响信号质量。

3.4 基于 fNIRS 技术开展脑功能检查时,应注意必须要保证无头发覆盖的额叶与有头发覆盖的其他脑区(如顶叶、颞叶、枕叶)的信号质量,确保检查结果的有效。

4. 总结与展望

随着脑科学与类脑研究被列入十四五规划,中国脑计划从脑科学的神经基础、脑疾病的诊断治疗、脑启发的人工智能等多方面出发全面推进发展。近红外脑功能成像系统作为一种无创、高效的功能神经影像学技术,具有疾病病种适用广泛、应用场景多元、抗运动干扰、抗电磁干扰、支持长时程无创检测、可移动性好等独特优势,使得 fNIRS 技术在脑功能疾病诊断和疗效评估方面得到越来越多的临床应用。

除以上正文所涉及临床应用领域,近年来 fNIRS 也在疼痛^[75]、睡眠障碍^[76]、应激障碍^[77]等方面广泛应用,通过评定与功能障碍相关的大脑异常功能状态,用于指导和优化临床治疗和康复方案设计。在脑科学研究领域,fNIRS 在脑发育、脑退化等方面是应用于大规模临床队列研究理想的神经影像工具之一,在中国脑计划的实施中将发挥不可或缺的重要作用。同时,基于不受电磁信号干扰及较强的运动稳健性优势,fNIRS 与其他影像和电生理技术可进行多技术融合形成多模态脑功能检查,是临床下一步发展的重要方向。在研究层面上,fNIRS 与 EEG、ERPs、fMRI 的技术兼容,将会为揭示康复过程神经环路和网络重建提供更有利的证据支撑。此外,fNIRS 与系统性测量(如心率、血压、呼吸速率等)及行为(如眼动追踪、动作捕捉、同步录像等)相融合,可为临床提供多模态信息,完成对治疗、康复疗效的精准判断,具有良好的临床应用和发展前景。

本共识从临床应用角度出发,系统地描述了 fNIRS 技术在脑卒中神经康复、精神疾病、儿童发育障碍及神经退行性疾病等领域的临床应用价值和意义,可为临床工作者在 fNIRS 的规范应用和结果的合理解读方面提供参考,更好地发挥 fNIRS 技术在中枢神经系统疾病诊疗的应用优势。

编写专家组成员(专家按姓名排序,不分先后):

窦祖林(中山大学附属第三医院)、邓伟(四川大学华西医院)、郭洪波(南方医科大学珠江医院)、韩璎(首都医科大学宣武医院,北京脑重大疾病研究院阿尔茨海默病研究所)、侯新琳(北京大学第一医院)、胡少华(浙江大学医学院第一附属医院)、霍聪聪(北京航空航天大学)、江文宇(广西壮族自治区江滨医院)、李增勇(国家康复辅具研究

中心)、吕泽平(国家康复辅具研究中心附属医院)、李晖(西安交通大学第一附属医院)、李斐(上海交通大学医学院附属新华医院)、李鹏程(海南大学)、谭淑平(北京回龙观医院)、肖农(重庆医科大学附属儿童医院)、许东升(上海中医药大学岳阳中西医结合医院)、徐俊(首都医科大学附属北京天坛医院)、谢海群(佛山市第一人民医院)、吴毅(复旦大学附属华山医院)、汪待发(北京航空航天大学)

参考文献

- Wyatt JS, Cope M, Delpy DT, et al. Quantification of cerebral oxygenation and haemodynamics in sick newborn infants by near infrared spectrophotometry[J]. Lancet, 1986, 328(8515): 1063-1066.
- Ekkekakis P. Illuminating the black box: investigating prefrontal cortical hemodynamics during exercise with near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Sport Exercise Psychology, 2009, 31(4): 505-553.
- Pauling L, Coryell CD. The magnetic properties and structure of hemoglobin, oxyhemoglobin and carbonmonoxyhemoglobin[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1936, 22(4): 210-216.
- Scholkmann F, Kleiser S, Metz AJ, et al. A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology[J]. Neuroimage, 2014, 85(Pt 1): 6-27.
- Liao LD, Tsytsarev VT, Delgado-Martínez I, et al. Neurovascular coupling: in vivo optical techniques for functional brain imaging[J]. Biomedical engineering online, 2013, 12(1): 1-20.
- Nippert AR, Biesecker KR, Newman EA. Mechanisms mediating functional hyperemia in the brain[J]. The Neuroscientist, 2018, 24(1): 73-83.
- Sato H, Yahata N, Funane T, et al. fNIRS-fMRI investigation of prefrontal cortex activity during a working memory task[J]. NeuroImage, 2013, 83(12): 158-173.
- Tachtsidis I, Scholkmann F. False positives and false negatives in functional near-infrared spectroscopy: issues, challenges, and the way forward[J]. Neurophotonics, 2016, 3(3): 031405.
- Roche-Labarbe N, Wallois F, Ponchel E, et al. Coupled oxygenation oscillation measured by NIRS and intermittent cerebral activation on EEG in premature infants[J]. Neuroimage, 2007, 36(3): 718-727.
- Obrig, Hellmuth. NIRS in clinical neurology-a 'promising' tool? [J]. Neuroimage, 2014, 85: 535-546.
- Steinbrink J, Villringer A, Kempf F, et al. Illuminating the BOLD signal: combined fMRI-fNIRS studies[J]. Magnetic resonance imaging, 2006, 24(4): 495-505.
- Wallois F, Mahmoudzadeh M, Patil A, et al. Usefulness of simultaneous EEG-NIRS recording in language studies[J]. Brain language, 2012, 121(2): 110-123.
- Liu N, Cui X, Bryant DM, et al. Inferring deep-brain activity from cortical activity using functional near-infrared spectroscopy[J]. Biomedical optics express, 2015, 6(3): 1074-1089.
- 杨浩, 余秋蓉, 魏彧, 等. 脑卒中运动功能障碍的局部一致性 fMRI 研究[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(1): 10-16.
- 张豪杰, 李芳, 李晁金子, 等. 神经影像在卒中后脑可塑性机制中的应用进展[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(1): 48-53.
- 崔威, 李春光, 徐嘉诚, 等. 功能性近红外光谱技术在神经疾病中的应用[J]. 中国康复理论与实践, 2020, 26(7): 771-774.

- 17 睦演祥,李春光,胡海燕,等. 基于近红外脑功能成像技术的脑卒中研究现状[J]. 中国康复,2016,31(5):387-389.
- 18 Kato H, Izumiya 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.
- 19 Takeda K, Gomi Y, Imai I, et al. Shift of motor activation areas during recovery from hemiparesis after cerebral infarction: a longitudinal study with near-infrared spectroscopy[J]. Neuroscience Research, 2007, 59(2): 136-144.
- 20 Carey JR, Kimberley TJ, Lewis SM, et al. Analysis of fMRI and finger tracking training in subjects with chronic stroke[J]. Brain, 2002, 125(4): 773-788.
- 21 Huo C, Xu G, Li Z, et al. Limb linkage rehabilitation training-related changes in cortical activation and effective connectivity after stroke: a functional near-infrared spectroscopy study[J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 6226.
- 22 Hara Y, Obayashi S, Tsujiuchi K, et al. The effects of electromyography-controlled functional electrical stimulation on upper extremity function and cortical perfusion in stroke patients[J]. Clin Neurophysiol, 2013, 124(10): 2008-2015.
- 23 Miyai I, Yagura H, Oda I, et al. Premotor cortex is involved in restoration of gait in stroke[J]. Ann Neurol, 2002, 52(2): 188-194.
- 24 Mihara M, Miyai I, Hattori N, et al. Cortical control of postural balance in patients with hemiplegic stroke[J]. Neuroreport, 2012, 23(5): 314-319.
- 25 Fujimoto H, Mihara M, Hattori N, et al. Cortical changes underlying balance recovery in patients with hemiplegic stroke[J]. Neuroimage, 2014, 85 Pt 1: 547-554.
- 26 Park SW, Butler AJ, Cavalheiro V, et al. Changes in serial optical topography and TMS during task performance after constraint-induced movement therapy in stroke: a case study[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2004, 18(2): 95-105.
- 27 Cao J, Khan B, Hervey N, et al. Evaluation of cortical plasticity in children with cerebral palsy undergoing constraint-induced movement therapy based on functional near-infrared spectroscopy[J]. J Biomed Opt, 2015, 20(4): 046009.
- 28 Huo C, Li X, Jing J, et al. Median nerve electrical stimulation-induced changes in effective connectivity in patients with stroke as assessed with functional near-infrared spectroscopy[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2019, 33(12): 1008-1017.
- 29 荆静, 马艳平, 刘万林, 等. 正中神经电刺激治疗卒中后认知障碍的康复疗效及机制探讨[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2020, 42(3): 215-220.
- 30 Lin PY, Chen JJJ, Lin SI. The cortical control of cycling exercise in stroke patients: an fNIRS study[J]. Human brain mapping, 2013, 34(10): 2381-2390.
- 31 张颖彬, 莫林宏, 聂忆秋, 等. 近红外脑功能成像在重复经颅磁刺激治疗卒中后轻度认知功能障碍的应用[J]. 首都医科大学学报, 2020, 41(6): 965-969.
- 32 Takizawa R, Fukuda M, Kawasaki S, et al. Neuroimaging-aided differential diagnosis of the depressive state[J]. Neuroimage, 2014, 85(1): 498-507.
- 33 Aleksandrowicz A, Hagenmuller F, Haker H, et al. Frontal brain activity in individuals at risk for schizophrenic psychosis and bipolar disorder during the emotional Stroop task-an fNIRS study[J]. NeuroImage: Clinical, 2020, 26: 102232.
- 34 Takizawa R, Kasai K, Kawakubo Y, et al. Reduced frontopolar activation during verbal fluency task in schizophrenia: a multi-channel near-infrared spectroscopy study[J]. Schizophrenia research, 2008, 99(1-3): 250-262.
- 35 Ono Y, Kikuchi M, Hirokawa T, et al. Reduced prefrontal activation during performance of the Iowa Gambling Task in patients with bipolar disorder[J]. Psychiatry Research: Neuroimaging, 2015, 233(1): 1-8.
- 36 Kinou M, Takizawa R, Marumo K, et al. Differential spatiotemporal characteristics of the prefrontal hemodynamic response and their association with functional impairment in schizophrenia and major depression[J]. Schizophrenia research, 2013, 150(2-3): 459-467.
- 37 Noda T, Nakagome K, Setoyama S, et al. Working memory and prefrontal/temporal hemodynamic responses during post-task period in patients with schizophrenia: A multi-channel near-infrared spectroscopy study[J]. Journal of psychiatric research, 2017, 95: 288-298.
- 38 McIntyre RS, Anderson N, Baune BT, et al. Expert Consensus on Screening and Assessment of Cognition in Psychiatry. CNS spectrums, 2019; 1-9.
- 39 Tomioka H, Yamagata B, Kawasaki S, et al. A Longitudinal Functional Neuroimaging Study in Medication-Nave Depression after Antidepressant Treatment[J]. Plos One, 2015, 10(3): e0120828.
- 40 Shinba T, Kariya N, Matsuda S, et al. Increase of frontal cerebral blood volume during transcranial magnetic stimulation in depression is related to treatment effectiveness: A pilot study with near - infrared spectroscopy[J]. Psychiatry clinical neurosciences, 2018, 72(8): 602-610.
- 41 Curtin A, Ayaz H, Tang Y, et al. Enhancing neural efficiency of cognitive processing speed via training and neurostimulation: An fNIRS and TMS study[J]. Neuroimage, 2019, 198: 73-82.
- 42 Lu Q, Lai J, Lu H, et al. Gut microbiota in bipolar depression and its relationship to brain function: an advanced exploration[J]. Front Psychiatry, 2019, 10: 784.
- 43 杨健, 刘钊. 功能近红外脑成像在儿科临床中的应用[J]. 中华实用儿科临床杂志, 2014, 29(18): 1363-1367.
- 44 张晓燕, 李改莲, 刘俐. 早产儿脑发育及脑功能的评价[J]. 中国妇幼保健研究, 2007, 18(5): 389-391.
- 45 Watanabe H, Shitara Y, Aoki Y, et al. Hemoglobin phase of oxygenation and deoxygenation in early brain development measured using fNIRS[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2017, 114(9): E1737-E1744.
- 46 Imai M, Watanabe H, Yasui K, et al. Functional connectivity of the cortex of term and preterm infants and infants with Down's syndrome[J]. Neuroimage, 2014, 85(Pt 1): 272-278.
- 47 Reyes LD, Wijekumar S, Magnotta VA, et al. The functional brain networks that underlie visual working memory in the first two years of life[J]. NeuroImage, 2020, 219: 116971.
- 48 Safyer P, Volling BL, Wagley N, et al. More than meets the eye: The

- neural development of emotion face processing during infancy[J]. Infant Behavior Development, 2020, 59: 101430.
- 49 Nakato E, Otsuka Y, Kanazawa S, et al. Distinct differences in the pattern of hemodynamic response to happy and angry facial expressions in infants-a near-infrared spectroscopic study. [J]. Neuroimage, 2011, 54(2): 1600-1606.
 - 50 Bulgarelli C, de Klerk CCJM, Richards JE, et al. The developmental trajectory of Fronto-temporoparietal connectivity as a proxy of the default mode network; a longitudinal fNIRS investigation[J]. Hum Brain Mapp, 2020, 41(10): 2717-2740.
 - 51 Yang J, Kanazawa S, Yamaguchi MK, et al. Cortical response to categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy[J]. PNAS, 2016, 113(9): 2370-2375.
 - 52 Tian F, Delgado MR, Dhamne SC, et al. Quantification of functional near infrared spectroscopy to assess cortical reorganization in children with cerebral palsy[J]. Opt Express, 2010, 18(25): 25973-25986.
 - 53 王智, 田婧, 朱紫桥. 应用功能性近红外光谱技术检测自闭症者脑功能的研究进展[J]. 现代特殊教育, 2020(10): 64-72.
 - 54 Weak network efficiency in young children with Autism Spectrum Disorder: Evidence from a functional near-infrared spectroscopy study [J]. Brain & Cognition, 2016, 108(oct.): 47-55.
 - 55 Kita Y, Gunji A, Inoue Y, et al. Self-face recognition in children with autism spectrum disorders: a near-infrared spectroscopy study [J]. Brain Dev, 2011, 33(6): 494-503.
 - 56 廖文静, 朱兆军, 牛海晶, 等. 注意缺陷多动障碍患儿近红外脑成像的低频振幅研究[J]. 中国儿童保健杂志, 2020, 28(1): 19-22, 36.
 - 57 Sutoko S, Monden Y, Tokuda T, et al. Atypical dynamic-connectivity recruitment in attention-deficit/hyperactivity disorder children; an insight into task-based dynamic connectivity through an fNIRS study [J]. Front Hum Neurosci, 2020, 14: 3.
 - 58 Yang D, Hong KS, Yoo SH, et al. Evaluation of neural degeneration biomarkers in the prefrontal cortex for early identification of patients with mild cognitive impairment; an fNIRS study[J]. Front Hum Neurosci, 2019, 13: 317.
 - 59 Chou P H, Lan T H. The role of near-infrared spectroscopy in Alzheimer's disease[J]. Journal of Clinical Gerontology and Geriatrics, 2013, 4(2): 33-36.
 - 60 Niu HJ, Li X, Chen YJ, et al. Reduced frontal activation during a working memory task in mild cognitive impairment: a non-invasive near-infrared spectroscopy study [J]. CNS Neurosci Ther, 2013, 19(2): 125-131.
 - 61 Arai H, Takano M, Miyakawa K, et al. A quantitative near-infrared spectroscopy study: a decrease in cerebral hemoglobin oxygenation in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment[J]. Brain Cogn, 2006, 61(2): 189-194.
 - 62 Perpetuini D, Chiarelli AM, Cardone D, et al. Complexity of frontal cortex fNIRS can support Alzheimer disease diagnosis in memory and visuo-spatial tests[J]. Entropy, 2019, 21(1): 26.
 - 63 Doi T, Makizako H, Shimada H, et al. Brain activation during dual-task walking and executive function among older adults with mild cognitive impairment; a fNIRS study [J]. Aging Clin Exp Res, 2013, 25(5): 539-544.
 - 64 倪良卉, 胡振燕, 杨勤, 等. 参肽茶多酚改善中老年人记忆功能的临床研究[J]. 中华神经医学杂志, 2020, 19(11): 1142-1148.
 - 65 Dagher A. Functional Imaging in Parkinson's Disease[J]. Seminars in Neurology, 2001, 21(1): 23-32.
 - 66 Dagher A, Nagano-Saito A. Functional and Anatomical Magnetic Resonance Imaging in Parkinson's Disease[J]. Molecular Imaging & Biology, 2007, 9(4): 234-242.
 - 67 Klein C, Lohmann-Hedrich K, Rogaeva E, et al. Deciphering the role of heterozygous mutations in genes associated with Parkinsonism[J]. Lancet Neurol, 2007, 6(7): 652-662.
 - 68 Binkofski F, Reetz K, Gaser C, et al. Morphometric fingerprint of asymptomatic Parkin and PINK₁ mutation carriers in the basal Ganglia [J]. Neurology, 2007, 69(9): 842-850.
 - 69 朱志中, 于洋, 于宁波, 等. 脑功能成像技术在帕金森病步态障碍中的应用进展[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2020, 20(12): 1104-1108.
 - 70 Mahoney JR, Holtzer R, Izzetoglu M, et al. The role of prefrontal cortex during postural control in Parkinsonian syndromes a functional near-infrared spectroscopy study[J]. Brain Research, 2016: 126-138.
 - 71 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]. Neurorehabil Neural Repair, 2016, 30(10): 963-971.
 - 72 Mallol R, Barrós-Loscertales A, López M, et al. Compensatory cortical mechanisms in Parkinson's disease evidenced with fMRI during the performance of pre-learned sequential movements [J]. Brain Res, 2007, 1147: 265-271.
 - 73 Mayer JS, Neimat J, Folley BS, et al. Deep brain stimulation of the subthalamic nucleus alters frontal activity during spatial working memory maintenance of patients with Parkinson's disease[J]. Neurocase, 2016, 22(4): 369-378.
 - 74 Morishita T, Higuchi MA, Saita K, et al. Changes in motor-related cortical activity following deep brain stimulation for Parkinson's disease detected by functional near infrared spectroscopy: a pilot study [J]. Front Hum Neurosci, 2016, 10: 629.
 - 75 Karunakaran KD, Peng K, Berry D, et al. NIRS measures in pain and analgesia: Fundamentals, features, and function [J]. Neurosci Biobehav Rev, 2021, 120: 335-353.
 - 76 Sun JJ, Liu XM, Shen CY, et al. Reduced prefrontal activation during verbal fluency task in chronic insomnia disorder; a multichannel near-infrared spectroscopy study [J]. Neuropsychiatr Dis Treat, 2017, 13: 1723-1731.
 - 77 任克, 汪待发, 刘松柏, 等. 近红外脑功能成像技术(fNIRS)在应激障碍治疗中的研究进展[J]. 中华卫生应急电子杂志, 2021, 6(6): 369-371.

收稿日期: 2021-2-28