

• 科研论著 •

近红外脑功能成像技术结合行为评估在 注意缺陷多动障碍诊断中的效能分析

张茜¹, 任姣姣², 高红², 白瑞北², 王朝晖^{1,2}

1. 陕西中医药大学, 第一临床医学院, 陕西 咸阳 712099; 2. 西安市人民医院(西安市第四医院)儿童保健科

摘要: **目的** 采用近红外脑功能成像技术(fNIRS)探索注意缺陷多动障碍(ADHD)儿童在任务态下前额叶皮层(PFC)脑激活水平,及其与行为评估方法结合后在 ADHD 中的区分能力及诊断价值,为 ADHD 的早期诊断提供依据。**方法** 选取 2023 年 7 月—2024 年 7 月在西安市人民医院(西安市第四医院)儿童保健科就诊的 40 例 ADHD 儿童和同期来院健康体检的 30 名健康儿童为研究对象,在言语流畅性任务(VFT)下采用 22 通道 fNIRS 设备采集前额叶氧合血红蛋白(HbO₂)浓度变化以反映其 PFC 的激活情况。完成 Conners 父母症状问卷(PSQ),将 PSQ 与前额叶 HbO₂ 值进行相关性分析及受试者工作特征曲线(ROC)分析,以探讨 HbO₂ 联合 PSQ 在 ADHD 诊断中的敏感度和特异度。**结果** ADHD 儿童在右侧背外侧前额叶皮层(rDLPFC)、左侧背外侧前额叶皮层(IDLPFC)、右侧额极皮层(rFPC)、内侧前额叶皮层(mFPC)、布罗德曼 8 区(BA8)的 HbO₂ 水平低于健康儿童($Z=4.115, 2.363, 3.591, 2.578, 2.936, P<0.05$),ADHD 儿童在 PSQ 评估中的品行、学习问题、冲动-多动、多动指数各因子分均高于健康组儿童($Z=3.827, 4.065, 5.531, 4.827, P<0.05$)。学习问题与 rDLPFC、rFPC、mFPC 的 HbO₂ 呈负相关($r=-0.336, -0.412, -0.310, P<0.05$),冲动-多动与 mFPC 的 HbO₂ 呈负相关($r=-0.382, P<0.05$),多动指数与 rDLPFC、rFPC、mFPC、BA8 的 HbO₂ 呈负相关($r=-0.393, -0.445, -0.431, -0.339, P<0.05$)。rDLPFC、IDLPFC、rFPC、lPFC、mFPC、BA8 脑区的 HbO₂ 联合多动指数的 ROC 曲线的 AUC 分别为 0.884、0.877、0.883、0.900、0.896、0.884,均大于 HbO₂ 及多动指数单独预测的 AUC。**结论** ADHD 儿童 PFC 功能受损,前额叶 HbO₂ 值联合 PSQ 在 ADHD 诊断中具有价值。

关键词: 注意缺陷多动障碍; 近红外光谱成像; 前额叶皮层; 氧合血红蛋白; 行为评估

中图分类号:R749.94 文献标识码:A 文章编号:1008-6579(2025)04-0402-07 doi:10.11852/zgetbjzz2024-1153

Diagnostic performance of functional near-infrared spectroscopy combined with behavioral assessment in attention-deficit hyperactivity disorder

ZHANG Xi¹, REN Jiaojiao², GAO Hong², BAI Ruibei², WANG Zhaohui^{1,2}

1. The First Clinical Medical School, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang, Shaanxi 712099, China;

2. The Children's Health Department, Xi'an People's Hospital (Xi'an Fourth Hospital)

Corresponding author: WANG Zhaohui, E-mail: 745024118@qq.com

Abstract: **Objective** To explore the prefrontal cortex (PFC) activation levels in children with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) during task states using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), and to evaluate the diagnostic value of combining PFC activation with behavioral assessments for distinguishing ADHD, so as to provide a basis for early diagnosis. **Methods** A total of 40 children diagnosed with ADHD and 30 healthy children undergoing routine health check-ups at the Children's Health Department of Xi'an People's Hospital (Xi'an Fourth Hospital) from July 2023 to July 2024 were recruited. A 22-channel fNIRS device was used to measure changes in oxygenated hemoglobin (HbO₂) concentration in the PFC during a verbal fluency task (VFT). The Conners Parent Symptom Questionnaire (PSQ) was administered, and correlations between PSQ scores and PFC HbO₂ levels were analyzed. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis was performed to assess the sensitivity and specificity of combining HbO₂ levels with PSQ scores for ADHD diagnosis. **Results** Compared to healthy children, ADHD children exhibited significantly lower HbO₂ levels in the right dorsolateral prefrontal cortex (rDLPFC), left dorsolateral prefrontal cortex (IDLPFC), right frontopolar cortex (rFPC), medial prefrontal cortex (mFPC), and Brodmann area 8 (BA8) ($Z=4.115, 2.363, 3.591, 2.578, 2.936, P<0.05$). ADHD children also scored higher on the PSQ subscales for conduct problems, learning problems, impulsivity-hyperactivity, and hyperactivity index ($Z=3.827, 4.065, 5.531, 4.827, P<0.05$). Negative correlations were observed

基金项目:陕西省科技厅研究项目(2022SF-519)

作者简介:张茜(1992—),女,硕士研究生在读,主要研究方向为儿童心理行为疾病。

通信作者:王朝晖, E-mail: 745024118@qq.com

between learning problems and HbO_2 levels in the rDLPFC, rFPC, and mFPC ($r = -0.336, -0.412, -0.310, P < 0.05$), between impulsivity-hyperactivity and HbO_2 levels in the mFPC ($r = -0.382, P < 0.05$), and between the hyperactivity index and HbO_2 levels in the rDLPFC, rFPC, mFPC, and BA8 ($r = -0.393, -0.445, -0.431, -0.339, P < 0.05$). The area under the ROC curve (AUC) for the combined prediction of ADHD using HbO_2 levels in the rDLPFC, IDLPFC, rFPC, lFPC, mFPC, and BA8 along with the hyperactivity index was 0.884, 0.877, 0.883, 0.900, 0.896, and 0.884, respectively, all of which were higher than the AUCs for HbO_2 levels or the hyperactivity index alone. **Conclusion** Children with ADHD exhibit impaired PFC function, and the combination of PFC HbO_2 levels and PSQ scores demonstrates significant diagnostic value for ADHD.

Keywords: attention-deficit hyperactivity disorder; near-infrared spectroscopic imaging; prefrontal cortex; oxygenated haemoglobin; behavioral assessment

注意缺陷多动障碍(attention deficit hyperactivity disorder, ADHD)是一种常见的儿童神经发育性障碍,主要特征表现为注意力难以集中、多动和冲动行为,这些症状严重影响了儿童的学业成绩和日常生活质量^[1]。所以早发现、早诊断、早干预尤为重要。ADHD 的病因尚不完全明确,研究发现,ADHD 儿童的核心症状与大脑结构和功能异常密切相关,前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)功能障碍在其病理生理中起关键作用^[2]。PFC 在一系列高级认知功能中起着核心作用,负责注意力控制、执行功能和情绪调节等,这些功能在 ADHD 患者中往往存在缺陷^[3]。

传统的 ADHD 诊断主要是行为学诊断,对其症状及功能的评估主要依赖于临床访谈、量表评估和神经心理学测验^[4],因此缺乏客观量化的诊断指标。近年来,随着新技术和工具的引入,ADHD 的评估在此基础上取得了更多进展。功能性近红外光谱成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)基于“神经血管耦合”原理,通过测量大脑皮层区域的氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO_2)和脱氧血红蛋白(deoxyhemoglobin, HbR)浓度间接反映脑区的血流动力学变化,低水平的 HbO_2 浓度变化说明脑区的神经活动不足或功能低下^[5]。fNIRS 不仅可以在静息态下检测 ADHD 儿童的脑功能连接,更重要的是,在任务态下, fNIRS 能够实时监测大脑的血氧变化,捕捉个体在执行认知任务时的神经活动,从而反映 ADHD 儿童在注意力维持、冲动控制及工作记忆等方面的功能异常^[6-7]。然而,单独依赖神经成像数据也不足以提供全面的诊断依据,因此,本次研究通过 fNIRS 评价 ADHD 儿童在任务态下的前额叶皮层功能,同时联合行为评估工具研究其在 ADHD 诊断中的价值。

1 对象和方法

1.1 对象 以 2023 年 7 月—2024 年 7 月在西安市

人民医院(西安市第四医院)儿童保健科心理行为门诊确诊的 ADHD 患儿为研究对象,纳入标准:1)首次确诊且未接受任何治疗;2)年龄为 6~14 岁;3)韦氏儿童智力量表-第四版(Wechsler Intelligence Scale for Children-Fourth Edition, WISC-IV)总智商(IQ) ≥ 80 ;4)符合美国《精神障碍诊断与统计手册(第 5 版)》(The Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Five edition, DSM-5)诊断标准^[4]。排除标准:共患精神障碍性疾病、神经系统器质性疾病者和躯体疾病。对照组为同期在门诊健康体检的年龄、性别相匹配的健康儿童。本研究通过西安市人民医院(西安市第四医院)伦理委员会批准(20220027),所有研究对象均在知情同意的情况下参加,并且由父母签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 fNIRS 数据采集 数据采集在一个安静、光线控制良好的房间中进行,以避免环境噪声和光线变化对近红外数据的干扰。使用 ETG-ONE(日本日立公司)脑功能成像仪采集入组儿童的脑功能数据,采样频率为 10Hz,波长为 695nm 和 830nm,探测深度为头皮下 20~30nm。测量通道有 22 个,包括 8 个近红外光的发射器和 7 个检测器,排布见图 1。探头的安置根据脑电图 10-20 系统部署在前额叶区。根据 Kruppa 等^[8]的额叶区域划分定义感兴趣区域。见表 1。

言语流畅性任务(verbal fluency task, VFT)做的大脑前额叶血流动力学反应的刺激任务。被试儿童坐在舒适的椅子上,保持放松,操作人员为被试儿童调整探头使其紧贴头皮。整个 VFT 任务态数据采集过程为 170s,任务开始的前 30s 与后 70s,要求被试儿童重复数数“12345”进行基线数据采集。第 30s 后计算机发出指令,儿童进入组词任务阶段,每 20s 更换一个字进行组词,共持续 600 个采样点。采集数据内容为原始 fNIRS 信号时间序列,包含 HbO_2 、 HbR 和总血红蛋白的相对浓度变化以及信

号数据[本研究中为二维(2D)光极]。上述操作均由经过专业培训的医务工作者完成。

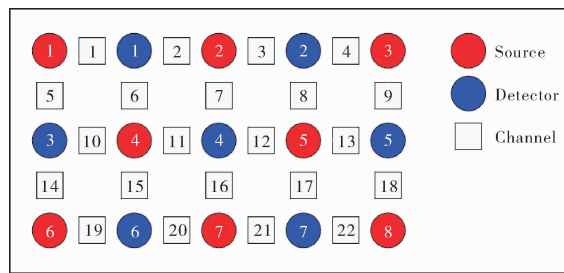


图 1 3×5 光极排列图

Fig. 1 3×5 optode configuration

表 1 通道对应的前额叶感兴趣区域

Tab. 1 Distribution of regions of interest in the prefrontal cortex corresponding to channels

通道	感兴趣区域
CH17, CH18, CH22	右侧背外侧前额叶皮层(rDLPFC)
CH14, CH15, CH19	左侧背外侧前额叶皮层(lDLPFC)
CH4, CH8, CH9, CH13	右侧额极皮层(rFPC)
CH1, CH5, CH6, CH10	左侧额极皮层(lFPC)
CH2, CH3, CH7, CH11, CH12, CH16	内侧前额叶皮层(mFPC)
CH20, CH21	布罗德曼 8 区(BA8)

1.2.2 行为学评估 Conners 父母症状问卷(Par-ent Symptom Questionnaire, PSQ)适用于 3~17 岁儿童,是主要用于评估 ADHD 和相关行为的具有良好信度和效度的工具^[9]。PSQ 结构完整,涵盖了 5 个行为维度:品行问题、学习问题、身心问题、焦虑、冲动-多动。父母需根据儿童在家庭环境中的表现对每个条目进行评分。评分采用 4 点制,即“0=从不,1=有时,2=经常,3=总是”,总得分和各个维度的得分与常模数据进行比较,最终以多动指数 ≥ 1.5 作为划界限,得分大于此分即有多动症的可能。

1.3 fNIRS 数据预处理 1)使用基于 MATLAB 的跨平台工具箱 NIRS-KIT^[10]对近红外光学信号数据进行分析。将采集到原始光强度数据,转换为光密度数据,然后通过修正的 Beer-Lambert 定律^[11],转换后的血红蛋白浓度数据以 NIRS-KIT 数据格式(.mat)保存。2)预览原始数据以查看数据特征并检查数据质量,检查生理噪声、时域、频域或空间特征的头部运动伪迹,剔除不合格数据。3)对数据进行前 15s 和后 15s 数据剪切,线性去漂移,使用 TDDR 方法进行头动伪迹校正、噪声回归,并通过三阶 IIR 巴特沃斯带通滤波器(0.01~0.08Hz)进行滤波。4)根据实验条件设计矩阵,基于一般线性模型进行个体水平分析得出 HbO₂ 和 HbR 的个体血氧响应强度(β 值)。计算每个通道在目标周期的 HbO₂ 浓

度变化的平均值,根据感兴趣区域对分类通道进行平均,提取目标期间 HbO₂ 变化,以 ΔHbO_2 (mM·mm)表示。在这项研究中,只关注 HbO₂ 的变化,因为在检测局部脑血液循环的差异中,该信号已被证明比 HbR 更敏感^[12]。

1.4 统计学方法 采用 SPSS 27.0 软件进行数据统计分析,对计量资料进行正态分布和方差齐性检验,符合正态分布和方差齐性的数据,以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用独立样本 t 检验分析比较两组均数。不符合正态分布和方差齐性的数据,以 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示,两组数据比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料用例数(%)表示,组间比较采用 χ^2 检验。相关性分析使用 Spearman 相关分析。采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线来评价 HbO₂ 浓度联合 PSQ 在 ADHD 诊断中的价值。所有统计检验均采用双侧检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

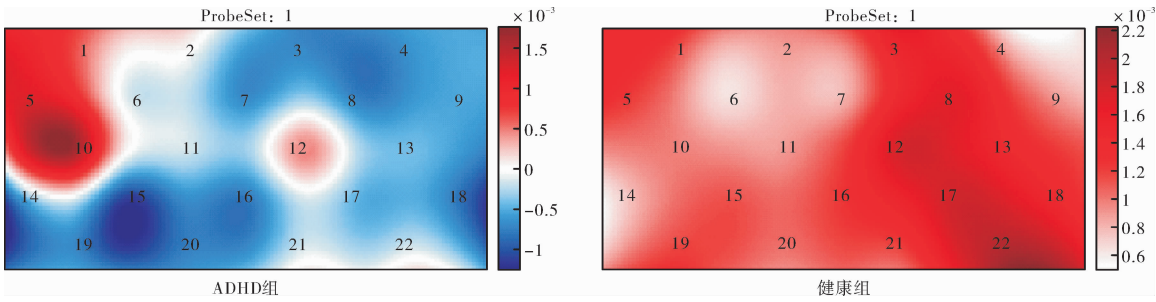
2 结果

2.1 一般人口学特征 研究纳入 70 名被试,40 例 ADHD 儿童和 30 例健康儿童,ADHD 组男 34 例,女 6 例,平均年龄(9.90 $\pm$ 0.33)岁,平均智商 104.88 $\pm$ 10.88。健康组男 21 例,女 9 例,平均年龄(9.29 $\pm$ 0.40)岁,平均智商 108.97 $\pm$ 12.17。两组儿童的年龄($t=0.939$)、性别($\chi^2=2.291$)、智商($t=-1.480$)差异均无统计学意义($P > 0.05$)。

2.2 ADHD 组与健康组儿童前额叶激活情况 通过数据预处理后,采用 NIRS-KIT 工具包得到 VFT 任务态下 ADHD 组和健康组儿童前额叶大脑激活情况(与基线值 $\beta=0$ 相比)。见图 2。ADHD 组儿童在 VFT 务中被激活的通道为 CH1、CH5、CH10、CH12;健康组儿童在 VFT 任务中 22 通道均处于激活状态,其中 CH3、CH8、CH12、CH17、CH22 显著激活。两组儿童在 VFT 任务第 300 采样点至第 900 采样点之间的 HbO₂ 平均浓度变化比较见表 2,ADHD 儿童在 lDLPFC、rDLPFC、rFPC、mFPC、BA8 区域的 HbO₂ 值均小于健康组儿童,差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.3 ADHD 儿童与健康组儿童的行为学评估结果 ADHD 儿童的品行、学习问题、冲动-多动、多动指数因子分高于健康组儿童,差异有统计学意义($P < 0.05$)。见表 3。

2.4 ADHD 儿童前额叶 HbO₂ 值与行为的相关性分析结果 前额叶 HbO₂ 浓度变化与 PSQ 各因子评分之间做相关性分析,学习问题与 rDLPFC($r=$



注:颜色梯度表示 β 值,代表这些通道在任务期间的激活水平。颜色越深, β 值绝对值越大,红色表示正 β 值,激活水平显著高于零,蓝色表示负 β 值,激活水平显著低于零。

图 2 ADHD 组与健康组儿童在 VFT 任务下大脑激活通道图

Fig. 2 Brain activation channels during the verbal fluency task(VFT)in children with ADHD compared to healthy controls

表 2 ADHD 组与健康组儿童前额叶 ΔHbO_2 ($\text{mM} \cdot \text{mm}$)比较 [$M(P_{25}, P_{75})$]
Tab. 2 Comparison of prefrontal cortex ΔHbO_2 ($\text{mM} \cdot \text{mm}$)between children with ADHD group and healthy group [$M(P_{25}, P_{75})$]

感兴趣区域	ADHD($n=40$)	健康组($n=40$)	Z 值	P 值
rDLPFC	-0.000 72(-0.002 39,0.001 08)	0.001 66(0.001 34,0.003 06)	4.115	<0.001
lDLPFC	-0.000 17(0.003 41,0.002 19)	0.000 81(0.000 04,0.002 40)	2.363	0.018
rFPC	-0.000 57(-0.002 32,0.000 96)	0.001 54(0.001 05,0.001 73)	3.591	<0.001
lFPC	0.001 42(-0.001 10,0.002 83)	0.001 56(0.000 05,0.001 56)	0.030	0.976
mFPC	-0.000 42(-0.001 81,0.001 82)	0.001 01(0.000 46,0.001 01)	2.578	0.010
BA8	-0.001 03(-0.001 62,0.000 84)	0.000 187(0.000 18,0.003 09)	2.936	0.003

表 3 ADHD 儿童与健康组儿童的 PSQ 结果 [$M(P_{25}, P_{75})$]
Tab. 3 Comparison of PSQ results between children with ADHD group and healthy group [$M(P_{25}, P_{75})$]

因子	ADHD 组($n=40$)	健康组($n=30$)	Z 值	P 值
品行	0.96(0.58,1.48)	0.42(0.25,0.69)	3.827	<0.001
学习问题	1.56(1.00,2.00)	0.75(0.43,1.00)	4.065	<0.001
身心	0.20(0.00,0.71)	0.00(0.00,0.25)	1.837	0.066
冲动-多动	1.50(0.15,1.90)	0.50(0.25,0.81)	5.531	<0.001
焦虑	0.50(0.25,0.93)	0.25(0.00,0.56)	1.595	0.111
多动指数	1.25(0.97,1.61)	0.50(0.30,0.85)	4.827	<0.001

-0.336)、rFPC($r=-0.412$)、mFPC($r=-0.310$)呈负相关($P<0.05$);冲动-多动与 mFPC 呈负相关($r=-0.382, P<0.05$);多动指数与 rDLPFC($r=-0.393$)、rFPC($r=-0.445$)、mFPC($r=-0.431$)、BA8($r=-0.339$)呈负相关($P<0.05$)。见表 4。

2.5 前额叶 HbO_2 浓度与 PSQ 中的多动指数的受试者工作特征曲线 在 PSQ 中,多动指数是一个核

表 4 PSQ 各因子与前额叶 HbO_2 相关性分析
Tab. 4 Correlation analysis between PSQ factors and prefrontal cortex HbO_2 concentrations

因子	rDLPFC	lDLPFC	rFPC	lFPC	mFPC	BA8
品行	-0.143	-0.132	-0.181	-0.041	-0.194	-0.306
学习问题	-0.336*	-0.200	-0.412**	-0.302	-0.310*	-0.311
身心	0.077	0.241	0.098	-0.029	0.171	0.020
冲动-多动	-0.149	0.024	-0.116	-0.020	-0.382*	-0.249
焦虑	-0.284	-0.011	-0.264	0.028	0.036	-0.079
多动指数	-0.393*	-0.234	-0.445**	-0.133	-0.431**	-0.339*

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

心因子,如果该指数的评分超过临界值(1.5 分),则表明受评者存在显著多动行为症状。将多动指数、前额叶脑区的 HbO_2 浓度以及二者联合后指标分别做受试者工作特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve,ROC)分析。图中 X 轴表示 1-特异性(假阳性率),Y 轴表示敏感性(真阳性率),曲线下

的面积(AUC)越大,说明该指标的诊断能力越强。见图 3~图 5。rDLPFC、lDLPFC、rFPC、lFPC、mFPC、BA8 的 ROC 的 AUC 值(0.516~0.695)具有一定的区分能力和诊断效能,PSQ 中的多动指数的 AUC 为 0.837,但前额叶各脑区 HbO_2 浓度联合 PSQ 评价的 AUC(0.883~0.900)均大于单独

HbO₂ 浓度及单独多动指数的 AUC。除 IDLPFC 外, HbO₂ 联合 PSQ 的灵敏度也大于单独 HbO₂ 值的灵敏度。见表 5。

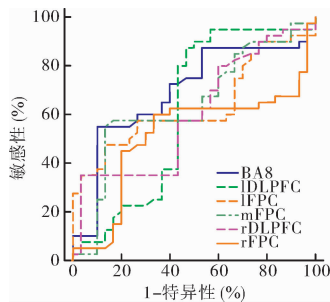


图 3 各脑区 HbO₂ 的 ROC

Fig. 3 ROC curves for HbO₂ concentrations in various brain regions

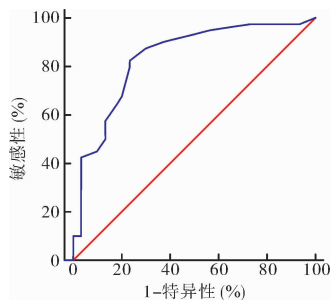


图 4 多动指数的 ROC

Fig. 4 ROC curve for the hyperactivity index

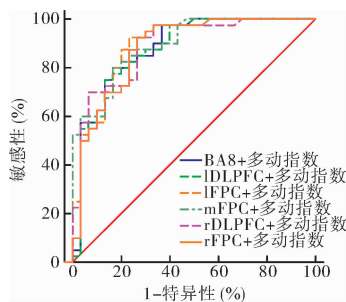


图 5 各脑区 HbO₂ 结合多动指数的 ROC

Fig. 5 ROC curves for HbO₂ concentrations combined with the hyperactivity index across various brain regions

3 讨论

功能成像可以客观地反映大脑皮层的功能状态, 而行为评估能够量化 ADHD 的症状表现, 基于功能成像与行为评价相结合的多模态评估策略, 本研究将 fNIRS 与 PSQ 二者联合, 探索其在 ADHD 诊断中的效能。结果显示, 在任务态下, ADHD 儿童的 IDLPFC、rDLPFC、rFPC、mFPC、BA8 区域的 HbO₂ 浓度显著低于健康儿童, 说明 ADHD 的 PFC

表 5 HbO₂ 与多动指数的 ROC 值

Tab. 5 ROC values for HbO₂ concentrations and hyperactivity index

项目	AUC	最佳临界值	灵敏度(%)	特异度(%)
rDLPFC+多动指数	0.884	0.518	80.0	83.3
IDLPFC+多动指数	0.877	0.544	77.5	83.3
rFPC+多动指数	0.883	0.405	92.5	73.3
IFPC+多动指数	0.900	0.414	92.5	76.7
mFPC+多动指数	0.896	0.535	80.0	83.3
BA8+多动指数	0.884	0.518	80.0	83.3
rDLPFC	0.599	0.156	—	—
IDLPFC	0.611	0.147	87.5	53.3
rFPC	0.516	0.001	60.0	66.7
IFPC	0.633	0.047	47.5	86.7
mFPC	0.642	0.002	55.0	86.7
BA8	0.695	0.011	55.0	90.0
多动指数	0.837	0.800	82.5	76.7

功能受损。ADHD 儿童的行为问题与 PFC 的功能损伤具有相关性, fNIRS 与 PSQ 联合后的 ROC 曲线的 AUC 大于 HbO₂ 值及多动指数的单独预测值, 说明 fNIRS 与行为评估结合的多模态评估方法在 ADHD 诊断中具有重要的临床应用价值。

3.1 ADHD 儿童的 PFC 功能损伤及其与行为的关联 fNIRS 是一种非侵入性神经影像技术, 其原理是利用近红外光来测量 HbO₂ 浓度随时间的变化以反映大脑皮层的功能, 具有无辐射暴露、非侵入性、抗运动伪迹等独特优势^[13]。近年来 fNIRS 在临床研究中得到了广泛的应用, 越来越多的学者利用 fNIRS 来探索 ADHD 大脑血流动力学反应, 发现 ADHD 儿童在执行认知任务状态下的 PFC 功能受损, 例如 Wu 等^[14]利用 fNIRS 发现 ADHD 儿童在 go/no-go 任务中表现出背外侧 PFC 的功能障碍。Miao 等^[15]使用 fNIRS 发现正常儿童在任务态下 IFPC 的 HbO₂ 显著增加, 而 ADHD 儿童则没有显著变化, 这与本次的研究结果一致。VFT 做为一项经典的执行功能任务, 要求被试在有限的时间内生成符合特定规则的词汇, 调动与认知控制、工作记忆和认知灵活性等相关的大脑区域, 尤其是背外侧 PFC、额极皮层及左侧额下回, 是一种能够有效激活 PFC 的任务^[16]。本次研究通过 fNIRS 发现 ADHD 儿童在 VFT 任务态下 PFC 激活程度低于健康儿童, 且 ADHD 儿童的学习问题、多动行为与 rDLPFC 及 rFPC 呈负相关, 这是因为 rDLPFC 和 rFPC 是大脑负责处理复杂认知任务的重要区域, 如抑制、计划、工作记忆等^[17], 当此区域的脑激活水平下降时, 则会导致儿童注意力不集中、任务规划困难和学习成绩下降。ADHD 患者常表现出情绪调节困难和冲动行为, 有研究发现 mFPC 与情绪调节密切相关, 特

别是在抑制冲动行为和情绪冲突时^[18],因此 mFPC 功能受损可能导致 ADHD 患者难以抑制不恰当的情绪反应和冲动行为。位于额中回背外侧部分的 BA8 区域,与 BA6 的前运动皮层共同作用,实现视觉和运动控制网络的连接,不仅成为启动和协调复杂运动控制任务时不可或缺的区域,并且在目标导向行为和决策制定中发挥着重要作用^[19],因此本次研究中 ADHD 儿童常表现出多动和冲动行为,这也可能与 BA8 区域在运动规划和抑制中的作用不足有关。这些区域的低激活状态是由多种神经生物因素共同作用的结果,包括神经递质多巴胺和去甲肾上腺素水平较低^[20],影像学发现 ADHD 儿童灰质和白质体积的减少、前额叶区域与其他脑区功能连接性不足也会导致皮层的低激活^[21]。

3.2 fNIRS 与行为评估联合应用在 ADHD 中的诊断价值 本研究中 fNIRS 与 PSQ 联合后的 AUC、灵敏度大于其单独预测值,说明 fNIRS 联合行为评估的方法在 ADHD 中具有区分能力及诊断价值。ADHD 存在症状的异质性及共患病等问题,所以其诊断长期以来面临诸多挑战。尽管许多评定量表和神经心理测验可用于 ADHD 的辅助诊断,但因为评估方法有一定的主观性,并且对环境的依赖导致不同观察者的评分可能存在差异而导致诊断结果出现偏差。因此,近年来越来越多的研究通过探索 ADHD 的神经标志物来提高 ADHD 早期诊断的准确性,例如,有研究通过全脑白质微结构的分析来识别 ADHD^[22],fMRI 研究发现 ADHD 患者的默认模式网络和执行控制网络之间的功能连接异常是导致注意力缺陷和执行功能障碍的关键因素^[23]。虽然目前尚未发现某种遗传学、影像学或生物化学标志物能够单独用于 ADHD 的诊断^[24],但是本研究通过 fNIRS 对 PFC 的功能评价,可将其做为 ADHD 辅助诊断的一个客观指标,联合行为评定可提高诊断的准确性。

本研究存在一定的局限性,未对 ADHD 的不同亚型进行区分和分析,各亚型可能在前额叶皮层的激活模式以及与行为问题的关联性上存在差异。此外,本次研究 fNIRS 设备未覆盖其它脑区,仅关注了前额叶皮层在任务态下的活动水平。ADHD 儿童的大脑功能异常不仅表现为局部脑区的激活不足,还涉及广泛的脑网络连接障碍,特别是 PFC 作为执行功能和注意力控制的核心区域,与大脑其他功能区域(如顶叶、扣带回和海马区)之间的连接异常^[25]。在今后的研究中,应对 ADHD 不同亚型进行分析,并且进一步探索其他脑区的活动以及不同

脑区之间的功能连接与网络特征。

综上所述,本研究通过 fNIRS 发现儿童 PFC 功能受损,且 PFC 功能异常与 ADHD 症状具有关联性。fNIRS 与行为评估二者联合的多模态评估方法在 ADHD 的诊断中具有价值。在未来的研究中,fNIRS 还可以做为一种动态监测治疗效果的手段,通过定期测量氧合血红蛋白浓度的变化,识别对规范治疗反应不佳的患者。临床医生通过此种方法评估治疗的效果,进而及时调整治疗策略,改善 ADHD 儿童的长期预后。

参考文献

- [1] Posner J, Polanczyk GV, Sonuga-Barke E. Attention-deficit hyperactivity disorder [J]. *Lancet*, 2020, 395 (10222): 450-462.
- [2] Haber SN, Robbins T. The prefrontal cortex [J]. *Neuropsychopharmacol*, 2022, 47(1): 1-2.
- [3] Rubia K, Westwood S, Aggensteiner PM, et al. Neurotherapeutics for attention deficit/hyperactivity disorder (ADHD): A review [J]. *Cells*, 2021, 10(8): 2156.
- [4] Carey C. DSM- 5® Guidebook: The essential companion to the diagnostic and statistical manual of mental disorders [J]. *Ir J Psychol Med*, 2016, 33(2):133 - 134.
- [5] Yeung MK. An optical window into brain function in children and adolescents: A systematic review of functional near-infrared spectroscopy studies [J]. *NeuroImage*, 2021, 227: 117672.
- [6] Pereira-Sanchez V, Castellanos FX. Neuroimaging in attention-deficit/hyperactivity disorder [J]. *Curr Opin Psychiatry*, 2021, 34(2): 105-111.
- [7] Gu Y, Miao S, Han J, et al. Complexity analysis of fNIRS signals in ADHD children during working memory task [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 829.
- [8] Kruppa JA, Reindl V, Gerloff C, et al. Brain and motor synchrony in children and adolescents with ASD-a fNIRS hyperscanning study [J]. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2021, 16 (1-2): 103-116.
- [9] 范娟,杜亚松,王立伟. Conners 父母用症状问卷的中国城市常模和信度研究 [J]. *上海精神医学*, 2005, 17(6): 321-323. Fan J, Du YS, Wang LW. The norm and reliability of the Conners Parent Symptom Questionnaire in Chinese urban children [J]. *Shanghai Arch Psychiatry*, 2005, 17(6): 321-323. (in Chinese)
- [10] Hou X, Zhang Z, Zhao C, et al. NIRS-KIT: A MATLAB toolbox for both resting-state and task fNIRS data analysis [J]. *Neurophotonics*, 2021, 8(1):010802.
- [11] Kocsis L, Herman P, Eke A. The modified Beer-Lambert law revisited [J]. *Phys Med Biol*, 2006, 51(5): N91-98.
- [12] Eggebrecht AT, White BR, Ferradal SL, et al. A quantitative spatial comparison of high-density diffuse optical tomography and fMRI cortical mapping [J]. *NeuroImage*, 2012, 61(4): 1120-1128.

- [13] Zhang H, Xu L, Yu J, et al. Identification of autism spectrum disorder based on functional near-infrared spectroscopy using adaptive spatiotemporal graph convolution network[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1132231.
- [14] Wu T, Liu X, 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]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1145485.
- [15] Miao S, Han J, Gu Y, et al. Reduced prefrontal cortex activation in children with attention-deficit/hyperactivity disorder during go/no-go task: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Front Neurosci*, 2017, 11: 367.
- [16] Wagner S, Sebastian A, Lieb K, et al. A coordinate-based ALE functional MRI meta-analysis of brain activation during verbal fluency tasks in healthy control subjects[J]. *BMC Neurosci*, 2014, 15: 19.
- [17] Li Y, Ma S, Zhang X, et al. ASD and ADHD: Divergent activating patterns of prefrontal cortex in executive function tasks? [J]. *J Psychiatr Res*, 2024, 172: 187-196.
- [18] Sripada CS, Kessler D, Angstadt M. Lag in maturation of the brain's intrinsic functional architecture in attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(39):14259-14264.
- [19] Dadario NB, Tanglay O, Sughrue ME. Deconvoluting human Brodmann area 8 based on its unique structural and functional connectivity [J]. *Front Neuroanat*, 2023, 17: 1127143.
- [20] Wu J, Xiao H, Sun H, et al. Role of Dopamine receptors in ADHD: A systematic Meta-analysis[J]. *Mol Neurobiol*, 2012, 45(3): 605-620.
- [21] Wu ZM, Llera A, Hoogman M, et al. Linked anatomical and functional brain alterations in children with attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *NeuroImage Clin*, 2019, 23: 101851.
- [22] Chiang HL, Wu CS, Chen CL, et al. Machine-learning-based feature selection to identify attention-deficit hyperactivity disorder using whole-brain white matter microstructure: A longitudinal study[J]. *Asian J Psychiatry*, 2024, 97: 104087.
- [23] Chen Y, Huang X, Wu M, et al. Disrupted brain functional networks in drug-naïve children with attention deficit hyperactivity disorder assessed using graph theory analysis [J]. *Hum Brain Mapp*, 2019, 40(17): 4877-4887.
- [24] Høberg A, Solberg BS, Hegvik TA, et al. Using polygenic scores in combination with Symptom Rating Scales to identify attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *BMC Psychiatry*, 2024, 24(1): 471.
- [25] Hong SB. Thalamocortical functional connectivity in youth with attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *J Psychiatry Neurosci*, 2023, 48(1): E50-E60.

收稿日期:2024-09-20 修回日期:2025-01-07 本文编辑:杨媛媛

(上接第 358 页)

- [30] Kaufmann L, Vogel SE, Starke M, et al. Developmental dyscalculia: Compensatory mechanisms in left intraparietal regions in response to nonsymbolic magnitudes[J]. *Behav Brain Funct*, 2009, 5(1): 35.
- [31] Simos PG, Kanatsoulis K, Fletcher J M, et al. Aberrant spatiotemporal activation profiles associated with math difficulties in children: A magnetic source imaging study[J]. *Neuropsychology*, 2008, 22(5): 571-584.
- [32] Mccaskey U, Von Aster M, Maurer U, et al. Longitudinal brain development of numerical skills in typically developing children and children with developmental dyscalculia[J]. *Front Human Neurosci*, 2018, 11: 629.
- [33] Rotzer S, Kucian K, Martin E, et al. Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia [J]. *Neuroimage*, 2008, 39(1): 417-422.
- [34] Rykhlevskaia E, Uddin LQ, Kondos L, et al. Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: Combined evidence from morphometry and tractography [J]. *Front Hum Neurosci*, 2009, 3.
- [35] 周新林. 作为另一种知识体系的中国珠算: 非符号算术[J]. *珠算与珠心算*, 2021, (3): 6-8.
- [36] Zhou X, Zeng J. Three-component mathematics for students [J]. *Infant and Child Development*, 2022, 31(1): e2283.
- [37] 周新林. 脑科学为数学教育提供依据[J]. *教育家*, 2018, (8): 66-67.
- [38] Cui J, Xiao R, Ma M, et al. Children skilled in mental abacus show enhanced non-symbolic number sense [J]. *Cur Psych*, 2022, 41(4): 2053-2066.
- [39] Barner D, Alvarez G, Sullivan J, et al. Learning mathematics in a visuospatial format: A randomized, controlled trial of mental abacus instruction[J]. *Child Dev*, 2016, 87(4): 1146-1158.
- [40] Lu Y, Li M, Cui Z, et al. Transfer effects of abacus training on cognition[J]. *Cur Psych*, 2023, 42(8): 6271-6286.
- [41] Hanakawa T, Honda M, Okada T, et al. Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: A functional magnetic resonance imaging study[J]. *Neuroimage*, 2003, 19(2): 296-307.
- [42] Hu Y, Geng F, Tao L, et al. Enhanced white matter tracts integrity in children with abacus training[J]. *Human Brain Mapping*, 2011, 32(1): 10-21.
- [43] Li M, Wang Z, Yu X, et al. Single-trial interindividual correlation shows semantic and visuospatial networks are fundamental for advanced mathematical learning [J]. *Eur J Neurosci*, 2024, 60(6): 5189-5202.

收稿日期:2025-03-20 修回日期:2025-03-25 本文编辑:王悦