

• 科研论著 •

发展性阅读障碍儿童视空间工作记忆脑激活特征及关联研究

肖欣雨¹, 尹菲菲¹, 高珊², 李娟³, 姬春¹, 左彭湘¹

1. 石河子大学医学院, 新疆维吾尔自治区 石河子 832000; 2. 泽普县教育局; 3. 泽普县第五中学

摘要: **目的** 分析发展性阅读障碍(DD)儿童执行视空间工作记忆任务时大脑前额叶皮层脑激活特征及其与阅读障碍症状的相关性,为 DD 儿童的鉴别诊断提供神经影像学依据。**方法** 2024 年 5—6 月对新疆某地区 1 所小学 3~5 年级全体学生进行 DD 筛查,根据家长意愿及儿童利手情况,最终纳入 33 名 DD 儿童,按年级、年龄、性别进行 1:1 匹配正常对照组儿童 33 名,利用功能性近红外成像(fNIRS)技术采集两组儿童视空间工作记忆任务下大脑前额叶皮层氧合血红蛋白(HbO₂)浓度变化,以反映其大脑前额叶皮层的激活情况,采用儿童汉语阅读障碍量表(DCCC)评估儿童的阅读障碍症状。采用两独立样本 *t* 检验或 Mann-Whitney *U* 检验比较两组儿童视空间工作记忆任务下大脑前额叶皮层 HbO₂ 浓度变化的差异,并使用 Spearman 相关分析 DD 儿童大脑前额叶皮层 HbO₂ 浓度变化与其阅读障碍症状的相关性。**结果** fNIRS 结果显示 DD 组儿童在背外侧前额叶通道 8($t=2.134$)、眶额叶皮层通道 13($Z=2.860$)和额极皮层通道 14($t=2.212$)中 HbO₂ 浓度变化的 β 值显著低于正常对照组儿童($P<0.05$)。DD 组儿童的 DCCC 总分及 8 个因子得分显著高于正常对照组儿童($Z=6.983, 6.626, 6.986, 6.941, 6.358, 6.915, 6.710, 6.864, 6.876, P<0.001$)。Spearman 相关分析结果发现,DD 儿童额极皮层通道 14 的 HbO₂ 浓度变化的 β 值与视知觉障碍因子($r=-0.430, P<0.05$)和书写障碍因子($r=-0.438, P<0.05$)呈显著负相关。**结论** DD 儿童存在视空间工作记忆缺陷,主要表现在背外侧前额叶、眶额叶皮层及额极皮层激活不足;额极皮层可能是辅助诊断 DD 儿童的生物学标记物。

关键词: 发展性阅读障碍; 视空间工作记忆; 功能性近红外成像技术; 儿童

中图分类号:R179 文献标识码:A 文章编号:1008-6579(2025)09-0959-05 doi:10.11852/zgetbjzz2025-0248

Neural activation patterns of visuospatial working memory and its clinical correlations in children with developmental dyslexia

XIAO Xinyu¹, YIN Feifei¹, GAO Shan², LI Juan³, JI Chun¹, ZUO Pengxiang¹

1. Medical College of Shihezi University, Shihezi, Xinjiang Uygur Autonomous Region 832000, China;

2. Education Bureau of Zepu County, Xinjiang Uygur Autonomous Region;

3. The Fifth Middle School of Zepu Country, Xinjiang Uygur Autonomous Region

Corresponding author: ZUO Pengxiang, E-mail:zuo_pengxiang@sina.com

Abstract: **Objective** To analyze the prefrontal cortex (PFC) activation patterns during visuospatial working memory tasks in children with developmental dyslexia (DD) and their correlation with dyslexic symptoms, so as to provide neuroimaging evidence for the differential diagnosis of DD. **Methods** From May to June 2024, a screening for DD was conducted among all third- to fifth-grade students at a primary school in Xinjiang. Based on parental consent and handedness, 33 children with DD were enrolled and matched 1:1 with typically developed (TD) controls by grade, age, and sex. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) was employed to measure concentration changes of oxygenated hemoglobin (HbO₂) in the PFC during visuospatial working memory tasks to reflect cortical activation. Dyslexic symptoms were assessed using the Diagnostic Checklist for Chinese Children (DCCC). Group differences in HbO₂ β -values were analyzed using independent samples *t*-tests or Mann-Whitney *U* tests, while Spearman correlation examined relationships between prefrontal cortex activation and dyslexic symptoms in DD children. **Results** The fNIRS results revealed significantly lower HbO₂ β -values in the DD group compared to controls in the dorsolateral prefrontal cortex (channel 8: $t=2.134$), orbitofrontal cortex (channel 13: $Z=2.860$), and frontopolar cortex (channel 14: $t=2.212$) ($P<0.05$). Additionally, the total score of the DCCC scale and the scores of its 8 factors were significantly higher in the DD group than those in the normal control group ($Z=6.983, 6.626, 6.986, 6.941, 6.358, 6.915, 6.710, 6.864, 6.876, P<0.001$).

基金项目:新疆生产建设兵团科技计划项目(2023ZD033)**作者简介:**肖欣雨(1999—),女,在读硕士研究生,主要研究方向为儿少卫生。**通信作者:**左彭湘, E-mail: zuo_pengxiang@sina.com

. Negative correlations were observed between HbO_2 β -values in the frontopolar cortex (channel 14) and scores on visual perception ($r = -0.430$) and writing impairment ($r = -0.438$) subscales ($P < 0.05$). **Conclusions** Children with DD have deficits in visuospatial working memory, mainly manifested in insufficient activation of the dorsolateral prefrontal cortex, orbito frontal cortex and fronto polar cortex. The frontopolar cortex may serve as a potential biomarker for auxiliary DD diagnosis.

Keywords: developmental dyslexia; visuospatial working memory; functional near-infrared spectroscopy; children

发展性阅读障碍(development dyslexia, DD)是学龄期儿童中常见的一种神经性发育障碍,指个体拥有正常的智力,且在同等的教育机会及生活环境下,其阅读准确性和流畅性显著低于相应年龄应有水平,处于阅读困难的状态^[1]。Yang 等^[2]的 Meta 分析显示,全球 DD 儿童的患病率达 7.10%,其中汉语 DD 儿童的患病率介于 3.45%至 10%之间^[3],这一现象已引起社会的广泛关注。然而,目前 DD 儿童的诊断主要依赖相关量表、心理学测验以及儿童的临床表现,易受个人情绪和主观经验的影响,且缺乏客观的生物学指标作为诊断依据。功能性近红外成像(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)技术已被用于探索注意缺陷多动障碍儿童^[4]、孤独症谱系障碍儿童^[5]以及神经认知障碍患者^[6]的客观生物学标志物,顾乔乔^[7]通过 fNIRS 指标与临床症状的相关分析,证实 fNIRS 可作为评估认知功能的临床工具;此外, fNIRS 具有较高的时间和空间分辨率、无创、便于携带及抗噪音能力强等特点^[8],较适合在儿童中使用。本研究利用 fNIRS 技术监测 DD 儿童执行视空间工作记忆任务时大脑前额叶氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO_2)浓度的变化、大脑前额叶皮层脑激活特征及其与阅读障碍症状的相关性,寻找 DD 儿童潜在的生物学标志物,为 DD 儿童的辅助诊断提供神经影像学依据。

1 对象和方法

1.1 对象 2024 年 5—6 月,采用随机整群抽样法抽取新疆某地区 1 所小学 3~5 年级全体学生共 1 004 名学生。采用儿童汉语阅读障碍量表(the Dyslexia Checklist for Chinese Children, DCCC)^[9]、儿童学习障碍筛查量表^[10]及中国修订韦氏儿童智力量表^[11]逐层筛选 DD 儿童,发放筛查问卷 1 004 份,回收有效问卷 957 份,有效回收率为 95.32%,根据家长意愿及儿童利手情况纳入 DD 儿童 33 名,按年级、年龄、性别 1:1 匹配正常对照组儿童,最终纳入 DD 组儿童和正常对照组儿童各 33 名。

DD 组儿童纳入标准:1)儿童汉语阅读障碍量表^[9]评分进行 T 分换算, $T > 70$; 2)儿童学习障碍筛查量表^[10]教师评价量表得分 < 65 分; 3)中国修订韦

氏儿童智力量表^[11]总智商 ≥ 85 分; 4)自愿参与并能理解测试任务。正常对照组儿童纳入标准:1)儿童汉语阅读障碍量表^[9]评分进行 T 分换算, $T \leq 70$; 2)儿童学习障碍筛查量表^[10]教师评价量表得分 ≥ 65 分; 3)中国修订韦氏儿童智力量表^[11]总智商 ≥ 85 分; 4)自愿参与并能理解测试任务; 5)来自 DD 组儿童同年级或班级,且性别、年龄及家庭背景等与 DD 组儿童大致相同。两组排除标准:1)有脑部或神经系统疾病; 2)有听力或视力障碍; 3)左利手; 4)拒绝参与本研究。本研究得到调研学校、参与实验的学生及其监护人的知情同意,并经石河子大学第一附属医院伦理委员会批准(批号: KJ2023-377-01)。

1.2 方法

1.2.1 研究工具 1)儿童汉语阅读障碍量表(DCCC)^[9]共 57 个条目,涵盖口语、书面表达、不良阅读习惯、注意力障碍等 8 个因子。评分经 T 换算后, $T = 50 + 10(X - M) / SD$, $T > 70$ 分表示存在阅读障碍,且 T 分越高,阅读障碍症状越明显。若任一因子异常,儿童即被诊断为汉语阅读障碍,因子异常数量越多,汉语阅读障碍问题越严重。该量表的 Cronbach's α 系数为 0.72。2)儿童学习障碍筛查量表^[10],该量表共 24 个条目,适用于 5~15 岁儿童,该量表由熟悉儿童的班主任完成,量表总分 < 65 分则疑似存在学习障碍。该量表的 Cronbach's α 系数为 0.95。3)中国修订韦氏儿童智力量表^[11],用于评估 6~16 岁儿童智力水平的工具,该量表由言语测验和操作测验两部分组成,全智商 ≥ 85 分则表示儿童智力水平正常。该量表的 Cronbach's α 系数为 0.81。

1.2.2 实验程序 本研究使用 E-prime3.0 软件编制视空间工作记忆任务程序。该任务的 1 个 trial 由注视点、识记刺激、保持间隔、目标刺激及灰色屏幕 5 部分构成。首先,在电脑屏幕中央呈现 1 000ms 的注视点“+”,然后呈现 1 000ms 的识记刺激,随后呈现 4 000ms 的保持间隔,再给予 4 000ms 的目标刺激,出现目标刺激要求被试做按键反应,判断目标刺激是否由识记刺激向左或向右旋转 90°得到,若是,则按“J”键,若不是,则按“F”键,最后呈现 1 000ms 的灰色屏幕。见图 1。

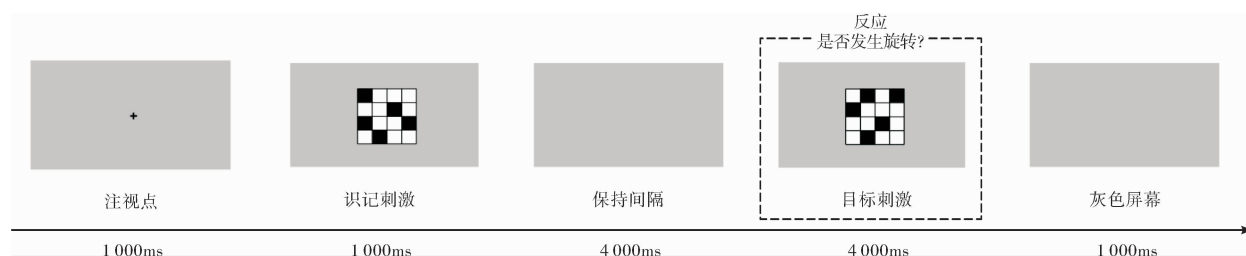


图 1 视空间工作记忆任务

Fig. 1 Visuospatial working memory

1.2.3 fNIRS 数据采集 本研究使用无线便携式 NIRSport2 近红外脑功能成像系统(德国 NIRX 公司),测量被试在视空间工作记忆任务下大脑前额叶皮层 HbO₂ 浓度变化情况。该 fNIRS 由 8 个光源和 7 个探测器组成 20 个通道,各通道在大脑前额叶皮层分布位置见图 2,其中光源及其相应的光源探测器之间的距离为 3cm,波长分别是 760nm 和 850nm,采样率为 10.172 5Hz。

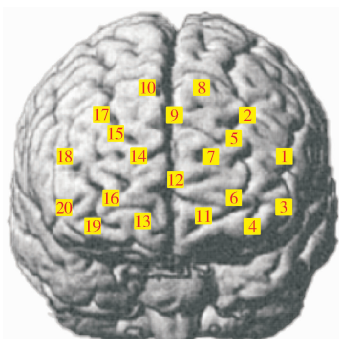


图 2 各通道在大脑前额叶皮层分布位置图

Fig. 2 Distribution location of each channel in the prefrontal cortex of the brain

1.3 质量控制 使用量表对 DD 儿童进行筛查阶段,对学校 3~5 年级班主任进行统一培训,以确保问卷发放及回收质量。被试在进行近红外实验阶段,先对被试进行视空间工作记忆任务的预实验,正确率>75%才能进行正式实验;正式实验过程中,检查光源和探测器是否正常工作,确保信号强度在可接受范围内;实验中需在被试头部放置遮光帽,以减少环境光对实验的干扰,提高测量的准确性;对于头发较厚的被试,使用发光挖耳勺将头发分开,确保探头与头皮接触良好。由一名固定的研究者完成所有被试的 fNIRS 数据采集,以保证实验操作的一致性,减少因操作差异带来的数据变异。

1.4 统计学方法 采用 SPSS 27.0 软件分析数据。正态分布的连续变量以 $\bar{x} \pm s$ 表示,两组间比较采用 t 检验;非正态分布的连续变量以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,

两组间比较采用非参数检验。计数资料以例数(%)表示,两组间比较采用 χ^2 检验。采用 nirsLAB 软件的标准化流程处理 fNIRS 数据,得到每个通道的 HbO₂ 浓度变化的 β 值,并检验其正态性,使用两独立样本 t 检验或 Mann-Whitney U 检验比较两组儿童 HbO₂ 浓度变化的 β 值,筛选出具有显著性差异的通道;采用 Spearman 相关分析筛选出显著性差异的通道与 DCCC 得分间的相关性。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 DD 组儿童和正常对照组儿童基本情况 研究纳入 66 名被试,33 名 DD 儿童和 33 名正常儿童,每组男生 20 名,女生 13 名,平均年龄为(10.03 $\pm$ 0.93)岁。两组儿童年级、年龄、性别、智商差异均无统计学意义($P>0.05$)。

2.2 DD 组儿童和正常对照组儿童在视空间工作记忆任务下大脑前额叶皮层 HbO₂ 浓度变化的 β 值比较 与正常对照组儿童相比,DD 组儿童在背外侧前额叶通道 8、眶额叶皮层通道 13 及额极皮层通道 14 上 HbO₂ 浓度变化的 β 值均显著低于正常对照组儿童($P<0.05$);但 DD 组儿童和正常对照组儿童在其余通道的 HbO₂ 浓度变化的 β 值差异均无统计学意义($P>0.05$)。见表 1。

2.3 DD 组儿童和正常对照组儿童 DCCC 得分比较 DD 组儿童 DCCC 总分和 8 个因子得分均显著高于正常对照组儿童,差异有统计学意义($P<0.001$)。见表 2。

2.4 DD 儿童前额叶皮层 HbO₂ 浓度变化的 β 值与阅读障碍症状的相关性 Spearman 相关分析结果发现,DD 儿童仅额极皮层通道 14 的 HbO₂ 浓度变化的 β 值与 DCCC 的视知觉障碍因子($r=-0.430$)和书写障碍因子($r=-0.438$)呈显著负相关($P<0.05$);背外侧前额叶通道 8 和眶额叶皮层通道 13 的 HbO₂ 浓度变化的 β 值与 DCCC 评估总分及各因子均无相关性($P>0.05$)。见表 3。

表 1 DD 组儿童和正常对照组儿童存在显著差异通道的 HbO₂ 浓度变化的 β 值比较

Tab. 1 Comparison of HbO₂ β values of significant difference channels between DD group children and normal control group children

通道	DD 组 (n=33)	正常对照组 (n=33)	t/Z 值	P 值
8	-0.06±0.42	0.19±0.54	2.134 ^a	0.037
13	-0.40(-8.97,1.35)	0.28(-1.96,11.50)	2.860 ^b	0.004
14	-0.15±0.68	0.30±0.98	2.212 ^a	0.031

注:^at 值,^bZ 值。

表 2 DD 组儿童和正常对照组儿童 DCCC 得分比较 [M(P₂₅,P₇₅)]

Tab. 2 Comparison of DCCC scores between children in DD group and normal control group [M(P₂₅,P₇₅)]

项目	DD 组 (n=33)	正常对照组 (n=33)	Z 值	P 值
DCCC 总分	73.98(69.03,78.05)	44.79(41.93,48.26)	6.983	<0.001
口语障碍	64.51(59.75,74.38)	45.09(40.59,48.81)	6.626	<0.001
书面表达障碍	74.45(68.82,79.61)	43.46(40.29,48.10)	6.986	<0.001
不良阅读习惯	73.10(66.66,77.89)	43.05(38.76,48.99)	6.941	<0.001
视知觉障碍	72.99(61.86,81.62)	44.95(40.29,46.99)	6.358	<0.001
注意力障碍	71.22(66.91,75.76)	45.65(41.18,47.97)	6.915	<0.001
书写障碍	75.82(70.29,81.11)	45.67(41.53,49.99)	6.710	<0.001
听知觉障碍	71.55(61.15,76.71)	45.55(41.85,48.26)	6.864	<0.001
意义理解障碍	69.99(64.34,78.83)	45.76(40.85,49.23)	6.876	<0.001

表 3 DD 儿童大脑前额叶皮层 HbO₂ 浓度变化 β 值与 DCCC 得分的相关分析(r 值,n=33)

Tab. 3 Correlation between the β value of oxyhemoglobin concentration in the prefrontal cortex of DD children and the score of DCCC (r-value, n=33)

项目	总分	口语障碍	书面表达	不良阅读习惯	注意力障碍	视知觉障碍	书写障碍	听知觉障碍	意义理解障碍
背外侧前额叶通道 8	-0.042	0.227	-0.084	0.106	-0.111	-0.143	-0.100	0.005	0.114
眶额叶皮层通道 13	0.201	0.036	0.063	0.024	0.292	0.024	0.084	0.160	0.293
额极皮层通道 14	-0.328	-0.067	0.022	-0.339	-0.305	-0.430 [*]	-0.438 [*]	-0.314	-0.108

注:^{*}P<0.05。

3 讨论

3.1 DD 儿童大脑前额叶皮层激活不足 本研究利用 fNIRS 技术,比较了 DD 组儿童和正常对照组儿童在执行视空间工作记忆任务时大脑前额叶皮层的 HbO₂ 浓度变化,结果显示,DD 组儿童在背外侧前额叶通道 8、眶额叶皮层通道 13 和额极皮层通道 14 的 HbO₂ 浓度变化的 β 值显著低于正常对照组儿童,表明 DD 儿童在完成视空间工作记忆任务时,大脑前额叶皮层可能存在激活不足。吴汉荣等^[12]研究发现,DD 儿童在工作记忆任务下左前额叶的激活范围和强度明显弱于正常儿童,提示 DD 儿童可能存在局部脑血流代谢异常和脑功能缺陷;Hou 等^[13]的研究显示,与健康人相比,注意缺陷多动障碍患者执行认知任务期间相关脑区的激活范围小于健康人,激活程度弱甚至未能激活。因此,DD 儿童的视空间工作记忆缺陷可能源于大脑背外侧前额叶、眶额叶皮层及额极皮层的功能损伤,使 DD 儿童在执行视空间工作记忆任务时不能像正常儿童一样增加大脑前额叶皮层的激活程度,因而表现出阅读

困难状态。

3.2 DD 儿童的额极皮层与阅读障碍症状存在相关性 本研究进一步分析发现,DD 儿童额极皮层通道 14 的 HbO₂ 浓度变化的 β 值与视知觉障碍因子和书写障碍因子呈显著负相关($r = -0.430$ 、 -0.438 , $P < 0.05$);而在背外侧前额叶通道 8 和眶额叶皮层通道 13 的 HbO₂ 浓度变化的 β 值与其他各因子均无相关性。表明 DD 儿童的额极皮层功能可能与视知觉障碍和书写障碍密切相关。具体而言,DD 儿童视知觉障碍因子得分越高,额极皮层激活程度越低。视知觉障碍主要指的是儿童对汉字字形的视觉加工过程存在困难,其得分高反映儿童在视觉加工汉字字形方面存在显著缺陷。Shao 等^[14-15]的研究证实,额极皮层在视觉信息处理中起关键作用。汉字作为表意文字,其复杂的空间结构对视觉加工能力要求更高^[16]。因此,DD 儿童在汉字字形加工和正字法表征形成方面的困难,可能与其额极皮层的功能异常有关。此外,DD 儿童书写障碍因子得分越高,额极皮层激活程度越低。书写障碍主要指的是儿童在书面语使用和输出方面存在

困难,它反映了儿童在意义加工、书面词汇量缺失和书写技能的综合障碍。额极皮层是额叶的最前端部分,属于前额叶皮层的重要组成部分,主要负责高级认知功能,如计划、决策及工作记忆^[17],其功能障碍可能会影响书写过程。Ardila 等^[18]研究表明,额叶损伤患者很难保持书写所需要的努力,并存在组织书面文本内容的困难。因此,DD 儿童的书写障碍可能与额极皮层的功能异常有关。

综上所述,DD 儿童的视空间工作记忆缺陷主要表现为背外侧前额叶、眶额叶皮层及额极皮层的激活不足。DD 儿童额极皮层的 HbO₂ 浓度变化与阅读障碍症状存在显著相关性,阅读障碍症状越严重,额极皮层的激活程度越低。额极皮层可能是 DD 儿童执行视空间工作记忆任务时的核心脑区,可作为辅助诊断 DD 儿童的生物标记物和干预靶点。但本研究还存在一定的局限性,所使用 fNIRS 设备覆盖脑区范围有限,建议未来研究采用多通道 fNIRS 系统以覆盖枕叶、顶叶等更广泛的脑区,探究不同脑区间的功能连接模式。此外,样本来源单一且数量有限,建议未来研究通过多中心、跨地域的协作扩大样本规模与多样性。

参考文献

- [1] Elliott JG, Grigorenko EL. Dyslexia in the twenty-first century: A commentary on the IDA definition of dyslexia[J]. *Ann Dyslexia*, 2024, 74(3):363-377.
- [2] Yang L, Li C, Li X, et al. Prevalence of developmental dyslexia in primary school children: A protocol for systematic review and Meta-analysis[J]. *World J Pediatr*, 2022, 18(12):804-809.
- [3] 朱瑞, 申仁洪. 汉语发展性阅读障碍的语义加工缺陷: 基本表征、发生机制与干预模式[J]. *中国特殊教育*, 2023(10): 45-52.
Zhu R, Shen RH. Semantic processing deficits in Chinese developmental dyslexia: Basic representation, occurrence mechanism and intervention mode[J]. *Chinese Journal of Special Education*, 2023(10):45-52. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] Su W, Culotta M, Mueller J, et al. fNIRS-based differences in cortical activation during tool use, pantomimed actions, and meaningless actions between children with and without autism spectrum disorder (ASD)[J]. *Brain Sci*, 2023, 13(6):876.
- [6] 徐国栋, 江文字, 张静莎, 等. 基于近红外脑功能成像的老年轻度认知障碍患者脑功能异常评估[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(11):1606-1612.
Xu GD, Jiang WY, Zhang JS, et al. The assessment of abnormal brain function in patients with mild cognitive impairment based on fNIRS brain imaging[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2024, 39(11):1606-1612. (in Chinese)
- [7] 顾乔乔. 重性抑郁障碍 fNIRS 脑血流动力学特征与临床症状及认知功能关系的研究[D]. 新乡: 新乡医学院, 2022.
Gu QQ. Study of relationship between fNIRS cerebral hemodynamic response and clinical symptoms and cognitive function in patients with major depressive disorder[D]. Xinxiang: Xinxiang Medical College, 2022. (in Chinese)
- [8] Rahman MA, Siddik AB, Ghosh TK, et al. A narrative review on clinical applications of fNIRS[J]. *J Digit imaging*, 2020, 33(5):1167-1184.
- [9] 尹菲菲, 高姗, 李娟, 等. 家庭功能与发展性阅读障碍儿童阅读能力的关系研究[J]. *中国儿童保健杂志*, 2024, 32(12): 1288-1293.
Yin FF, Gao S, Li J, et al. Relationship between family functioning and reading ability in children with developmental dyslexia[J]. *Chin J Child Health Care*, 2024, 32(12): 1288-1293. (in Chinese)
- [10] 刘姿铤, 徐小雨, 潘宁, 等. 儿童认知能力与学习障碍的关联性研究[J]. *中国儿童保健杂志*, 2022, 30(8):834-838.
Liu ZZ, Xu XY, Pan N, et al. Study on the correlation between cognitive ability and learning disability in children[J]. *Chin J Child Health Care*, 2022, 30(8):834-838. (in Chinese)
- [11] 龚耀先, 蔡太生. 中国修订韦氏儿童智力量表[J]. *中国临床心理学杂志*, 1994, 2(1):6.
Gong YX, Cai TS. The Wechsler Intelligence Scale for Children revised in China[J]. *Chinese Journal of Clinical Psychology*, 1994, 2(1):6. (in Chinese)
- [12] 吴汉荣, 姚彬, 余毅震. fNIRI 技术对汉语阅读障碍儿童工作记忆的研究[J]. *生物医学工程与临床*, 2004(4): 192-195.
Wu HR, Yao B, Yu YZ. Study on working memory of children with chinese reading dyslexia by fNIRI[J]. *Biomedical Engineering and Clinical Medicine*, 2004(4):192-195. (in Chinese)
- [13] Hou L, Yang J, Xu L, et al. Activation of brain regions associated with working memory and inhibitory control in patients with attention-deficit/hyperactivity disorder in functional near-infrared spectroscopy: A systematic review[J]. *Curr Med imaging*, 2023, 19(8):865-873.
- [14] Shao Z, Zhang M, Yu Q. Stimulus representation in human frontal cortex supports flexible control in working memory[J]. *Elife*, 2025, 13:RP100287.
- [15] Kroger J, Kim C. Frontopolar cortex specializes for manipulation of structured information[J]. *Front Syst Neurosci*, 2022, 16:788395.
- [16] Xu Z, Wang L, Liu D, et al. The moderation effect of processing efficiency on the relationship between visual working memory and chinese character recognition[J]. *Front Psychol*, 2020, 11:1899.
- [17] Hogeveen J, Medalla M, Ainsworth M, et al. What does the frontopolar cortex contribute to goal-directed cognition and action? [J]. *J Neurosci*, 2022, 42(45):8508-8513.
- [18] Ardila A, Surloff C. Dysexecutive agraphia: A major executive dysfunction sign[J]. *Int J Neurosci*, 2006, 116(5):653-663.