



基于功能性近红外光谱技术分析孤独症儿童粗大动作任务的脑功能活动特征*

宗文浩¹⁾ 梁 岐²⁾ 杨诗语³⁾ 王凤娇⁴⁾ 卫蒙招⁴⁾ 雷 宏³⁾ 董贵俊^{1)**} 李可峰^{5)**}

(¹⁾ 衢州学院体育工作部, 衢州 324000; (²⁾ 临沂职业学院医养健康学院, 临沂 276023; (³⁾ 衢州学院化学与材料工程学院, 衢州 324000;

(⁴⁾ 山东体育学院研究生教育学院, 济南 250131; (⁵⁾ 衢州职业技术学院医学院, 衢州 324000)

摘要 目的 通过与典型发育 (typically developing, TD) 儿童进行对比, 基于功能性近红外光谱 (functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 脑成像技术探究孤独症 (autism spectrum disorder, ASD) 伴运动功能障碍 (motor dysfunctions, MDs) 儿童粗大动作任务脑功能活动特征, 为进一步揭示 ASD 儿童 MDs 发生机制及从中枢角度设计靶向性干预方案提供理论依据。**方法** 根据纳入和排除标准, 招募 48 名伴有 MDs 的 ASD 儿童纳入 ASD 组, 40 名 TD 儿童纳入 TD 组。利用 fNIRS 设备采集单手投袋和踮脚走路状态下皮层运动相关脑区血氧变化信息, 分析两组儿童脑激活与功能连接差异。**结果** 与 TD 组相比, ASD 组在物体操控性动作 (单手投袋) 任务中, 脑激活方面表现出左侧感觉运动皮层 (sensorimotor cortex, SMC) 和右侧次级视觉皮层 (secondary visual cortex, V2) 脑区激活程度均显著降低 ($P < 0.05$), 而右侧前运动皮层和辅助运动皮层 (pre-motor and supplementary motor cortex, PMC&SMA) 脑区激活程度显著升高 ($P < 0.01$), 且表现为双侧脑区活动, 脑功能连接方面表现出连接强度显著降低 ($P < 0.05$) 且主要与背外侧前额叶皮层 (dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC) 和 V2 相关联。ASD 组在身体稳定性动作 (踮脚走路) 任务中, 脑激活方面表现出 DLPFC、SMC 和 PMC&SMA 等运动相关脑区激活程度均显著升高 ($P < 0.05$), 且表现为双侧脑区活动, 脑功能连接方面表现出连接强度显著降低 ($P < 0.05$) 且主要与 PMC&SMA 和 V2 相关联。**结论** ASD 儿童在物体操控性和身体稳定性动作任务中表现出不同于同龄 TD 儿童的脑功能活动异常特征, 反映了局部脑区代偿性激活不足或过度以及跨脑区整合能力受损, 这为进一步揭示其 MDs 发生机制并从中枢角度设计针对性的干预方案提供了理论和数据支撑。

关键词 孤独症, 运动功能障碍, 粗大动作技能, 脑功能特征

中图分类号 R749.94, R338.2

DOI: 10.16476/j.pibb.2025.0165

CSTR: 32369.14.pibb.20250165

孤独症谱系障碍 (autism spectrum disorder, ASD), 又称孤独症, 是儿童早期常见的神经发育性障碍之一, 临床以社交缺陷、重复刻板行为和限制兴趣为主要核心症状^[1], 患病率高且临床异质性程度大, 严重危害儿童身心健康及家庭幸福, 已成为全球性的重大公共卫生问题和突出社会问题^[2], 受到全世界广泛关注。运动功能障碍 (motor dysfunctions, MDs), 包括粗大动作 (如姿势控制障碍、步态异常等) 和精细动作 (如书写困难、手部灵巧性差等), 是 ASD 儿童最为常见的伴随症状之一^[3-5]。研究报道, 高达 50%~88% 的 ASD 儿童同时伴有程度各异的 MDs^[6], 且广泛分布于不同年龄段和症状严重程度的 ASD 群体

中^[7-8], 严重干扰 ASD 儿童社交、语言等康复进程和效果, 动作发展受限等可使其身体活动水平减少、身体素质下降, 严重阻碍儿童生活自理能力 (如进食、穿衣和如厕等) 发展, 进一步增加照料者负担^[7, 9]。因此, 探究 ASD 儿童 MDs 发生机制并以运动功能为突破口促进儿童社交、语言及认知等功能协同改善, 这对于进一步提升其生活自理能

* 浙江省高等教育“十四五”研究生教学改革项目 (JGGC2024040), 教育部人文社会科学研究一般项目 (23YJAZH026) 和衢州市竞争性科技攻关项目 (2023K217, 2023K239) 资助。

** 通讯联系人。

董贵俊 Tel: 0570-8026602, E-mail: 42042@qzc.edu.cn

李可峰 Tel: 0570-8068363, E-mail: jmlikefeng@qzct.edu.cn

收稿日期: 2025-04-16, 接受日期: 2025-05-22

力和社会适应性以减轻照料者负担具有重要意义, 且符合现阶段中国重大社会需求和政策发展方向^[10]。

脑科学研究表明, 儿童动作技能发展建立在脑的生理基础之上, 主要在中枢神经系统的控制下得以实现^[11-12]。空间位置、速度等运动信息经视觉通路传导至枕叶视觉皮层, 再进一步传递至大脑皮层感觉运动区以生成运动指令, 并沿运动神经环路传导至脊髓运动神经元, 从而引起支配肌肉收缩以产生运动行为, 该过程是神经肌肉协同的外在体现^[13]。可见, 大脑的完善发育对运动执行与控制以及动作技能发展的重要性。而神经影像学研究表明, ASD是一种“脑网络障碍”^[14-16], 大脑运动相关区域功能异常改变致使运动指令无法通过正常神经环路到达所支配的肌肉, 从而引起动作发展延迟或非典型发展, 这可能是导致ASD儿童MDs发生的病理基础之一^[9, 12]。例如: 运动协调障碍和运动计划能力受损主要与皮质-小脑和额叶-纹状体回路异常改变有关^[14]; 动作模仿障碍可能与非典型的镜像神经元系统功能有关^[17]; 静息状态下, ASD患者表现出感觉运动网络内在连通性异常增加^[18]; 在更大尺度上, ASD儿童表现出基于图论的复杂脑功能拓扑结构异常^[19-20]。这些证据支持了与典型发育(typically developing, TD)个体相比ASD儿童非典型的的感觉运动网络发育。因此, 对ASD儿童运动相关脑功能网络的深入解析, 将有助于更好地理解其MDs发生机理以及MDs康复策略优化与实施。

以往对大脑功能的探索主要基于脑激活和功能连接两方面^[21]。脑激活是指人脑在对外界刺激进行响应和加工时, 形成的基于任务的、稳定的脑功能活动模式^[22]; 脑功能连接是指空间上分离但具有相似功能的脑区在时间序列上的相关性或在执行任务过程中不同脑区间神经元活动的时间同步性, 反映了不同脑区间的信息整合与交互作用^[9]。在脑激活方面, 受限于功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑电图(electroencephalogram, EEG)等传统脑功能成像设备较高的运动敏感性和密闭的测试环境^[23], 探索ASD儿童MDs脑激活特征的动作任务主要集中在视觉引导下的精确抓握等手部精细动作或坐位小幅度动作^[24-25], 难以在包含平衡稳定性等粗大动

作的项目中使用; 在脑功能连接方面, 目前关于ASD儿童MDs脑功能连接特征的分析主要基于静息态^[26], 缺乏运动任务态脑功能连接机制探索, 而运动是一个包含感知、计划和执行等多个环节的运动控制过程^[27], 需要不同脑区间的密切协作与配合, 而静息态脑功能连接难以直接观测到这些过程所引起的神经活动变化^[14]。功能性近红外光谱(functional near infrared spectroscopy, fNIRS)是一种非侵入性的脑功能成像技术, 能够通过实时监测大脑皮层血氧水平变化, 进而反映脑区活动状况^[28]。与fMRI、EEG相比, fNIRS对头部运动敏感性较低, 尤其适用于儿童群体和运动脑科学研究^[29]。

本研究利用fNIRS技术采集ASD伴MDs儿童不同粗大动作任务(单手投袋和踮脚走路)状态下的脑神经活动信息, 分别从脑激活及功能连接两个层面探索儿童的脑功能活动特征, 以期为进一步揭示ASD儿童MDs发生的脑神经机制及从中枢角度设计针对性的干预方案提供理论和证据支持。

1 材料与方法

1.1 研究对象选取与分组

在青岛市幸福之家融合幼儿园和日照市利民医院招募符合条件的48名ASD伴MDs儿童纳入ASD组。纳入标准: a. 年龄在4~6岁; b. 符合美国精神障碍诊断与统计手册(第5版)中的ASD诊断标准; c. 儿童期孤独症评定量表(childhood autism rating scale, CARS)处于30~36分之间, 符合轻度ASD评分标准; d. 右利手、无严重听力障碍、视觉障碍、精神疾病及肢体残疾等情况; e. 无需药物治疗; f. 能够配合完成相关测试; g. 动作协调能力测试(movement assessment battery for children-second edition, MABC-2)总分<第16百分位数; h. 监护人同意参加。排除标准: a. 不符合ASD诊断标准; b. 有听力障碍、视觉障碍、精神疾病及肢体残疾等情况者; c. 严重的心脏和肝功能异常者; d. 有严重的行为问题(如攻击性)和沟通障碍(如在动作模仿中无法遵循简单指令)等难以配合完成相关测试者; e. 监护人不同意参加。

同期在青岛市幸福之家融合幼儿园招募年龄与性别相匹配的40名TD儿童纳入TD组。纳入标准: a. 年龄在4~6岁; b. 无任何临床精神性或神经性疾

病（如ASD、发育迟缓等）；c. 无ASD家族史；d. 右利手、无听力障碍、视觉障碍、精神疾病及肢体残疾等情况；e. 能够配合完成相关测试；f. MABC-2总分 $\geq$ 第16百分位数；g. 监护人同意参加。排除标准：a. 有听力、视觉障碍、精神疾病、肢体残疾等情况者；b. 严重的心脏和肝功能异常者；c. 难以配合完成相关测试者；d. 监护人不同意参加；e. 社会反应量表（social responsiveness scale, SRS）评分超过59分者。

本研究方案经山东体育学院运动科学伦理委员会批准（2022027），所有被试参与研究均获得监护人同意并自愿签署知情同意书。

1.2 实验设备及参数设置

使用NirSmart II-3000B型便携式fNIRS脑功能成像设备（丹阳慧创，中国）采集脑功能活动数

据，采样频率为11 Hz。该设备包含18个光源和16个探头（间隔3 cm），共构成42个通道。根据蒙特利尔神经研究所（montreal neurological institute, MNI）标准模板及布罗德曼分区（brodmann area, BA）将通道划分至5个感兴趣区（regions of interest, ROI）：背外侧前额叶皮层（dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC）、初级运动皮层（primary motor cortex, M1）、初级体感皮层（primary somatosensory cortex, S1）、前运动皮层和辅助运动皮层（pre-motor and supplementary motor cortex, PMC&SMA）以及次级视觉皮层（secondary visual cortex, V2）并区分左右侧脑区，其中M1和S1统称为感觉运动皮层（sensorimotor cortex, SMC）。fNIRS采集通道与大脑ROI的对应关系以及通道坐标位置信息分别见图1和表1。

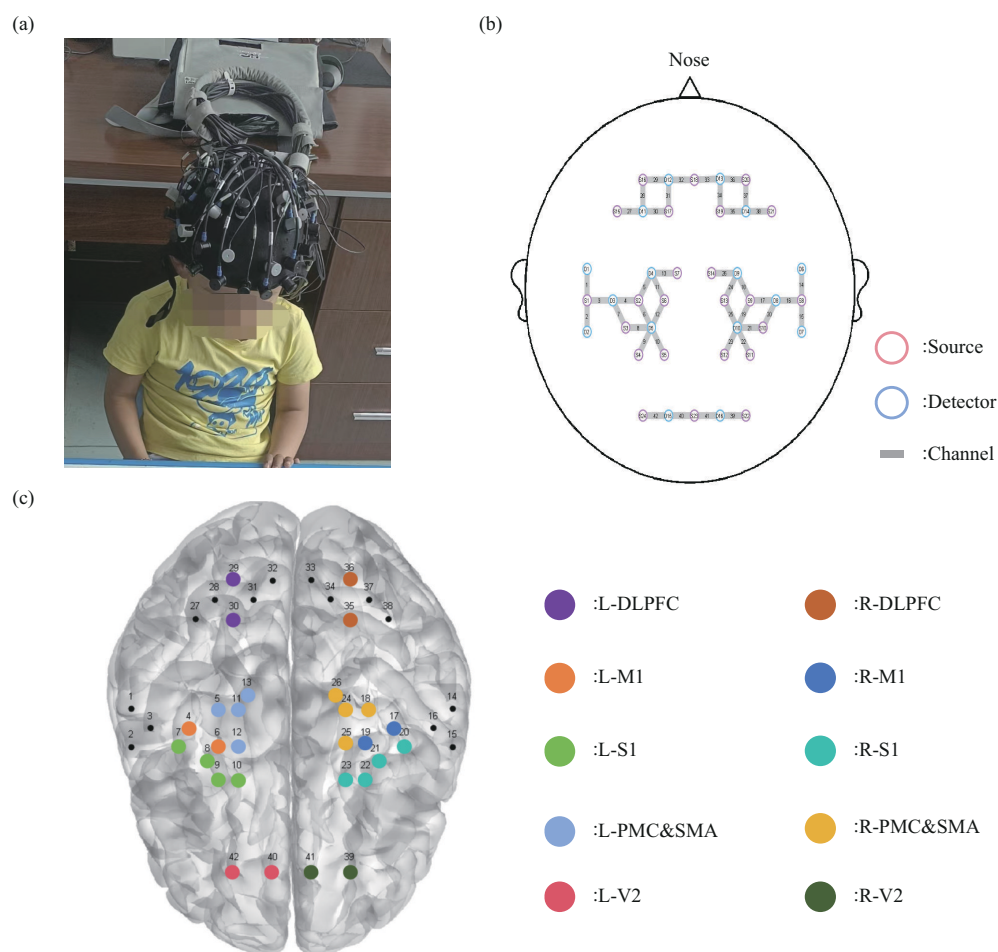


Fig. 1 Schematic diagram of fNIRS data acquisition

(a) Picture of fNIRS data acquisition, (b) fNIRS channel layout, (c) correspondence between data acquisition channels and regions of interest (ROI). L: left; R: right.

Table 1 Partitioning of fNIRS acquisition channels and corresponding positional coordinate information							
ROI	Brain hemisphere	Channel	BA	Partition ratio	MNI coordinate		
					<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
DLPFC	L	CH29	46	0.334	-40	60	-9
		CH30		0.945	-38	55	26
	R	CH35		0.806	43	53	24
		CH36		0.589	46	57	-7
M1	L	CH04	4	0.365	-58	-12	50
		CH06		0.625	-44	-21	67
	R	CH17		0.360	61	-13	50
		CH19		0.628	46	-20	67
PMC&SMA	L	CH05	6	0.890	-42	5	61
		CH11		0.753	-28	7	68
		CH12		0.673	-31	-18	74
	R	CH18		0.908	45	3	60
		CH24		0.717	33	6	66
		CH25		0.656	34	-18	74
S1	L	CH07	1 / 2	0.285	-63	-25	47
		CH08	3	0.393	-49	-32	64
		CH09	2	0.320	-41	-40	67
		CH10	1	0.335	-31	-40	73
	R	CH20		0.466	66	-27	47
		CH21		0.387	50	-32	64
		CH22		0.305	42	-41	68
		CH23		0.302	31	-39	74
V2	L	CH40	18	0.517	-12	-101	25
		CH42		0.492	-32	-95	22
	R	CH39		0.583	32	-95	21
		CH41		0.587	15	-101	24

L: left; R: right. ROI: regions of interest; BA: brodmann area; MNI: montreal neurological institute.

1.3 MABC-2测试工具

MABC-2是一种国际广泛使用的定量、客观的标准化运动功能测试工具，旨在识别具有MDs的儿童和青少年，可用于筛查儿童的动作协调能力。本研究采用3~6岁部分，测试内容包括手部精细动作（非/惯用手投币、穿珠和描画）、物体操控性动作（单手投袋、双手接袋）以及身体稳定性动作（踮脚走路、单腿平衡和双腿跳格）3个类别共8个子测试项目，将物体操控性和身体稳定性动作归为粗大动作。评分标准为：若总标准分百分位数≤第5百分位数表示具有MDs；处于第6百分位数与第15百分位数（包含第15百分位数）之间表示具有边缘性MDs；≥第16百分位数表示处于正常

水平^[30]。

1.4 任务范式及测试流程

1.4.1 任务范式设计

采用组块设计（block design）进行运动任务态测试（图2）。结合ASD儿童实际情况，本研究从MABC-2两类粗大动作测试项目中各选取1个动作作为fNIRS运动任务范式。各运动任务测试方案及测试顺序如下。a. 物体操控性动作（单手投袋）：使用右手在30 s内将尽可能多的豆袋投进红色目标区域，接着休息10 s，重复4次。b. 身体稳定性动作（踮脚走路）：沿着黄色直线踮脚走路30 s，接着保持站立姿势休息10 s，重复4次。整个任务态测试时间大约15~20 min。

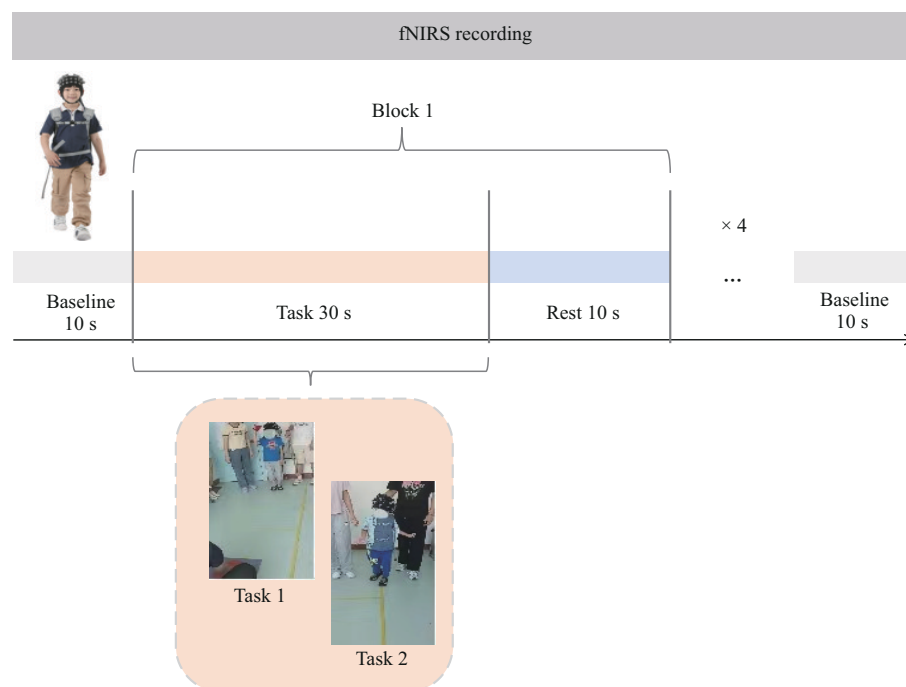


Fig. 2 Paradigm design of motor task-state test

1.4.2 测试流程

本研究共包括3个测试阶段。首先，在研究开始前由研究人员向儿童监护人详细介绍研究目的、测试过程以及注意事项等内容并签署知情同意书，并通过自制调查问卷对儿童的姓名、性别等基本信息及共患病、症状严重程度等临床特征信息进行采集。接下来，通过MABC-2测试工具对儿童的运动功能进行评估，并筛选出具有MDs的ASD儿童和无MDs的TD儿童进行后续的fNIRS脑功能测评。

1.4.3 质量控制

测评过程中，ASD儿童全程由家长、老师或保育员陪伴；测试人员及时对儿童测试状态进行记录，以便在后续数据分析时剔除由于儿童乱动等情况造成的异常脑功能数据。

1.5 数据处理与分析

1.5.1 fNIRS数据预处理

利用NirSpark软件（丹阳慧创，中国）预处理模块对fNIRS数据进行预处理，具体步骤如下。

a. 数据剔除与伪迹校正：检查数据质量，手动删除原始光强信号中存在严重伪影的时间段或无效数据，并分别采用滑动窗口标准差法和样条插值法识别、校正运动伪迹^[31]。b. 带通滤波：使用带通滤

波器（0.01~0.1 Hz）去除心率、呼吸等生理波动引起的高频噪声以及环境和温度变化引起的低频基线漂移，保留与任务相关的血流动力学变化信号。c. 血氧浓度转换：根据修正的比尔-朗伯定律将吸光度值转换为血氧浓度值（mmol/L·mm），差分路径因子设置为6。由于氧合血红蛋白（oxygenated hemoglobin, HbO₂）被认为是反映任务相关血流动力学变化最敏感的指标，具有较高的信噪比^[32]。因此，本研究均采用HbO₂浓度值进行数据分析。

1.5.2 fNIRS数据分析

ΔHbO_2 用来反映不同任务态下大脑皮层激活程度：在NirSpark软件BlockAvg模块中将block时间范围设置为[-2 s, 40 s]，其中包括30 s任务和10 s休息。以任务开始前5 s内的HbO₂浓度作为基线值，取任务开始后5~25 s内的HbO₂浓度作为任务值，将任务值减去基线值并将4次任务叠加平均即得到任务期间各通道平均HbO₂浓度变化值（ ΔHbO_2 ）。最后，将各ROI所包含的各通道 ΔHbO_2 进行平均，该均值即为该ROI的激活水平。

偏侧指数（lateral index, LI）用来反映不同任务态下的优势脑区：

$$LI = (\Delta\text{HbO}_{2L} - \Delta\text{HbO}_{2R}) / (\Delta\text{HbO}_{2L} + \Delta\text{HbO}_{2R}) \quad (1)$$

ΔHbO_{2L} 和 ΔHbO_{2R} 分别代表左侧和右侧半球平

均 ΔHbO_2 , 若 $LI \geq 0.1$, 则认为左侧半球占优势; 若 $-0.1 < LI < 0.1$, 则认为两侧半球同等重要; 若 $LI \leq -0.1$, 则认为右侧半球占优势^[33]。

功能贡献程度 (functional contribution degree, FCD) 用来反映某脑区对该任务的贡献程度:

$$FCD = \Delta\text{HbO}_{2CA} / \Delta\text{HbO}_{2AA} \quad (2)$$

ΔHbO_{2CA} 和 ΔHbO_{2AA} 分别表示某一 ROI 平均 ΔHbO_2 和全部 ROI 平均 ΔHbO_2 之和, FCD 值越大, 表明此 ROI 对该任务的贡献程度越高^[34]。

脑功能连接分析: 利用 NirSpark 软件 Network 模块计算每个被试在不同任务期间各通道 HbO_2 浓度在时间序列上的 Pearson 相关系数, 构建 42×42 相关矩阵, 并对各 ROI 所包含所有通道的 HbO_2 浓度时间序列进行平均, 计算各 ROI 间的相关系数 r 值, 接着进行 Fisher's r - z 转换以提高数据正态性, 转换后的 z 值被定义为各 ROI 间功能连接强度^[32], 用于后续的统计分析, 连接结果通过选择 “Plot Result” 进行功能连接矩阵和 ROI-ROI 功能连接可视化。最后, 基于 NirSpark 软件中的 Group Statistics 模块通过独立样本 t 检验比较两组儿童全脑和 ROI-ROI 功能连接强度值。

1.6 统计分析

利用夏皮诺-威尔克 (Shapiro-Wilk) 方法对数据进行正态性检验。若符合正态分布, 组间比较采用独立样本 t 检验; 若不符合正态分布, 组间比较采用非参数检验。采用卡方检验、独立样本 t 检验对儿童的年龄、性别和 CARS 评分、SRS 评分等人口统计学和临床特征指标进行同质性检验; 采用单样本 t 检验对两组 ΔHbO_2 浓度值与理论值 0 进行比较以反映不同运动任务状态下大脑皮层激活情况; 采用独立样本 t 检验和非参数检验对两组不同运动任务状态下的脑功能指标 (包括 ΔHbO_2 浓度值、LI 和 FCD 等脑激活指标、脑功能连接强度值) 进行组间差异比较。设置显著性阈值为 $P < 0.05$, 并进行错误发现率 (false discovery rate, FDR) 校正。

2 结 果

2.1 被试基本信息

如表 2 所示, 两组在年龄、性别和 BMI 方面均不存在显著性差异 ($P > 0.05$); SRS 评分差异 ($t = 26.061$, $P < 0.001$) 具有统计学意义且 TD 组评分 < 59 分, 即不符合 ASD 诊断标准。

Table 2 Demographic and clinical characteristics of two groups of participants at baseline

Characteristics	ASD group (n=48)	TD group (n=40)	χ^2/t	P
Age/year	5.27±0.80	5.05±0.22	1.848	0.070 ¹⁾
Sex			0.191	0.662 ²⁾
Male n (%)	34 (70.8%)	30 (75.0%)		
Female n (%)	14 (29.2%)	10 (25.0%)		
BMI/(kgm ⁻²)	16.52±2.67	15.72±2.03	1.422	0.160 ¹⁾
Rehabilitation duration/year	2.15±0.62	-	-	-
Mean CARS score	34.80±0.91	-	-	-
Mean SRS score	77.71±8.39	39.53±5.21	26.061	< 0.001 ^{***a)}

*** $P < 0.001$; ¹⁾calculated using independent samples t -test; ²⁾calculated using Chi-square test.

2.2 脑激活差异

2.2.1 物体操控性动作技能 (单手投袋任务)

a. 基于 ΔHbO_2 浓度的各 ROI 激活情况 (组内比较)

如表 3 所示, ASD 组 R-PMC&SMA (CH24 ($t = 3.439$, $P = 0.045$), CH18 ($t = 4.634$, $P = 0.004$)) ΔHbO_2 浓度差异具有统计学意义, TD 组 R-V2 (CH41 ($t = 3.581$, $P = 0.002$)) 和 L-SMC (CH4 ($t = 4.287$, $P = 0.002$), CH6 ($t = 4.365$, $P = 0.002$), CH7 ($t = 4.115$, $P = 0.002$)) ΔHbO_2 浓度差异具有

统计学意义, 表明这些通道所在的脑区存在激活。

b. 基于 ΔHbO_2 浓度的各 ROI 激活情况差异 (组间比较)

如图 3 所示, 与 TD 组相比, ASD 组 L-SMC ($t = 2.845$, $P = 0.006$) 和 R-V2 ($t = -2.465$, $P = 0.017$) ΔHbO_2 浓度显著降低, 而 R-PMC&SMA ($t = 3.553$, $P = 0.001$) ΔHbO_2 浓度显著升高。

c. 两组在执行单手投袋任务时的优势半球和脑区

如表 4 所示, ASD 组 LI 值处于 -0.1 到 0.1 之间,

Table 3 Significant activated channel in both groups during one-handed bag throwing task

Group	ROI	Brain hemisphere	Channel	BA	MNI			<i>t</i>	<i>P</i>
					<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		
ASD group (<i>n</i> =48)	PMC&SMA	R	CH24	6	33	6	66	3.439	0.045*
			CH18	6	45	3	60	4.634	0.004**
TD group (<i>n</i> =40)	SMC	L	CH04	4	-58	-12	50	4.287	0.002**
			CH06	4	-44	-21	67	4.365	0.002**
			CH07	1/2	-63	-25	47	4.115	0.002**
	V2	R	CH41	18	15	-101	24	3.581	0.002**

P*<0.05; *P*<0.01; L: left; R: right. ROI: regions of interest; BA: brodmann area; MNI: montreal neurological institute.

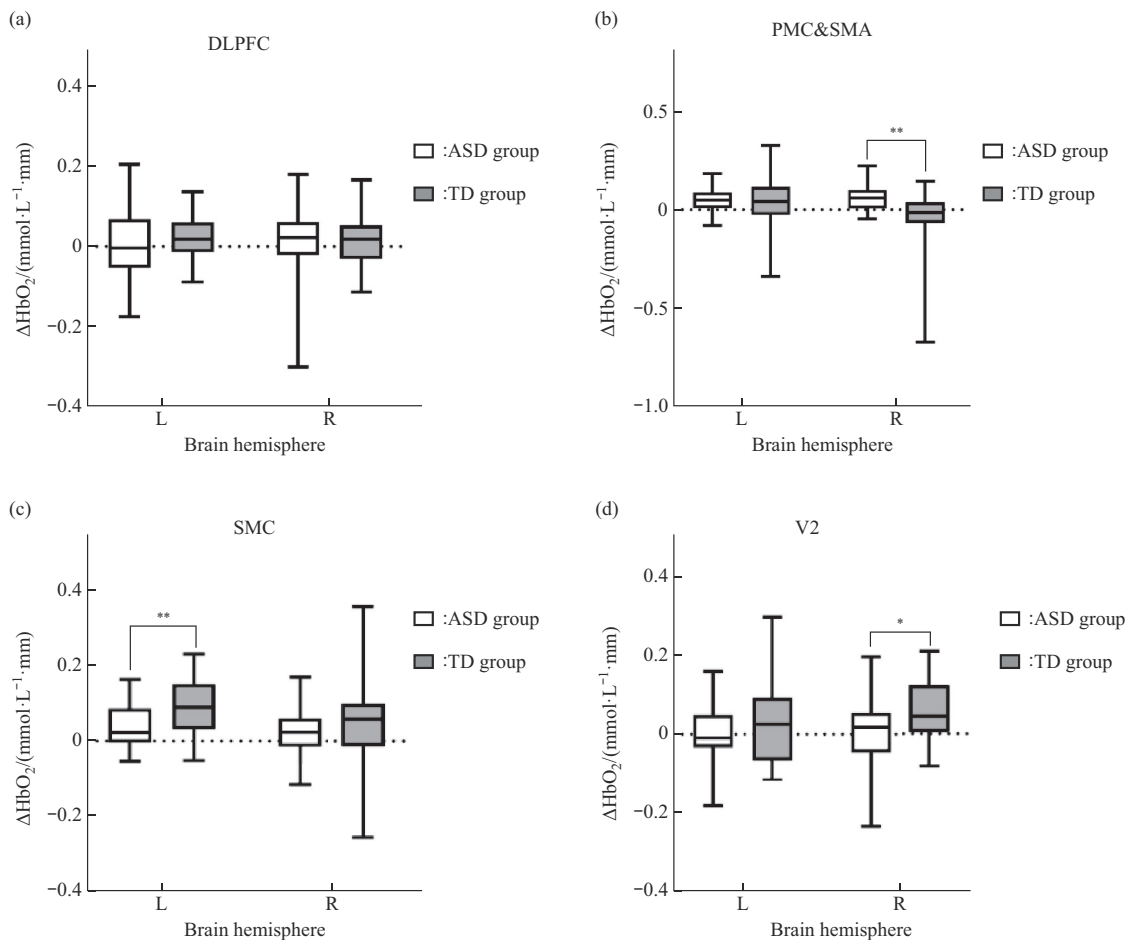


Fig. 3 Comparison of ΔHbO_2 concentration between ROIs in the two groups during one-handed bag throwing task

P*<0.05; *P*<0.01; L: left; R: right.

Table 4 Comparison of left and right hemisphere *LI* between groups during one-handed bag throwing task

Group	$\Delta\text{HbO}_{2L}-\Delta\text{HbO}_{2R}$	$\Delta\text{HbO}_{2L}+\Delta\text{HbO}_{2R}$	<i>LI</i>
ASD group (<i>n</i> =48)	-0.002	0.203	-0.012
TD group (<i>n</i> =40)	0.091	0.247	0.369

L: left; R: right.

表明在执行单手投袋任务时以双侧半球活动为主, TD组 $LI \geq 0.1$, 表明在执行单手投袋任务时以左侧半球活动为主。

两组单手投袋任务状态下各ROI间 *FCD* 比较结果如表5所示, ASD组以R-PMC&SMA脑区 *FCD* 最大, TD组以L-PMC&SMA脑区 *FCD* 最大。

Table 5 Comparison of FCD between ROIs during one-handed bag throwing task

ROI		FCD_{ASD}	FCD_{TD}
DLPFC	L	0.033	0.240
	R	0.061	0.186
PMC&SMA	L	0.240	0.347
	R	0.291	-0.172
SMC	L	0.187	0.156
	R	0.119	0.061
V2	L	0.034	0.100
	R	0.035	0.081

L: left; R: right. ROI: regions of interest.

Table 6 Significant activated channel in both groups during tiptoe walking task

Group	ROI	Brain hemisphere	Channel	BA	MNI			t	P
					x	y	z		
ASD group ($n=48$)	DLPFC	R	CH36	46	46	57	-7	3.347	0.024*
		L	CH29	46	45	3	60	2.933	0.032*
TD group ($n=40$)	PMC&SMA	R	CH24	6	33	6	66	-3.505	0.024*
		L	CH05	6	-42	5	61	-2.832	0.032*

* $P<0.05$; L: left; R: right. ROI: regions of interest; BA: brodmann area; MNI: montreal neurological institute.

b. 基于 ΔHbO_2 浓度的各 ROI 激活情况差异 (组间比较)

如图 4 所示, 与 TD 组相比, ASD 组 L-DLPFC

2.2.2 身体稳定性动作技能 (踮脚走路任务)

a. 基于 ΔHbO_2 浓度的各 ROI 激活情况 (组内比较)

如表 6 所示, ASD 组 R-DLPFC (CH36 ($t=3.347$, $P=0.024$)) 和 L-DLPFC (CH29 ($t=2.933$, $P=0.032$)) ΔHbO_2 浓度差异具有统计学意义, TD 组 R-PMC&SMA (CH24 ($t=-3.505$, $P=0.024$))、L-PMC&SMA (CH05 ($t=-2.832$, $P=0.032$)) 和 ΔHbO_2 浓度差异具有统计学意义, 表明这些通道所在的脑区存在激活。

($t=2.527$, $P=0.015$)、R-DLPFC ($t=3.278$, $P=0.002$)、R-SMC ($Z=-2.265$, $P=0.024$)、L-PMC&SMA ($t=-2.476$, $P=0.017$) 和

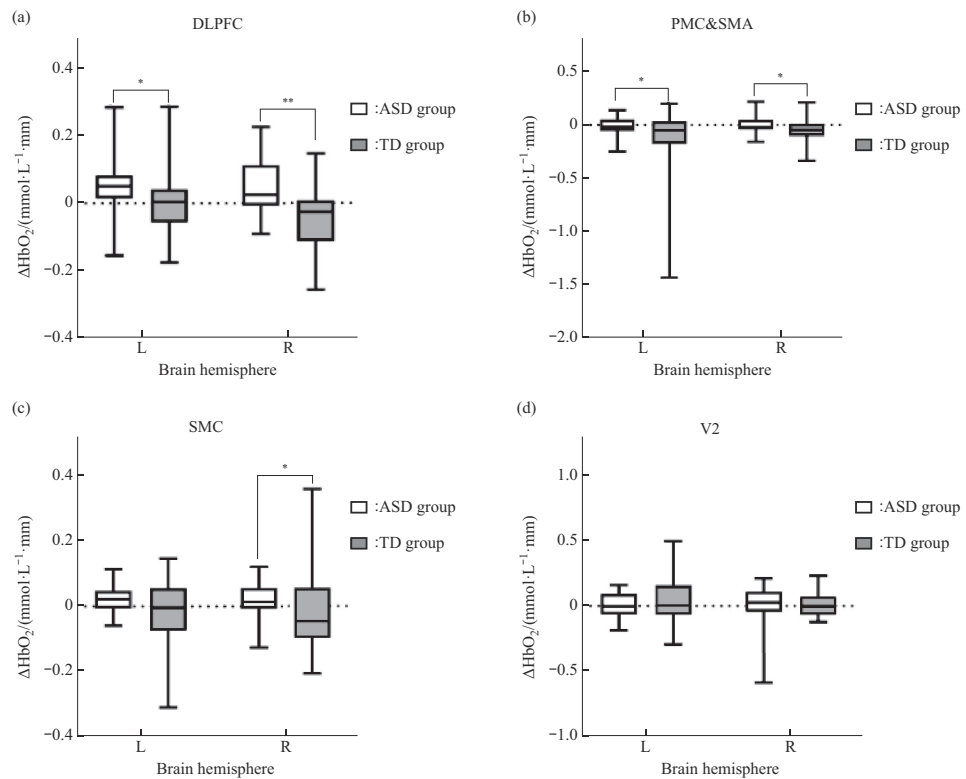


Fig. 4 Comparison of ΔHbO_2 concentration between ROIs in the two groups during tiptoe walking task

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. L: left; R: right.

R-PMC&SMA ($t=-2.456$, $P=0.017$) ΔHbO_2 浓度均显著升高。

c. 两组在执行踮脚走路任务时的优势半球和脑区

如表7所示, ASD组 LI 值处于-0.1到0.1之间, 表明在执行踮脚走路任务时以双侧半球活动为主, 而TD组 LI 值 ≥ 0.1 , 表明在执行踮脚走路任务时以左侧半球活动为主。

Table 7 Comparison of left and right hemisphere LI between groups during tiptoe walking task

Group	$\Delta\text{HbO}_{2L}-\Delta\text{HbO}_{2R}$	$\Delta\text{HbO}_{2L}+\Delta\text{HbO}_{2R}$	LI
ASD group ($n=48$)	-0.013	0.161	-0.084
TD group ($n=40$)	0.024	0.189	0.131

L: left; R: right.

两组踮脚走路任务状态下各ROI间 FCD 比较结果如表8所示, ASD组以L-DLPFC脑区 FCD 最大, TD组以L-PMC&SMA脑区 FCD 最大。

Table 8 Comparison of FCD between ROIs during tiptoe walking task

ROI		FCD_{ASD}	FCD_{TD}
DLPFC	L	0.175	0.000
	R	0.073	0.221
PMC&SMA	L	0.002	0.567
	R	0.148	0.298
SMC	L	0.145	0.050
	R	-0.021	0.102
V2	L	0.009	-0.183
	R	-0.031	-0.056

L: left; R: right. ROI: regions of interest.

2.3 脑功能连接差异

2.3.1 物体操控性动作技能 (单手投袋任务)

两组单手投袋任务状态下各ROI短程功能连接强度比较结果如图5所示, 其中ASD组R-DLPFC ($t=-3.058$, $P=0.014$) 和R-V2 ($t=-4.381$, $P=0.001$) 短程功能连接强度显著低于TD组, 其他ROI短程功能连接强度差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。

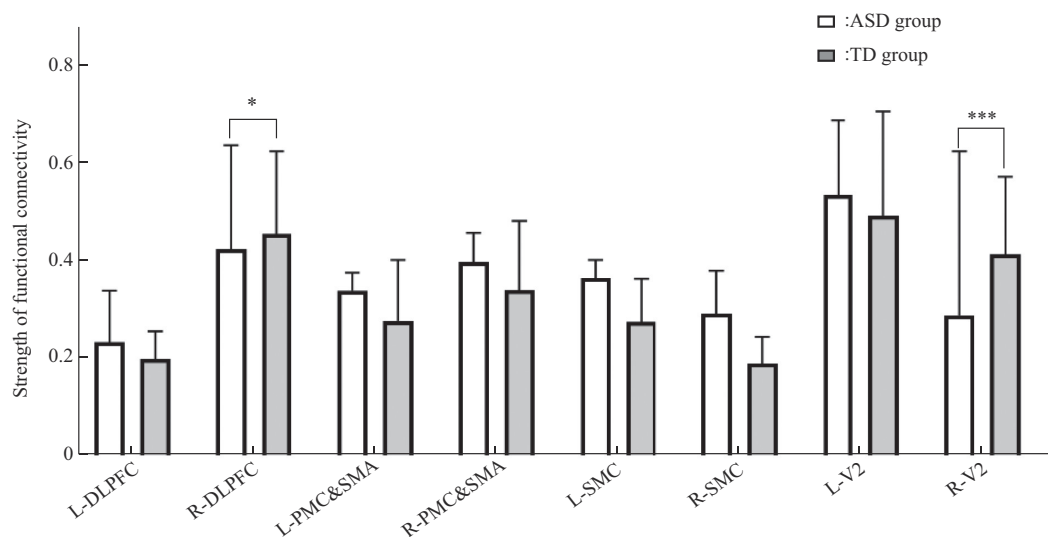


Fig. 5 Comparison of short-range functional connectivity strength during one-handed bag throwing task

* $P<0.05$; *** $P<0.001$; L: left; R: right.

如图6所示, 与TD组相比, ASD组单手投袋任务状态下长程功能连接显著降低的脑区有: L-DLPFC~R-PMC&SMA ($t=-2.975$, $P=0.021$)、L-PMC&SMA~R-SMC ($t=-2.548$, $P=0.043$)、R-PMC&SMA~R-SMC ($t=-2.725$, $P=0.030$)、R-PMC&SMA~R-V2 ($t=-2.764$, $P=0.030$)、

L-DLPFC~L-V2 ($t=-3.875$, $P=0.003$)、R-DLPFC~R-PMC&SMA ($t=-3.388$, $P=0.009$)、R-DLPFC~L-V2 ($t=-6.006$, $P<0.001$)、R-DLPFC~R-V2 ($t=-3.291$, $P=0.010$) 和L-V2~R-V2 ($t=-4.770$, $P<0.001$)。 $P\leq 0.01$ 的差异连接主要与R-DLPFC和L-V2脑区相关联。

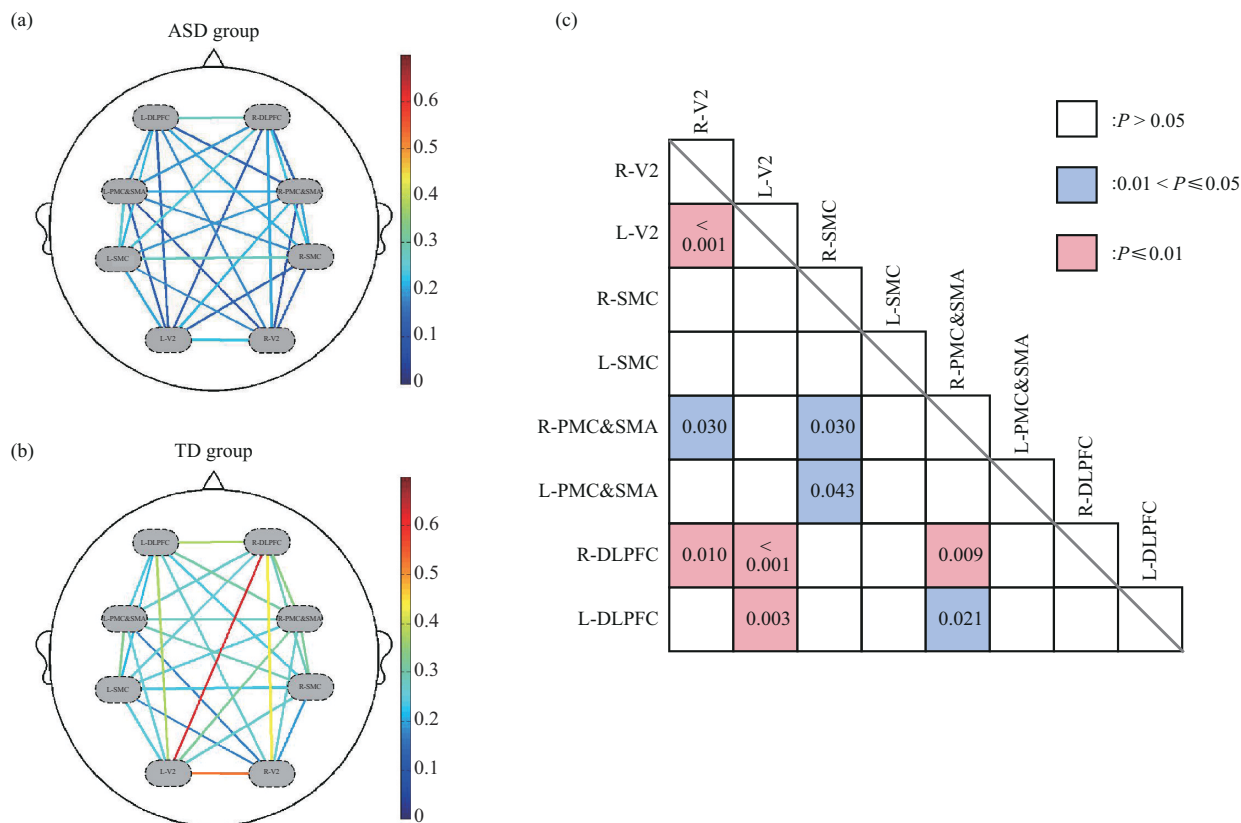


Fig. 6 Comparison of long-range functional connectivity strength during one-handed bag throwing task

(a) Long-range functional connectivity of ASD group, (b) long-range functional connectivity of TD group, (c) the differential brain regions of long-range functional connectivity in two groups.

2.3.2 身体稳定性动作技能（踮脚走路任务）

两组踮脚走路任务状态下各ROI短程功能连接强度比较结果如图7所示，其中ASD组L-PMC&SMA ($t=-2.407$, $P=0.031$)、R-PMC&

SMA ($t=-2.645$, $P=0.022$)、L-V2 ($t=-5.767$, $P<0.001$) 和R-V2 ($t=-4.937$, $P<0.001$) 短程功能连接强度显著低于TD组，R-SMC ($t=2.687$, $P=0.022$) 短程功能连接强度显著高于TD组，其他

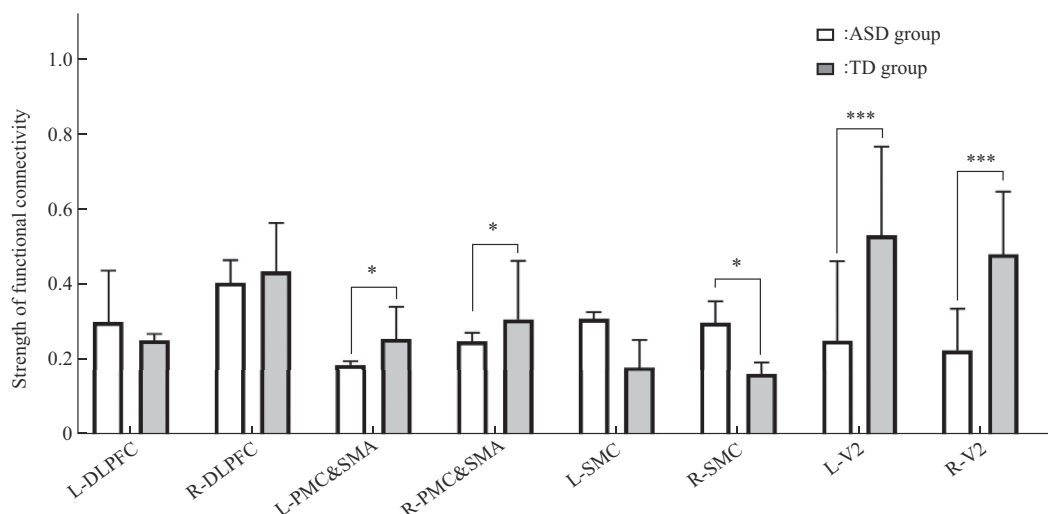


Fig. 7 Comparison of short-range functional connectivity strength during tiptoe walking task

* $P<0.05$; *** $P<0.001$; L: left; R: right.

ROI 短程功能连接强度差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。

如图 8 所示, 与 TD 组相比, ASD 组踮脚走路任务状态下长程功能连接显著降低的脑区有: L-DLPFC~R-PMC&SMA ($t=-2.975$, $P=0.021$)、L-PMC&SMA~R-SMC ($t=-2.548$, $P=0.043$)、R-PMC&SMA~R-SMC ($t=-2.725$, $P=0.030$)、

R-PMC&SMA~R-V2 ($t=-2.764$, $P=0.030$)、L-DLPFC~L-V2 ($t=-3.875$, $P=0.003$)、R-DLPFC~R-PMC&SMA ($t=-3.388$, $P=0.009$)、R-DLPFC~L-V2 ($t=-6.006$, $P<0.001$)、R-DLPFC~R-V2 ($t=-3.291$, $P=0.010$) 和 L-V2~R-V2 ($t=-4.770$, $P<0.001$)。 $P \leq 0.01$ 的差异连接主要与双侧 PMC&SMA 和 V2 脑区相关联。

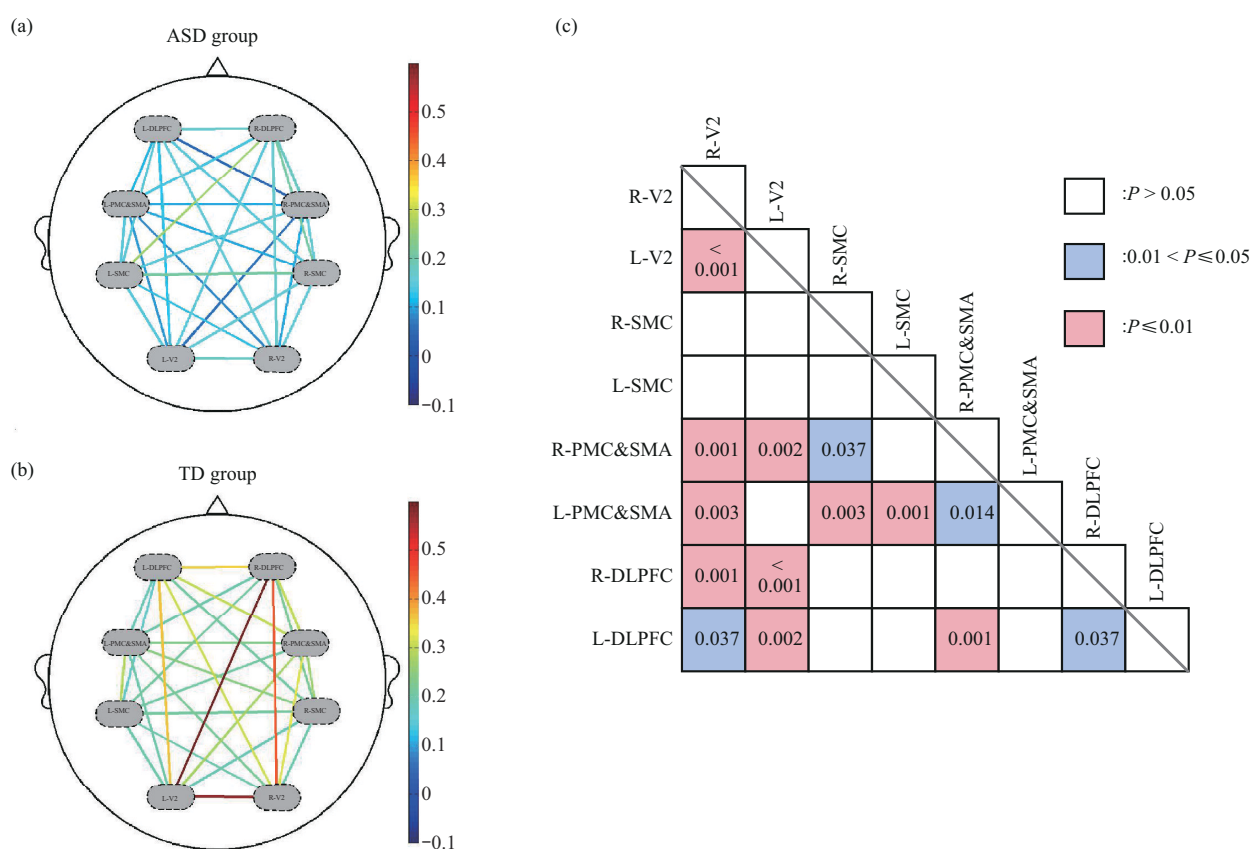


Fig. 8 Comparison of long-range functional connectivity strength during tiptoe walking task

(a) Long-range functional connectivity of ASD group, (b) long-range functional connectivity of TD group, (c) the differential brain regions of long-range functional connectivity in two groups.

3 讨 论

本研究利用 fNIRS 脑功能成像设备观察 ASD 和 TD 儿童在执行不同粗大动作任务时的脑功能活动差异, 发现 ASD 儿童相较于 TD 儿童表现出非典型的大脑皮层激活与功能连接特征。

3.1 ASD 儿童表现出与运动功能相关的大脑皮层非典型激活

本研究通过利用 fNIRS 脑功能成像设备探究 ASD 和 TD 儿童在执行单手投袋和踮脚走路任务时

的脑功能活动差异, 识别 ASD 儿童受损脑区, 以进一步从脑激活角度揭示 ASD 儿童 MDs 发生的脑神经机制。

3.1.1 物体操控性动作技能及其关联脑区激活特征

单手投袋任务用以评判儿童瞄准目标的精确度, 需要依靠上肢和手眼协调配合得以完成, 衡量的是个体的视觉运动整合 (visual-motor integration, VMI) 能力, 该能力依赖于视觉、视觉感知以及运动技能之间的相互作用^[35], 主要包括视觉输入 (视觉刺激的感知及加工)、信息整合

(运动指令的转化)以及运动输出(动作执行)3个过程^[13],涉及视觉皮层(V1/V2)、后顶叶皮层(BA1/2/3)及运动皮层(BA4/6)等多个关键脑区^[36]。

本研究发现,在执行单手投袋任务时,TD组显著激活的脑区为L-SMC和R-V2,而ASD组显著激活的脑区为R-PMC&SMA,这反映了两组执行该任务时所采用的策略不同:TD组脑神经活动主要集中在信息整合与动作执行上,而ASD组主要集中在动作规划上。结合脑激活差异性结果来看,与TD组相比,ASD组L-SMC和R-V2激活程度显著降低,这反映了局部运动相关脑区激活不足,即ASD儿童对视觉刺激的感知和加工以及动作的执行存在障碍,这与Takarae等^[37]研究一致:与TD组相比,ASD患者在扫视任务和眼动追踪任务期间都表现出大脑皮层额叶眼动区域及小脑激活减弱;而ASD组R-PMC&SMA激活程度的显著提高可能是为了补偿L-SMC和R-V2激活程度的降低所引起的瞄准目标准确性下降。ASD组代偿性脑活动增强也进一步得到了LI和FCD分析结果的支持:TD组以左侧脑区活动为主,而ASD组以双侧脑区活动为主,这一方面反映了TD个体中大脑对侧肢体控制的解剖学原则,即大脑左右半球分别控制身体对策的肢体运动和感觉^[38],对右撇子个体而言左半球偏侧化与更好的运动表现相关^[39],而非典型的右偏侧化与ASD儿童MDs发生密切关联^[40],另一方面,这也体现了任务复杂性可能在调节大脑皮层激活模式中起着重要作用,即对ASD儿童而言,任务难度的提高诱导了更为广泛的神经激活^[41]。综上,局部运动相关脑区激活不足可能是导致ASD儿童在物体操控性动作技能上表现出瞄准目标准确度下降的潜在原因。

3.1.2 身体稳定性动作技能及其关联脑区激活特征

踮脚走路任务用以衡量个体在进行缓慢精细动作时的动态平衡能力,反映了人体在运动过程中或受到外力干扰时,调整姿势并保持身体稳定的能力,主要受到来自视觉、前庭觉和本体感觉的多感觉信息输入影响^[42]。已有研究报道ASD儿童的姿势控制能力显著低于同龄TD儿童,然而其背后的脑神经机制却鲜有报道,尤其是在运动任务态下的脑功能活动变化尚不清楚。

本研究利用fNIRS脑功能成像设备对ASD儿童在执行踮脚走路任务期间大脑皮层脑激活特征进行探究,结果显示:TD组双侧PMC&SMA显著激

活,且以L-PMC&SMA激活程度最大;而ASD组双侧DLPFC显著激活,且以L-DLPFC激活程度最大。这表明两者在执行踮脚走路任务时分别采取了不同的策略:ASD儿童采取以认知为主的策略,而TD儿童更加专注于整合不同感觉信息以形成运动规划指导动作执行。脑激活差异性结果显示,与TD组相比,ASD组R-SMC、双侧PMC&SMA和双侧DLPFC脑激活程度显著增高,表明运动和认知脑区共同参与任务的执行,这与前人研究结果相一致。Herold等^[43]利用fNIRS对健康个体在平衡板上维持姿势平衡时的脑皮层活动进行探究,结果发现,与在地面静态站立姿势相比,在平衡板上时感觉运动皮层(包括SMA、中央前回和中央后回皮层区域)的脑激活程度更大,表明在不稳定的平面上保持姿势平衡时大脑高级皮层区域在其中发挥的重要作用。DLPFC的高激活可能是由于ASD儿童在踮脚走路过程中既要关注于保持脚跟踮起状态下沿直线行走,又要维持身体姿势平衡,表明认知-平衡双任务刺激使执行任务难度增加,使有限的神经资源面临竞争,导致维持姿势控制的注意力需求也相应提高,从而引起更高的皮层激活,以招募更多的神经元参与活动,同时认知负荷的增加也有助于维持姿势平衡所必需的感觉运动资源的募集。另外,也有研究认为DLPFC认知脑区的高激活可能是一种补偿策略,这反映了低效的神经资源利用^[44],而TD儿童高效的神经资源利用可使大脑产生一个专注的神经网络结构,使其在完成相同的运动任务时消耗更少的能量,因此表现出较低的脑激活水平。综上,局部运动相关脑区代偿性激活过度可能是导致ASD儿童在身体稳定性动作技能上表现出动态平衡能力下降的潜在原因。

3.2 ASD儿童表现出与运动功能相关的不同大脑皮层区域间协同性受阻

大量研究证实,即便是一项简单的行为任务也并非由某一脑区单独完成,而需要不同脑区间协作配合,这一功能整合过程可用功能连接指标进行表征。本研究在明确ASD和TD儿童执行不同运动任务时的脑激活特征基础上,进一步利用功能连接分析方法对其在任务态下的皮层区域间协同性进行探究。本研究结果发现,无论在执行单手投袋还是踮脚走路任务时,ASD组短程和长程功能连接均较TD组减弱,这与同样利用fNIRS在ASD学龄前儿童中开展的研究结果相一致^[45],推断这可能是引起ASD儿童脑区间信息整合能力受损的重要原因。

3.2.1 物体操控性动作技能及其关联脑区功能连接特征

在执行单手投袋任务时,与TD组相比,ASD组R-DLPFC和R-V2短程功能连接强度降低;长程功能连接强度降低的区域主要与R-DLPFC和L-V2相关联。可见,DLPFC和V2在参与单手投袋中的重要作用。一方面,解剖学证据表明,额叶是ASD患者受影响最严重的皮质区域之一^[46],且包括DLPFC、内侧前额叶皮层等在内的多个额叶认知相关区域功能连接水平存在异常改变^[47],这可能源于解剖结构改变引起的功能连接障碍。另一方面,DLPFC不仅在认知控制中发挥重要作用,同时也参与视觉-工作记忆加工过程,而ASD个体负责高级认知加工的额-顶工作记忆网络被报道存在异常改变,这不利于运动过程中视觉空间信息的存储以及策略的制定和动作执行^[48]。此外,以V2为代表的视觉皮层是VMI通路的关键节点,视觉信息经视网膜传递至外侧膝状体,最终投射于视觉皮层,腹侧通路对物体颜色、亮度等信息进行识别,背侧通路则主管空间位置等信息的感知,视觉信息在此区域进行初步感知和处理后,进一步将视觉信息传递至后顶叶皮层,并与PMC&SMA相互作用进行视觉运动转换以产生运动指令,并经M1将运动指令沿皮层脊髓束传递至脊髓运动神经元,支配相应肌肉收缩以产生动作行为^[49]。可见,目标导向的视觉运动信息主要由背侧通路进行传导。有研究发现,在视觉运动协调任务过程中,与对照组相比,ASD组个体初级视觉皮层和额下皮层区域之间的功能连接显著降低,这可能反映了ASD患者视觉信息背侧传导通路存在障碍^[50]。

3.2.2 身体稳定性动作技能及其关联脑区功能连接特征

在执行踮脚走路任务时,与TD组相比,ASD组双侧PMC&SMA和V2短程和长程功能连接强度显著降低,可见该脑区在此任务执行过程中发挥的重要作用。一方面,PMC和SMA同属BA6区,共同参与运动信息感知、序列运动计划和顺序信息保持等过程,与该脑区功能连接受损不利于踮脚走路任务过程中视觉运动信息转化、运动计划的形成以及动作执行等关键过程信息交互^[51]。另一方面,踮脚走路时,为保持身体姿势平衡儿童需要通过视觉皮层不断感知与运动有关的视觉信息并将该信息进一步反馈至更高级中枢以调整姿态。受限于ASD儿童配合程度及fMRI等脑功能成像设备较高

的运动敏感性,以往关于ASD患者姿势控制障碍脑功能机制的探索主要集中在利用静息态方法分析运动相关脑区异常脑功能变化,而并无关于运动任务态下脑功能活动变化的研究且以往研究较少关注视觉皮层脑血流动力学变化,本研究采用适合于运动脑功能研究的fNIRS脑功能成像设备采集ASD儿童运动任务状态下的脑视觉皮层功能活动数据,发现V2短程和长程功能连接强度均显著降低,这与前人研究相一致^[50],表明在任务执行过程中该脑区内部及与其他脑区间的协同性较弱,不利于姿势平衡的保持。

3.3 本研究的局限性

a. 在研究对象选取方面,由于脑功能测试需要被试高度配合,因此本研究仅纳入轻中度的ASD儿童,限制了研究结论的推广。未来研究需进一步探索适合于不同症状程度ASD儿童的测试方案,并结合更低运动敏感性的脑功能成像设备对不同程度ASD伴MDs儿童的脑功能特征进行探究。

b. 在覆盖脑区方面,fNIRS探测范围有限,仅局限于大脑皮层下2~3 cm,并不涉及基底神经节、小脑等皮层下运动相关脑区。因此,未来应联合移动脑磁图等新型设备采集多模态信息,以多角度、全方位揭示ASD儿童MDs的脑神经机制。

c. 在进行踮脚走路任务态测试时,由于fNIRS测试设备线路限制及场地局限性,被试在任务执行过程中的脑活动变化可能掺杂一定的减速、转身及再次加速等方面的认知活动,因此在将此研究结果与仅直线行走或站立等数据进行比较时应注意。

4 结 论

与TD组相比,在执行不同粗大动作任务过程中ASD组表现出非典型的脑功能活动特征,具体表现如下。

在物体操控性动作(单手投袋)方面:a.代偿性过度激活与关键区域抑制。运动执行与视觉信息处理脑区激活下降,可能影响动作执行与物体空间定位能力,而ASD儿童通过增强运动计划与双侧协调的代偿性活动弥补感觉运动整合缺陷;b.双侧代偿与效率失衡。ASD儿童更加依赖于双侧网络协同完成动作任务,反映了低效的神经资源利用;c.跨网络整合能力受损。脑区间功能连接下降,降低信息传递效率,影响复杂动作的流畅性与准确性。

在身体稳定性动作(踮脚走路)方面:a.代偿

性神经资源过度动员。运动与认知相关脑区的广泛激活可能导致动作执行能耗增加, 表现为平衡稳定性差、动作僵硬或适应性不足; b. 双侧网络依赖。ASD 儿童以双侧脑区协同为主, 体现了高效单侧功能整合能力的缺乏; c. 局部与长程整合能力失衡。运动网络局部连接与跨网络整合不足共同导致动态平衡控制能力下降, 表现为执行任务时姿势调整迟缓或失衡风险增加。

参 考 文 献

- [1] Lord C, Elsabbagh M, Baird G, *et al.* Autism spectrum disorder. *Lancet*, 2018, **392**(10146): 508-520
- [2] Lord C, Charman T, Havdahl A, *et al.* The Lancet Commission on the future of care and clinical research in autism. *Lancet*, 2022, **399**(10321): 271-334
- [3] 王琳, 王志丹, 邢冰冰. 孤独症谱系障碍儿童动作发展障碍研究进展. 陕西学前师范学院学报, 2021, **37**(8): 16-22
Wang L, Wang Z D, Xing B B. *J Shaanxi Xueqian Norm Univ*, 2021, **37**(8): 16-22
- [4] 陈嘉洁, 曹牧青, 静进. 孤独症谱系障碍儿童运动功能缺陷研究. 中国学校卫生, 2020, **41**(10): 1590-1594
Chen J J, Cao M Q, Jing J. *Chin J Sch Health*, 2020, **41**(10): 1590-1594
- [5] 庞艳丽, 卜瑾, 董良山. 自闭症谱系障碍儿童动作发展障碍研究述评. 中国特殊教育, 2018, (4): 46-52
Pang Y L, Bu J, Dong L S. *Chin J Spec Educ*, 2018, (4): 46-52
- [6] Kangarani-Farahani M, Malik M A, Zwicker J G. Motor impairments in children with autism spectrum disorder: a systematic review and meta-analysis. *J Autism Dev Disord*, 2024, **54**(5): 1977-1997
- [7] Miller H L, Licari M K, Bhat A, *et al.* Motor problems in autism: co-occurrence or feature. *Dev Med Child Neurol*, 2024, **66**(1): 16-22
- [8] Zampella C J, Wang L A L, Haley M, *et al.* Motor skill differences in autism spectrum disorder: a clinically focused review. *Curr Psychiatry Rep*, 2021, **23**(10): 64
- [9] 宗文浩, 李可峰, 刘青, 等. 孤独症儿童运动功能障碍脑功能网络特征及运动干预机制研究进展. 中国运动医学杂志, 2024, **43**(8): 664-675
Zong W H, Li K F, Liu Q, *et al.* *Chin J Phys Med*, 2024, **43**(8): 664-675
- [10] 陈爱国, 蔡可龙, 董晓晓, 等. 孤独症运动干预的研究进展: 基础与应用. 上海体育大学学报, 2025, **49**(3): 13-23, 34
Chen A G, Cai K L, Dong X X, *et al.* *J Shanghai Univ Sport*, 2025, **49**(3): 13-23, 34
- [11] 朱丹瑶, 周加仙. 基本动作技能发展的神经机制及其教育促进策略. 教育生物学杂志, 2021, **9**(3): 204-210, 238
Zhu D Y, Zhou J X. *J Bio Educ*, 2021, **9**(3): 204-210, 238
- [12] 武志俊, 王争艳, 王强. 动作发展神经科学: 未来路径与布局. 中国科学: 生命科学, 2021, **51**(6): 619-633
Wu Z J, Wang Z Y, Wang Q. *Sci Sin Vitae*, 2021, **51**(6): 619-633
- [13] 漆昌柱, 宋一锐, 王淙一. 乒乓球运动员的视觉运动整合优势——基于功能偏侧化理论的 EEG 证据. 上海体育大学学报, 2024, **48**(11): 69-81, 104
Qi C Z, Song Y R, Wang C Y. *J Shanghai Univ Sport*, 2024, **48**(11): 69-81, 104
- [14] Bo J, Acluche F, Lasutschinkow P C, *et al.* Motor networks in children with autism spectrum disorder: a systematic review on EEG studies. *Exp Brain Res*, 2022, **240**(12): 3073-3087
- [15] Oldehinkel M, Mennes M, Marquand A, *et al.* Altered connectivity between cerebellum, visual, and sensory-motor networks in autism spectrum disorder: results from the EU-AIMS longitudinal European autism project. *Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging*, 2019, **4**(3): 260-270
- [16] Floris D L, Howells H. Atypical structural and functional motor networks in autism. *Prog Brain Res*, 2018, **238**: 207-248
- [17] Su W C, Culotta M, Tsuzuki D, *et al.* Movement kinematics and cortical activation in children with and without autism spectrum disorder during sway synchrony tasks: an fNIRS study. *Sci Rep*, 2021, **11**: 15035
- [18] Khan A J, Nair A, Keown C L, *et al.* Cerebro-cerebellar resting-state functional connectivity in children and adolescents with autism spectrum disorder. *Biol Psychiatry*, 2015, **78**(9): 625-634
- [19] Soma D, Hirokawa T, Hasegawa C, *et al.* Atypical resting state functional neural network in children with autism spectrum disorder: graph theory approach. *Front Psychiatry*, 2021, **12**: 790234
- [20] Li Y, Yu D. Weak network efficiency in young children with autism spectrum disorder: evidence from a functional near-infrared spectroscopy study. *Brain Cogn*, 2016, **108**: 47-55
- [21] Zhang F, Roeyers H. Exploring brain functions in autism spectrum disorder: a systematic review on functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) studies. *Int J Psychophysiol*, 2019, **137**: 41-53
- [22] 陈爱国, 熊轩, 朱丽娜, 等. 体育运动与儿童青少年脑智提升: 证据与理论. 体育科学, 2021, **41**(11): 43-51
Chen A G, Xiong X, Zhu L N, *et al.* *China Sport Sci*, 2021, **41**(11): 43-51
- [23] Caçola P, Getchell N, Srinivasan D, *et al.* Cortical activity in fine-motor tasks in children with developmental coordination disorder: a preliminary fNIRS study. *Int J Dev Neurosci*, 2018, **65**: 83-90
- [24] Unruh K E, Martin L E, Magnon G, *et al.* Cortical and subcortical alterations associated with precision visuomotor behavior in individuals with autism spectrum disorder. *J Neurophysiol*, 2019, **122**(4): 1330-1341
- [25] Ewen J B, Lakshmanan B M, Pillai A S, *et al.* Decreased modulation of EEG oscillations in high-functioning autism during a motor control task. *Front Hum Neurosci*, 2016, **10**: 198
- [26] 张亚茹, 文世林, 张雪冬, 等. 孤独症谱系障碍儿童动作协调能力与运动区皮质静息功能连接的特征分析. 首都体育学院学报, 2022, **34**(2): 170-179
Zhang Y R, Wen S L, Zhang X D, *et al.* *J Cap Univ Phys Educ Phys*,

- 2022, **34**(2): 170-179
- [27] Gowen E, Hamilton A. Motor abilities in autism: a review using a computational context. *J Autism Dev Disord*, 2013, **43**(2): 323-344
- [28] 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. *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. *Chin J Geriatr Care*, 2021, **19**(2): 3-9
- [29] Huang M X, Liu X H, Zhang Z J, *et al.* Functional connection between the stereotyped behavior and the motor front area in children with autism. *Br J Neurosurg*, 2018, **32**(6): 674-677
- [30] Thomas S, Barnett L M, Papadopoulos N, *et al.* How do physical activity and sedentary behaviour affect motor competence in children with autism spectrum disorder compared to typically developing children: a pilot study. *J Autism Dev Disord*, 2022, **52**(8): 3443-3455
- [31] Wang Z, Liao M, Li Q, *et al.* Effects of three different rehabilitation games' interaction on brain activation using functional near-infrared spectroscopy. *Physiol Meas*, 2020, **41**(12): 125005
- [32] Li H, Fu X, Lu L, *et al.* Upper limb intelligent feedback robot training significantly activates the cerebral cortex and promotes the functional connectivity of the cerebral cortex in patients with stroke: a functional near-infrared spectroscopy study. *Front Neurol*, 2023, **14**: 1042254
- [33] 邵佳慧, 李浩正, 王婷玮, 等. 基于功能性近红外光谱技术的吞咽相关任务大脑皮质功能偏侧化研究. *中国康复医学杂志*, 2022, **37**(5): 594-599
Tai J H, Li H Z, Wang T W, *et al.* *Chin J Rehabil Med*, 2022, **37**(5): 594-599
- [34] Yu Y, Shen X, Hong Y, *et al.* Characteristic brain functional activation and connectivity during actual and imaginary right-handed grasp. *Brain Res*, 2024, **1844**: 149141
- [35] Suh J H, Han S J, Choi S A, *et al.* Tablet computer-based cognitive training for visuomotor integration in children with developmental delay: a pilot study. *BMC Pediatr*, 2024, **24**(1): 683
- [36] Lepping R J, McKinney W S, Magnon G C, *et al.* Visuomotor brain network activation and functional connectivity among individuals with autism spectrum disorder. *Hum Brain Mapp*, 2022, **43**(2): 844-859
- [37] Takarae Y, Minshew N J, Luna B, *et al.* Atypical involvement of frontostriatal systems during sensorimotor control in autism. *Psychiatry Res*, 2007, **156**(2): 117-127
- [38] Thompson A, Murphy D, Dell'Acqua F, *et al.* Impaired communication between the motor and somatosensory homunculus is associated with poor manual dexterity in autism spectrum disorder. *Biol Psychiatry*, 2017, **81**(3): 211-219
- [39] Barber A D, Srinivasan P, Joel S E, *et al.* Motor "dexterity": evidence that left hemisphere lateralization of motor circuit connectivity is associated with better motor performance in children. *Cereb Cortex*, 2012, **22**(1): 51-59
- [40] Floris D L, Barber A D, Nebel M B, *et al.* Atypical lateralization of motor circuit functional connectivity in children with autism is associated with motor deficits. *Mol Autism*, 2016, **7**: 35
- [41] Li X, Jin M, Zhang N, *et al.* Neural correlates of fine motor grasping skills: longitudinal insights into motor cortex activation using fNIRS. *Brain Behav*, 2024, **14**(1): e3383
- [42] 乔淇淇, 吴翊馨, 王新, 等. 高精度经颅直流电刺激对人体动态平衡能力的影响. *中国组织工程研究*, 2022, **26**(26): 4192-4198
Qiao Q Q, Wu Y X, Wang X, *et al.* *Chin J Tissue Eng Res*, 2022, **26**(26): 4192-4198
- [43] Herold F, Orlowski K, Börmel S, *et al.* Cortical activation during balancing on a balance board. *Hum Mov Sci*, 2017, **51**: 51-58
- [44] 黄文琴, 廖八根, 李文静, 等. 老年人步行的大脑皮层激活研究进展. *中国运动医学杂志*, 2023, **42**(8): 665-672
Huang W Q, Liao B G, Li W J, *et al.* *Chin J Phys Med*, 2023, **42**(8): 665-672
- [45] 黄浩宇, 王静, 吴金庭, 等. 学龄前孤独症儿童额颞叶静息态功能连接特征近红外光谱成像研究. *中国神经精神疾病杂志*, 2023, **49**(12): 734-739
Huang H Y, Wang J, Wu J T, *et al.* *Chin J Nerv Ment Dis*, 2023, **49**(12): 734-739
- [46] Sam W. Distortions and disconnections: disrupted brain connectivity in autism. *Brain Cogn*, 2011, **75**(1): 18-28
- [47] 史姗姗, 杨文韬, 王颖鹏, 等. 静息态下孤独症谱系障碍儿童大脑前额叶的功能连接特征研究. *中国康复医学杂志*, 2023, **38**(5): 651-655
Shi S S, Yang W T, Wang Y P, *et al.* *Chin J Rehabil Med*, 2023, **38**(5): 651-655
- [48] 李松泽, 胡金生, 李骋诗, 等. 孤独症谱系障碍者的视觉-空间工作记忆缺陷及脑机制. *心理科学进展*, 2016, **24**(7): 1050-1064
Li S Z, Hu J S, Li C S, *et al.* *Adv Psychol Sci*, 2016, **24**(7): 1050-1064
- [49] Zhou R, Xie X, Wang J, *et al.* Why do children with autism spectrum disorder have abnormal visual perception. *Front Psychiatry*, 2023, **14**: 1087122
- [50] Villalobos M E, Mizuno A, Dahl B C, *et al.* Reduced functional connectivity between V1 and inferior frontal cortex associated with visuomotor performance in autism. *Neuroimage*, 2005, **25**(3): 916-925
- [51] Perkins T J, Bittar R G, McGillivray J A, *et al.* Increased premotor cortex activation in high functioning autism during action observation. *J Clin Neurosci*, 2015, **22**(4): 664-669

Analysis of The Characteristics of Brain Functional Activity in Gross Motor Tasks in Children With Autism Based on Functional Near-infrared Spectroscopy Technology*

ZONG Wen-Hao¹⁾, LIANG Qi²⁾, YANG Shi-Yu³⁾, WANG Feng-Jiao⁴⁾, WEI Meng-Zhao⁴⁾,
LEI Hong³⁾, DONG Gui-Jun^{1)**}, LI Ke-Feng^{5)**}

¹⁾Department of Sports, Quzhou University, Quzhou 324000, China;

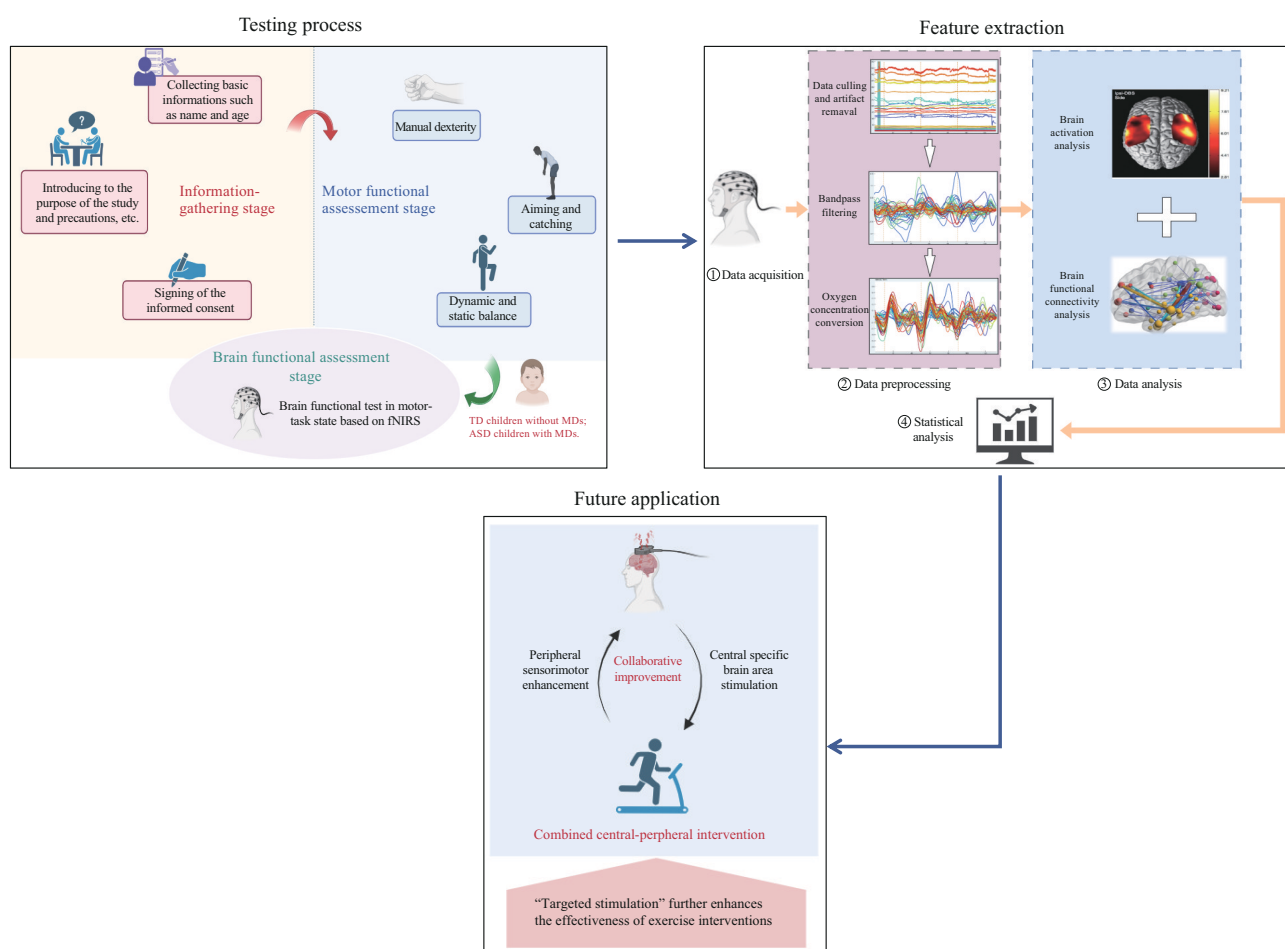
²⁾Medical and Health College, Linyi Vocational College, Linyi 276023, China;

³⁾College of Chemical and Material Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China;

⁴⁾Graduate School, Shandong Sport University, Jinan 250131, China;

⁵⁾Department of Medicine, Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China)

Graphical abstract



* This work was supported by grants from Graduate Teaching Reform Project for Higher Education During “the 14th Five-Year Plan” in Zhejiang Province (JGGC2024040), Humanities and Social Science Fund of Ministry of Education (23YJAZH026), and Project of Competitive Science and Technology Tackling Program of Quzhou (2023K217, 2023K239).

** Corresponding author.

DONG Gui-Jun. Tel: 86-570-8026602, E-mail: 42042@qzc.edu.cn

LI Ke-Feng. Tel: 86-570-8068636, E-mail: jmlikefeng@qzct.edu.cn

Received: April 16, 2025 Accepted: May 22, 2025

Abstract Objective Based on functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), we investigated the brain activity characteristics of gross motor tasks in children with autism spectrum disorder (ASD) and motor dysfunctions (MDs) to provide a theoretical basis for further understanding the mechanism of MDs in children with ASD and designing targeted intervention programs from a central perspective. **Methods** According to the inclusion and exclusion criteria, 48 children with ASD accompanied by MDs were recruited into the ASD group and 40 children with typically developing (TD) into the TD group. The fNIRS device was used to collect the information of blood oxygen changes in the cortical motor-related brain regions during single-handed bag throwing and tiptoe walking, and the differences in brain activation and functional connectivity between the two groups of children were analyzed from the perspective of brain activation and functional connectivity. **Results** Compared to the TD group, in the object manipulative motor task (one-handed bag throwing), the ASD group showed significantly reduced activation in both left sensorimotor cortex (SMC) and right secondary visual cortex (V2) ($P<0.05$), whereas the right pre-motor and supplementary motor cortex (PMC&SMA) had significantly higher activation ($P<0.01$) and showed bilateral brain region activity; in terms of brain functional integration, there was a significant decrease in the strength of brain functional connectivity ($P<0.05$) and was mainly associated with dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and V2. In the body stability motor task (tiptoe walking), the ASD group had significantly higher activation in motor-related brain regions such as the DLPFC, SMC, and PMC&SMA ($P<0.05$) and showed bilateral brain region activity; in terms of brain functional integration, the ASD group had lower strength of brain functional connectivity ($P<0.05$) and was mainly associated with PMC&SMA and V2. **Conclusion** Children with ASD exhibit abnormal brain functional activity characteristics specific to different gross motor tasks in object manipulative and body stability, reflecting insufficient or excessive compensatory activation of local brain regions and impaired cross-regions integration, which may be a potential reason for the poorer gross motor performance of children with ASD, and meanwhile provides data support for further unraveling the mechanisms underlying the occurrence of MDs in the context of ASD and designing targeted intervention programs from a central perspective.

Key words autism, motor dysfunctions, gross motor skills, brain functional characteristics

DOI: 10.16476/j.pibb.2025.0165

CSTR: 32369.14.pibb.20250165