

眼动追踪在神经精神疾病中的跨疾病整合与个性化诊疗研究进展

宋烨磊, 许昌璠, 杨越, 陈熠, 张宇恒*

杭州医学院临床医学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年7月1日; 录用日期: 2025年7月24日; 发布日期: 2025年8月5日

摘要

背景: 神经精神疾病是一类涉及神经系统结构和功能障碍的复杂疾病, 其发病机制和临床表现具有多样性。目前, 该疾病缺乏精准的诊断手段, 临床诊断及预后评估很大程度上依赖于医生的临床主观判断。眼动追踪是一种新兴的技术, 为神经精神疾病的诊断提供了客观、可量化且无创的评估方法, 同时在探索疾病生物标志物方面展现出独特的价值与潜力。**目标:** 本综述旨在探讨眼动追踪技术作为探索神经精神疾病生物学标志物的潜力, 并结合技术设备的发展历程, 展望其在临床个性化诊疗中的应用。**方法:** 全面的文献检索工作着眼于眼动追踪在神经精神疾病领域的研究与应用。通过PubMed、CNKI、Web of Science确定了相关出版物, 使用关键术语, 例如“神经退行性疾病中的眼球运动”、“眼动的生物标志物”等。还纳入了微型化硬件和基于AI的智能化干预措施的研究。**结果:** 现有研究利用眼动追踪技术发现扫视速度与注视分散度可作为判断神经精神疾病的潜在标志物。此外, 眼动追踪技术中微型化硬件的应用以及AI智能化解析的融入, 为该疾病的诊断与治疗提供了广阔的应用前景。沉浸式VR技术与机器学习在此技术中的不断发展有助于推动临床个性化诊疗。**结论:** 眼动追踪技术以可量化、无创式的个性化诊疗为切入角度, 未来可在眼动生物学标志的挖掘以及AI模型在多模式治疗策略中的应用进展方面开展深入研究。

关键词

眼动追踪技术, 神经精神疾病, 跨疾病整合, 个性化诊疗, 生物标志物

Research Advances in Eye Movement Tracking for Cross-Disorder Integration and Personalized Diagnosis and Treatment in Neuropsychiatric Disorders

Yelei Song, Changjun Xu, Yue Yang, Yi Chen, Yuheng Zhang*

*通讯作者。

文章引用: 宋烨磊, 许昌璠, 杨越, 陈熠, 张宇恒. 眼动追踪在神经精神疾病中的跨疾病整合与个性化诊疗研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(8): 270-283. DOI: 10.12677/acm.2025.1582231

School of Clinical Medicine, Hangzhou Medical College, Hangzhou Zhejiang

Received: Jul. 1st, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Aug. 5th, 2025

Abstract

Background: Neuropsychiatric disorders represent a spectrum of complex conditions involving structural and functional impairments of the neural system, characterized by heterogeneous pathogenetic mechanisms and clinical manifestations. Current diagnostic approaches lack precision, with clinical diagnosis and prognostic evaluation predominantly reliant on subjective physician assessment. Eye movement tracking (EMT) emerges as a novel technology providing objective, quantifiable, and non-invasive evaluation for neuropsychiatric disorders, demonstrating unique value and potential in discovering disease biomarkers. **Objective:** This review aims to explore EMT's capability in identifying biological biomarkers for neuropsychiatric disorders and project its clinical application toward personalized diagnosis and treatment through technological evolution. **Methods:** A comprehensive literature search focused on the research and application of EMT in the field of neuropsychiatric disorders. Relevant publications were identified through PubMed, CNKI, and Web of Science using key terms such as "eye movements in neurodegenerative diseases", "eye movement biomarkers", etc. Studies on miniaturized hardware and AI-based intelligent intervention measures were also included. **Results:** Existing studies utilized EMT technology to identify saccadic velocity and fixation dispersion as potential biomarkers for neuropsychiatric conditions. Furthermore, the application of miniaturized EMT hardware and the integration of AI-powered analytics in EMT technology offer broad prospects for the diagnosis and treatment of these disorders. The ongoing development of immersive VR technology and machine learning within this field is expected to further advance personalized clinical diagnosis and treatment. **Conclusion:** EMT, characterized by its quantifiable and non-invasive approach to personalized diagnosis and treatment, holds promise for future in-depth research focusing on the discovery of eye movement biomarkers and the application of AI models in multimodal treatment strategies.

Keywords

Eye Movement Tracking Technology, Neuropsychiatric Disorders, Cross-Disease Integration, Personalized Diagnosis and Treatment, Biomarker

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

神经精神疾病(neuropsychiatric disorders, ND)是导致全球疾病负担的主要原因之一,其本质是一大类以神经系统结构和功能障碍为特征的疾病[1]。ND不仅包括脑、脊髓、周围神经、肌肉等器质性损害性疾病,还包括无明确器质性损害而以精神行为异常为突出表现的高级神经功能障碍性疾病。器质性损害性疾病可利用影像学技术和理化检测的方式发现病灶[2],而临床上神经功能障碍性疾病目前影像学、实验室检查无法对其实质性病灶进行准确判断,往往依赖于临床上医生的经验与判断。挖掘更多技术实现神经功能障碍性疾病的早筛早治,对该疾病诊断及干预具有重要意义。因此,本文的论述中心为后者,即高级神经功能障碍性疾病,它涵盖神经退行性疾病(如阿尔茨海默病、帕金森病)、神经发育障碍(如自闭症(autism spectrum disorders, ASD)谱系障碍、注意缺陷、多动障碍)及精神障碍(如抑郁症、精神分裂症)等

类别。作为高级神经功能障碍性疾病中的一种,神经退行性疾病(neurodegenerative diseases, NDD)是由于神经元及其髓鞘丧失所导致的神经元功能障碍。其临床表现因大脑受损区域不同而呈现多样化特征,如黑质致密部(substantia nigra pars compacta, SNpc) [3]和纹状体[4]等区域会导致运动功能障碍,海马与内侧颞叶[5]、前额叶皮质[6]等区域会导致认知功能下降以及痴呆等临床症状。这类疾病可导致引起中枢神经系统或外周神经系统中神经元的进行性损失,继而造成肢体运动能力的下降。蛋白质错误折叠和病理性聚集是 NDD 的关键特征[7]。此外,神经发育障碍(neurodevelopmental disabilities, NDDb)是一类主要发生于发育阶段、以行为和认知障碍为特征的慢性脑功能障碍性疾病,常见于儿童群体,具有较高的致残率,且临床上缺乏有效的治疗手段[8]。精神障碍类疾病是一组涉及认知、情感、思维及行为的疾病。由于其临床表现多样且致病机制复杂,目前尚未完全明确其病因,也缺乏针对性的有效治疗方法[9] [10]。神经精神疾病虽被认为与大脑功能改变相关,但目前却缺乏可捕捉的明显神经病理标记,其分子机制亦大多未被阐释[11]。早期诊断的局限性、病程的迁延性以及药物递送的生物屏障等难题,致使心理障碍与精神疾病的治疗方案至今难以实现突破性进展[12]。值得关注的是,越来越多的证据显示,这类疾病与眼动特征存在关联,而眼动追踪技术对眼球运动的精准捕捉,或许为神经精神疾病的诊断与干预提供了新的切入点。

眼动追踪技术(eye-tracking technology, ETT)的核心是对眼球运动的捕捉和处理。眼球运动主要有三种形式:注视(fixation)、平滑追踪(smooth tracking)及扫视(saccade) [13]。ETT 只能通过注视和扫视的形式捕获注视信息。在使用 ETT 时,受试者需将视线聚焦于空间中的某一特定点。通过测量其注视次数、频率和持续时间等参数,可反映注意力的注视特征及激活时间[14]。在神经系统患者缺乏运动-语言完整性的情况下,ETT 主要被用作进行神经心理学测试的工具[15]。其优势在于非侵入性映射神经认知功能[16],通过分析眼球运动模式的变化,清晰地呈现出神经结构的病变对眼球运动模式的影响。Daffner 等人[17]就应用 ETT 测量了 12 例 AD 患者和 10 名匹配健康对照人群对视觉刺激的反应,结果显示 AD 患者观看新奇刺激物的时间明显少于对照组且总体上表现出视觉探索减少,表明了 ETT 在 ND 中的潜力,因此眼球运动改变可能可以作为神经人群认知功能障碍判断的有效指标[16]。

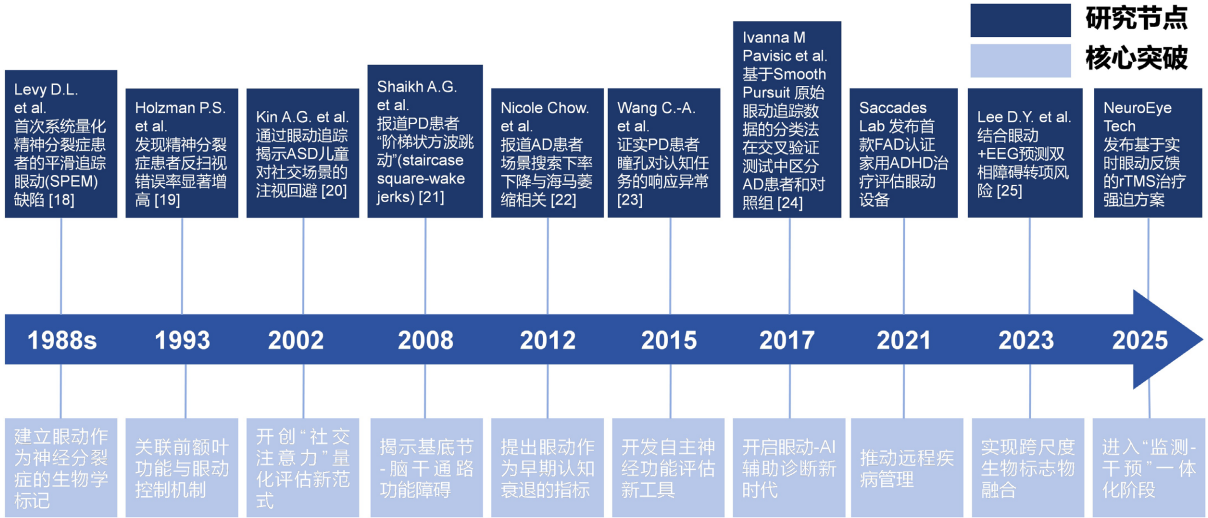


Figure 1. Development timeline and milestones of eye movement tracking in neuropsychiatric disorders research, highlighting key studies and technological evolution
图 1. 眼动追踪在神经精神疾病研究中的发展时间轴与里程碑、突出里程碑研究和技术演进

随着人们对眼球运动的持续关注,越来越多的研究者认为眼球运动异常性可作为神经功能障碍性疾病

病的行为特征。Kang 等人[26]的研究揭示了黑质多巴胺神经元的缺失,会导致 AD 患者的记忆引导扫视准确性提前受损,而帕金森患者(Parkinson's disease, PD)的垂直反扫潜伏期延长。在对患有 ASD 儿童的研究中,Lio 等人[27]发现,注视人脸眼睛时间的减少以及注视物体边缘频率的增加,均与大脑区域连接异常存在关联。Orui 等人[28]分析了基于社区的环境中,特定神经发育症状与眼睛凝视对社会信息的持续时间之间的关联,GLM 分析结果显示,4 岁时眼睛凝视社会信息注视时间较短与情绪问题和同伴问题显著相关,表明眼动用于神经发育筛查的潜力;同时,也有报道称抑郁症患者的注视和扫视次数较健康对照组明显偏多,注视持续时间短,扫视持续时间长,峰值扫视速度明显高于健康对照组,表明抑郁症患者对负面刺激反应时间延长与边缘系统过度激活和认知偏差相关[29]。目前,ETT 在神经功能障碍性疾病的评估与监测中的应用研究正逐步开展,对神经系统疾病的认知状态、疾病严重程度及疾病进展的评估展现出良好的应用前景[14],也为神经精神疾病的诊断和预后判断提供潜在策略,如图 1 总结了眼动追踪在神经精神疾病中的发展进程。

同时,ETT 也随着科技水平的进步在不断发展。硬件微型化和人工智能(artificial intelligence, AI)技术引入为 ETT 带来了更为多元的临床治疗手段,并提高了患者的依从性。Kumar 等人[30]开发了一款名为 Smart Eye 的凝视评估工具,通过实时评估眼睛注视、平滑追逐和眨眼以响应静态和动态视觉刺激的凝视相关指标,可作为中风评估的潜在定量生物标志物。Mojo augmented reality contact lens (Mojo Vision 公司为 ETT 设备配备了定制的加速计、陀螺仪和磁强计的超精确智能隐形眼镜眼动追踪器)镜头中内置了一个微型反向卡塞格林望远镜,有助于快速眼动追踪,并具备构建眼控用户界面的能力[31]。Wu 等人[32]利用合成扫视和基于图像两种机器学习(machine learning, ML)方法,根据儿童自由观看自然图像的扫描路径数据自动对 ASD 进行分类。Pavisc 等人[24]测量了 36 名年轻发作的阿尔兹海默病(YOAD)患者和 21 名年龄匹配的健康对照的眼跳前注视稳定性和平滑追踪指标,观察到不同组别的眼球运动数字生物标志物存在显著差异,且基于 ML 的预测模型可以以 95%的准确率识别 YOAD。

因此,本综述欲以跨越传统疾病分类界限聚焦不同疾病之间共享的临床特征、神经机制或生物标志物的跨疾病视角,利用 ETT 技术检测神经精神疾病患者的眼球运动,为神经精神疾病的诊疗提供新的思路。同时,本综述侧重于识别和阐述跨研究或跨疾病观察到的眼动异常的共同模式、趋势及其潜在的临床意义,而非对不同研究的具体数值进行直接统计比较或汇总。与目前主要关注的包括 AD、PD 等的神经退行性疾病、抑郁症等精神障碍或者是自闭症、ADHD 等神经发育障碍的诊断或认知方面的综述[3]-[10]相比,本综述系统梳理了 ETT 在神经功能障碍性疾病中的应用,归纳了通过该技术揭示的疾病共性特征,以及其结合新兴科技衍生出的多元化临床应用价值[30]-[32]。同时,通过全面视角,整合临床观察与技术创新,旨在弥补两者之间的鸿沟,深入剖析眼动追踪技术的高时空分辨率与非侵入性优势,凸显其带来的新兴视角与工具。

2. 材料与方法

本综述通过文献检索的方式,筛选出 1988 年至 2025 年期间(该时段的文献涵盖了从 ETT 首次应用于神经精神疾病研究直至当今的相关成果)发表的以 ETT 与神经精神疾病为主题且经同行评审的论文。调研了临床研究、基础研究和高质量综述的结合及内容,对现有知识进行了全面的总结,而不是系统性的荟萃分析。

本综述纳入的文献是根据其与研究主题的相关性来筛选,重点关注神经发育障碍和神经退行性疾病这两大类神经精神疾病中与扫视障碍、注视不稳定、平滑追踪缺陷及瞳孔变化相关的眼动异常表现。ETT 在神经精神疾病中的临床和技术应用的研究也在本文的归纳范围,特别关注利用 ETT 技术对神经精神疾病的早期筛查、预后判断及治疗策略中的应用潜力,客观地讨论 ETT 在该领域中的新观点和新趋势。

文献调研策略是通过 PubMed、CNKI、Web of Science、VIP 和 Google Scholar 中进行结构化检索，使用定制的关键字组合和布尔运算符(AND、OR)来优化检索结果，确定强相关性的文献。应用的检索词如下：1) PubMed/CNKI/VIP：(“医学”或“神经发育障碍”或“神经退行性疾病”)和(“眼动”或“眼动追踪”或“眼球追踪”或“动眼神经”或“生物标志物”)；2) Web of Science：TITLE-ABS-KEY (“神经发育障碍”或“神经退行性疾病”)和(“扫视”或“注视”或“动眼神经”或“眼动追踪”)；3) Google Scholar：“神经发育障碍”+“眼动追踪”+“医学”。阅读综述时会通过引文跟踪检索到对应文章，特别是来自该领域的临床研究和基础研究。

讨论围绕眼动作为神经发育与退行性疾病的“共性生物标志物”展开，解析神经发育障碍(ASD/ADHD/癫痫)的眼动指纹与神经退行性疾病(PD/AD)之间眼动的共同特征，以及如何利用 ETT 进行评估以达到个性化诊疗和康复目的。同时，鉴于硬件研发技术的不断更新以及 AI 在神经发育障碍和神经退行性疾病研究中具有良好的发展潜力，本文还回顾了采用微型化硬件和机器学习模型结合 ETT 在神经精神疾病中的应用及研究，并探讨了 ETT 在神经精神疾病个性化诊疗中的临床可行性和未来研究方向。

图 2 是本文文献检索方案流程图，展示了文献的筛选和归纳的过程。

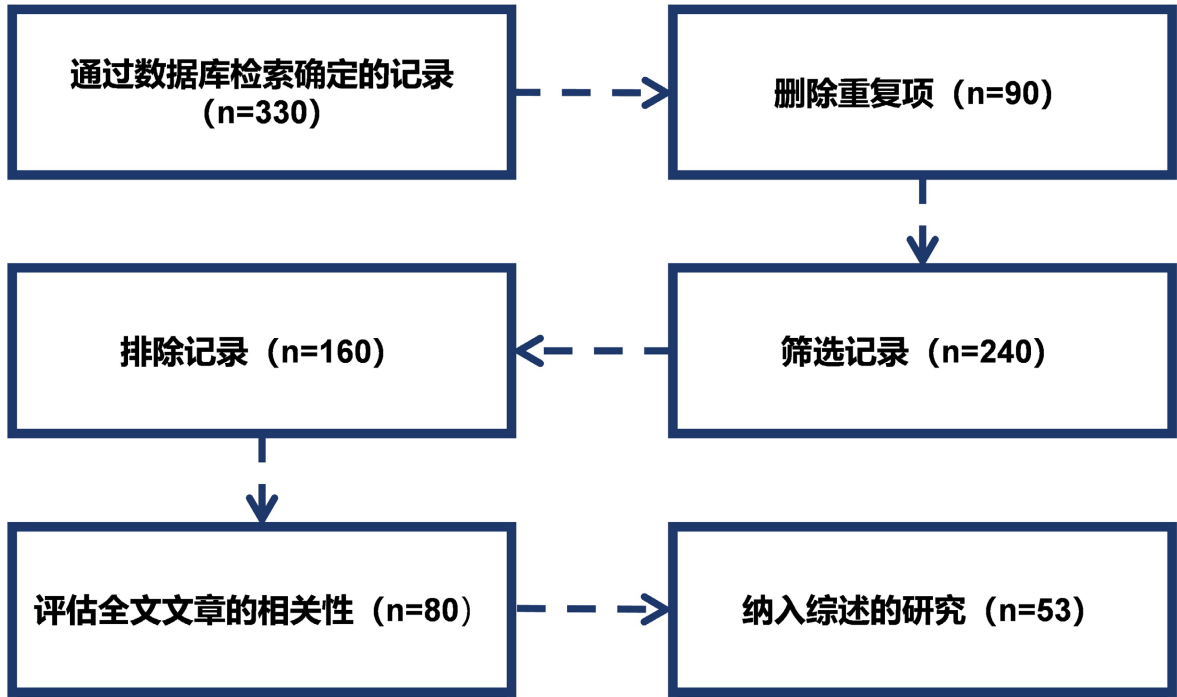


Figure 2. Flowchart of the literature selection process for this review (A total of 330 records were identified, 90 duplicates were removed, and 53 studies were included based on topic relevance)

图 2. 本综述的文献选择过程的流程图(共确定了 330 条记录，删除了 90 条重复项，并根据主题相关性纳入了 53 项研究)

3. 结果

3.1. 跨疾病机制：眼动作为神经发育与退行性疾病的“共性生物标志物”

3.1.1. 眼动指纹在神经发育障碍(ASD/ADHD/癫痫)中的共性特征

自闭症谱系障碍(ASD)患者往往会出现社交注视回避的状况。具体为 ASD 患者在面对人脸时表现出明显的社交注视异常，眼部区域的注视时间与正常人相比减少 60%，但对物体边缘或者非社交区域的注

视频率升高 3 倍[33]。针对这一现象,王文浩应用功能磁共振成像,发现 ASD 患者社交注视异常与默认网络(DMN)和梭状回的功能连接强度负相关($r = -0.59, p < 0.001$),提示可能与社交认知相关的脑区域异常相关[33]。Wang 等人的研究显示[34],在面孔定位时,自闭症患者和正常儿童均会先注意面部,然而自闭症患儿搜索面孔速度显著慢于正常儿童,这表明自闭症患儿具备基本社会导向能力,但识别效率较低。目前,人们开始利用眼动训练治疗自闭症患者(例如在虚拟现实场景中进行社交训练),发现能改善自闭症患者的部分临床表现。戚静瑜等人在研究中,采用视觉与听觉两种反馈模式,对 4 名自闭症个体的发声自主能力与主动表达能力进行训练后观察到,与传统的自闭症儿童语言技能的干预训练相比较,在虚拟环境中,患者学习速度更快、记忆效果更好[35][36]。

注意缺陷多动障碍(ADHD)占据了儿童和青少年精神科就诊患者中的大多数[37],将近 50% [38]。ADHD 被定义为中枢神经系统的生物功能障碍,是调控注意力、唤醒和执行功能的额-纹-丘脑-皮质回路控制紊乱所导致。Sekaninová 等人的研究中发现,ADHD 患儿在反向扫视任务中错误率达 35%,显著高于健康儿童的 12% [39]。Kwon 等人研究了移动神经反馈训练对注意力缺陷多动障碍(ADHD)儿童临床症状、注意力能力和执行功能的影响,发现移动神经反馈训练能使患者的扫视潜伏期缩短 20%,错误率下降 40%,表明眼动指标对干预效果的量化潜力[40]。Lee 等人对 18 名平均年龄为 8.8 岁的 ADHD 患儿进行 240 分钟的眼动追踪训练后,观察到 ADHD 儿童额叶功能(即抑制控制和心理灵活性)的神经心理学和实验任务中的行为有显著改善[41]。

癫痫是一种常见的慢性脑部疾病,与中枢神经系统功能失常有关[42]。由于动眼神经功能受损,癫痫患者在执行视觉引导扫视和反扫视的过程中错误率增加,且扫视开始时的反应时间延长[43]。Lunn 等人[43]对患有局灶性癫痫的儿童和成人进行了视觉引导眼球运动任务和文字阅读任务后发现长期的癫痫病程的患者拥有更快的反扫视速度。首次使用 ETT 探索癫痫的神经机制。Nagasawa 等人[44]使用 ETT 以研究癫痫认知缺陷的机制,通过记录癫痫患者完成扫视任务、追踪任务或情绪面部识别任务进程中的动眼神经反应和颅内脑电图,发现在大脑的不同区域(如顶叶上小叶和 Rolandic 区域)可以看到伽马频段(30~100 赫兹)脑电活动强度升高。

因此,以上研究表明,在神经发育障碍(ASD/ADHD/癫痫)中,眼动指纹在执行扫视等眼动任务时,均出现了错误率增加、反应时间异常的共性特征,例如其中的 ASD 社交注视异常、ADHD 反向扫视错误率升高、癫痫扫视反应延迟,且通过眼动训练可改善相关眼动指标及临床症状。需要指出的是,本小节所综述的研究在关键方面存在显著异质性,均总结在下表 1 中,包括涵盖的 ASD、ADHD、癫痫患者的年龄段各不相同,因此其疾病严重程度、共病情况及认知基线水平各异(如 Sekaninova 等人研究 ADHD 患儿,而 Lunn 等人研究局灶性癫痫儿童和成人),同时各类研究采用了多样化的任务范式,如 ASD 研究中的社交刺激自由观看、面孔定位任务、VR 社交训练;ADHD 研究中的反向扫视任务、神经反馈训练中的任务;癫痫研究中的视觉引导扫视、反扫视及扫视/追踪/情绪识别复合任务。以上任务在认知负荷、刺激类型和反应要求上差异巨大,这种异质性使得直接比较不同研究间的绝对数值并得出精确的共性阈值变得困难。尽管如此,上述研究一致地观察到在神经发育障碍中,执行扫视等眼动任务时出现错误率增加、反应时间异常的趋势,这表明眼动异常是这类疾病中一个具有普遍性的行为特征域,但其具体表现形式和程度可能因疾病亚型、任务性质和测量方法而异。

3.1.2. 神经退行性疾病(PD/AD)的眼动共性

与正常人相比,AD 患者的前扫视次数、在复杂视觉刺激下注视期以及扫射幅等眼动指标存在明显差异。Sekar 等人[45]的研究指出,前扫视潜伏期与 AD 中的痴呆和执行功能相关。此外,与健康人相比,AD 患者在时钟阅读任务中注视时间更长,扫视幅度更小,这表明阿尔茨海默病中视觉探查的改变可能与

顶叶功能障碍或退化的枕顶叶与相对保留的枕颞叶视觉网络之间的不平衡有关[46] [47]。Hannonen 等人使用 ETT 对 78 名受试者(57 名非痴呆患者, 21 例轻度 AD 患者)进行阅读测试, 分析受试者阅读测试所用的总时间、错误、注视和扫视持续时间以及扫视幅度, 结果显示, AD 患者在平均扫视幅度(3.58 ms vs 3.21 ms, $p < 0.03$)和持续时间(27.1 ms vs 24.8 ms, $p < 0.05$)与非痴呆患者均存在显著差异, 因此 ETT 可能有助于早期的 AD 患者的发现[48]。

帕金森病(PD)是影响运动功能中枢神经系统最重要的神经退行性疾病之一[2]。研究表明, 与健康人(平均值 = 140 ms, SD = 15 ms)相比, PD 患者的扫视潜伏期显著增加, 平均延迟为 200 ms (SD = 25 ms) [49]-[51]。同时, PD 患者潜伏期的增加与疾病进展存在密切的关联, 其中以 UPDRS 运动评分($r = 0.72$, $p < 0.001$)作为重要的衡量依据, 说明扫视潜伏期可作为监测 PD 运动下降的有效指标。Pretegianni 等人对帕金森患者的功能神经影像学和电生理学研究给予了更多的证据: 扫视障碍与帕金森患者额叶皮层、基底神经节和上丘的活动减少有关, 这支持了动眼神经缺陷是 PD 运动和认知功能恶化的生物标志物的观点[52] [53]。

同样, 本小节研究间的异质性也不容忽视, 其中实验对象包括不同疾病阶段(如早期 AD、轻度 AD、PD 患者)和亚型的患者, 其神经退行性病变的范围和程度不同, 任务设计差异显著, 例如时钟阅读任务、标准化阅读测试、视觉引导扫视任务、平滑追踪任务, 以及结合认知评估的任务。不同任务对视觉空间、执行功能、注意力等特定认知域的依赖程度不同, 同时对应重点关注的指标也各异, 这种异质性意味着报告“普遍存在”的扫视速度减慢和注视分散度增高时, 其具体临界值可能受到任务类型和测量设备的显著影响。Stuart 等人[50]报告的 AUC 值反映了其特定任务范式和指标组合在区分特定群体(PD vs 健康对照)时的效能, 其普适性到其他 NDD 或其他任务仍需更多验证。尽管如此, 现有证据强烈支持扫视和注视控制的异常是 AD 和 PD 共有的、具有诊断和监测潜力的核心眼动特征域。

Table 1. Characteristic studies of eye movement tracking in neurodevelopmental and neurodegenerative disorders
表 1. 眼动追踪在神经发育与退行性疾病中的特征研究

主题领域	作者	年份	对象	目标	方法	结果	关键发现
ASD 注视异常	王文浩	2023 [33]	ASD 儿童, TD 儿童与健康儿童*	应用眼动技术和深度学习评估 ASD 分类	眼动追踪 + LSTM 模型	ASD 儿童眼部注视时间 ↓ 60%, 非社交区域注视频率 ↑ 3 倍; LSTM 模型有效区分 ASD 与 TD 儿童	社交注视异常与 DMN-梭状回功能连接负相关($r = -0.59$, $p < 0.001$)
ASD 面孔识别	Wang et al.	2022 [34]	ASD 患儿 vs 正常儿童*	比较面孔定位的眼动差异	眼动追踪(面孔搜索任务)	ASD 患儿搜索面孔速度显著慢于正常儿童	存在基本社会导向能力但识别效率低下
ASD 干预训练	戚静瑜等	2017 [35]	ASD 个体(N = 4)	评估 VR 环境对发声能力的训练效果	VR 眼动训练 + 视听反馈	VR 训练组学习速度更快、记忆效果优于传统训练	眼动结合 VR 可改善 ASD 社交行为
ADHD 执行功能	Sekaninová et al.	2019 [39]	ADHD 患儿 vs 健康儿童*	评估反向扫视任务中的眼动错误率	反扫视任务	ADHD 患儿错误率 35% vs 健康儿童 12%	反向扫视错误率升高反映额-纹状体环路功能障碍
ADHD 神经反馈	Kwon et al.	2023 [40]	ADHD 儿童(干预组 vs 对照组)*	测试移动神经反馈训练对执行功能的影响	眼动追踪 + 神经反馈训练	训练后扫视潜伏期 ↓ 20%, 错误率 ↓ 40%	眼动指标可量化 ADHD 干预效果
ADHD 认知训练	Lee et al	2020 [41]	ADHD 儿童(N = 18)	探究眼动训练对改善扫视眼球运动的有效性	240 分钟眼动追踪训练	抑制控制和心理灵活性行为显著改善	计算机化眼动训练可提升 ADHD 额叶功能

续表

癫痫眼动控制	Lunn et al.	2016 [43]	癫痫儿童(N = 74), 癫痫成人(N = 26) vs 健康儿童(N = 48)*	分析视觉引导扫视与月度任务的眼动特征	扫视任务 + 儿童行为检查量表(CBCL)	长期癫痫患者反扫视速度更快	癫痫病程改变扫视动力学
癫痫神经机制	Nagassawa et al.	2011 [44]	癫痫患者*	探索扫视任务中的神经电活动	扫视任务 + 颅内皮层电图	顶叶上小叶/Rolandic 区 γ 频段(30 HZ~ 100 HZ)脑电活动 $\uparrow$	眼动异常与特定脑区高频活动相关
AD 视觉探索	Mosimann	2004 [46]	AD 患者 vs 非痴呆患者*	评估时钟阅读任务的视觉探查模式	时钟阅读任务 + 眼动追踪	AD 患者注视时间更长, 扫视幅度更小	视觉探查异常提示顶叶功能障碍或枕顶 - 枕颞视觉网络失衡
AD 阅读能力	Hannonen et al.	2022 [48]	轻度 AD 患者(N = 21) vs 非痴呆(N = 57)	研究基于 KD 测试结果眼动追踪分析是否能区分出轻度 PD 患者	基于阅读中计算机的 ET 进行 KD 读数测试	AD 平均扫视幅度(3.58° vs 3.21° , $p < 0.03$)和持续时间(27.1 ms vs 24.8 ms , $p < 0.001$)	眼动筛查可辅助 AD 早期筛查
PD 扫视潜伏期	Kassavetis et al.	2022 [49]	PD 患者 vs 健康人*	测量扫视潜伏期与疾病进展关联	扫视任务(视觉引导)	PD 潜伏期 $\uparrow$ ($200\text{ ms} \pm 25\text{ ms}$ vs $140\text{ ms} \pm 15\text{ ms}$); 与 UPDRS 评分正相关($r = 0.72$, $p < 0.001$)	扫视潜伏期是 PD 运动功能恶化的有效生物标志物
PD 神经机制	Pretegianni et al.	2017 [52]	PD 患者, 遗传性 PD 患者和已知发病机制的神经退行性疾病*	探究扫视障碍的神经基础	功能神经影像学 + 电生理学	扫视障碍与额叶皮层、基底节和上丘活动负相关	扫视潜伏期增加但速度正常表示 BG 在运动启动, PD 中的运动迟缓应该解释为运动开始延迟

注: *表示原文未明确样本量的研究标注。

3.2. 技术革新：从硬件微型化到 AI 智能化

3.2.1. 新兴硬件突破实验室范式限制

随着技术的不断革新, 新兴硬件由原先的庞大笨重转变为现在的微型化与便携化, 以提高 ETT 具有更高的精度。ETT 在一次次技术迭代中突破理论使用范围限制, 逐步推广于现实生活场景的应用于神经精神疾病的治疗。

最新的报道中就有 Zhu 团队提出了一种基于频率编码策略的眼动追踪 SCL (智能隐形眼镜)用于眼机交互。该 SCL 通过检测注视方向, 标准及校正实验计算出虚拟屏幕上的实时注视点; 同时嵌入了 4 个具有不同的工作频率的无线和无芯片环形线圈型射频标签, 为眼球运动检测提供反向散射信号, 将眼球运动转化为可解码的电磁信号变化。基于电阻 - 电感 - 电容(RLC)谐振器的机制, 线圈状射频标签具有不同的谐振频率。通过读取线圈, 使用矢量网络分析仪(VNA)测量的回波损耗(S11)曲线, 为无线检测标签的响应提供见解, 从而实现了眼动和闭眼的识别。研究还进行了兔子体内验证测试和全面的生物相容性测试, 成功验证了能切实有效地预防角膜炎[54]。

Qi 等人研发出全球首款电池供电的可穿戴脑上重复经颅磁刺激设备(rTMS), 为抑郁症等神经精神疾病的治疗提供了潜在治疗方案, 团队实现了轻量级磁芯线圈设计和高功率密度高压脉冲驱动技术, 将设备的功耗、重量降至进口商用设备的 10%, 但在刺激强度上十分接近现有传统商业 TMS 设备。在人体试验中, 该设备达到了手部和腿部的运动诱发电位, 首次在自由行走过程中实现了 rTMS 神经调控, 揭示了中枢神经系统和不同肢体肌肉活动之间的动态相互作用。实现患者各类场景接受不间断的治疗干预[55]。

以及前文提到的 Mojo Vision 公司生产的超精确智能隐形眼镜眼动追踪器 Mojo Lens, 更进一步帮助监测注意力缺失症患者在自然场景中注视目标频率, 提供实时数据辅助诊疗。

3.2.2. AI 融合: 眼动数据的智能化解析

目前, AI 的发展已经逐渐改变现有医学诊断模型, 可以对复杂的神经数据更自动化、客观化和高精度的分析。在神经退行性疾病、抑郁症等神经精神疾病的背景下, 探索 AI 驱动的方法来分析眼动追踪数据, 以实现早期监测、持续疾病监测和鉴别诊断正逐渐成为现实[56]。由于帕金森疾病病程早期眼球运动的异常的即时表现, 因此对扫描潜伏期、注视不稳定等动眼神经生物标志物来进行基于 AI 的分析可能可以提高诊断的准确性[57][58]。

韦卓男等人[59]通过联合结构 MRI 和 VR 眼动追踪技术以计算机化指标来认知来评估 AD 的早期诊断结果。该研究对 77 例早期 AD 患者和 58 例认知未受损者(CU)开展 VR 眼动认知评估以及头颅三维 T1 加权成像的磁共振结构像检查, 进一步获取海马体积(hippocampal volume, HV)数值并构建 ROC 曲线和量化曲线下面积大小的 AUC, 以评估分类模型对 AD 诊断的性能。王文浩[33]基于深度学习技术的长期短期记忆网络(LSTM)模型可以对时间序列的眼动注视数据进行分类的原理, 探究了 ASD 儿童和正常儿童对社会性刺激和物体重复运动的视觉偏好差异, 最终利用 LSTM 模型对眼动数据的分类成功区分了 ASD 儿童和正常儿童, 由此可见眼动技术结合深度学习对 ASD 的分类评估有一定的价值。程蓉等人[60]采用眼动追踪数据构建支持向量机、线性判别算法、决策树、随机森林和邻近算法(K=1、3、5、7)8 种常见的机器学习模型, 精确地将 ASD 儿童与 TD 儿童区分开来, 为开发筛查 ASD 的辅助工具提供新思路。

3.3. 个性化诊疗应用: 从精准诊断到动态干预

ETT 已经广泛应用于包括 AD、PD 的神经退行性疾病、抑郁症等精神障碍的神经精神疾病的诊疗, 因此可以通过构建多维度眼动特征库、设计基于眼动的个体化方案以及利用眼动指标预测疾病进展等方式实现 ETT 在临床上的个体化诊疗, 推动神经精神疾病的临床实践从经验转向数据。

3.3.1. 分层诊断: 构建多维度眼动特征库

神经精神疾病, 在症状表现、病程和治疗反应等多方面存在个体差异, 因此诊断体系不单单满足于单一症状评估, 而应转向基于多维度检测指标的联合分析。例如, 杨丽颖等人[61]的研究结果显示, 抑郁障碍患者可分为早期与晚期的不同注意阶段, 在早期注意的眼动追踪解析出刺激最早出现时的观察模式, 包括初始注视位置、初始注视潜伏期、初始注视持续时间等初始注视参数; 而晚期注意的眼动分析指在最初观察阶段之后出现的观察模式, 包括总的注视时间、固定时间、平均注视持续时间、注意持续等注视参数, 因此通过利用 ETT 来量化扫视、注视及平滑追踪的动态参数, 可为疾病亚型的分类提供客观依据, 同时为提升诊断的精准性。当前研究正探索将眼动数据与多模态磁共振成像(MRI)[62]、神经影像学[63]、基因组学及蛋白组学等多模态信息相整合, 构建跨疾病维度的数据库。

3.3.2. 治疗匹配: 基于眼动的个体化方案设计

眼动特征的动态监测具有实时反馈机制, 因此可推动神经精神疾病的治疗方案个性化发展。目前随着科技的发展, VR 也在不断地创新, 李嘉祺等人[64]系统综述了信息技术及结合沉浸式 VR 技术的人工智能系统与抑郁症心理调适交叉结合的创新模式, 与动态调整视觉刺激和社交场景的相融程度。此外, 基于机器学习的算法也能针对性地应用于疾病的治疗匹配机制中。Hannonen 等人[48]基于计算机的眼动追踪技术, 提出了利用 King-Devick (KD)测试将认知健康的人与认知测试中存在轻微问题或被诊断为轻度注意力缺失症的人区分开来的可行性方案。诸如此类的临床实践表明, 基于眼动的动态干预策略在改善执行功能、情绪调节及运动协调方面展现出显著潜力, 并且患者依从性优于传统固定方案。

3.3.3. 预后评估：眼动指标预测疾病进展

ETT 的高分辨率与无创性被认为是长期评估神经功能性障碍疾病预后的理想工具。研究表明, 扫视潜伏期变异性、注视分散度等特定的眼动参数与疾病进展速度或认知功能衰退存在显著相关性, 可作为预测生物标志物。郭婧等人[65]结合眼动追踪测试、简易精神状态检查量表(mini-mental state examination, MMSE)以及蒙特利尔认知评估量表(Montreal cognitive assessment, MoCA)评估 40 名脑卒中患者的认知情况, 结果显示, 眼动追踪测试静态图片评估中注视点总数与 MMSE 总分($r = -0.33, p = 0.04$)呈弱负相关, 总注视时长($r = 0.38, p = 0.02$)、注视时长比($r = 0.37, p = 0.02$)与 MoCA 总分呈弱正相关, 注视点总数($r = -0.47, p \leq 0.01$)、扫视总距离($r = -0.32, p = 0.05$)、扫视平均速度($r = -0.32, p = 0.05$)与 MoCA 总分呈弱负相关, 提示 ETT 可用于评估脑卒中后认知障碍。未来可通过整合眼动、临床量表及生物分子数据的方式来构建多模态预后模型, 可以对临床疾病的预后进行精准性评估。

综上所述, ETT 结合多维度眼动特征、以量化指标进行动态干预优化以及开展预后模型构建, 具有重新塑造神经精神疾病的诊疗模式的潜力。未来, ETT 有望在基因和眼动的关联研究方面、动态场景干预事宜上、康复训练智能化以及筛查设备轻量化的发展路径上达成突破, 以此推动眼动追踪技术从单纯的实验室研究朝着临床精准诊疗转变, 进而对眼动追踪技术在临床个性化诊疗当中所具备的重大价值意义予以进一步的验证。

4. 讨论

ETT 已成为探索神经精神疾病的发生发展生物机制的有力工具。同时, 该技术也为运动、认知和自主神经功能障碍提供了客观的见解, 在神经精神疾病的跨疾病整合研究中展现出独特价值。从机制解析来看, 例如 ASD 的社交注视回避与 PD 的扫视潜伏期延长虽分属不同疾病类别, 却共同指向前额叶-纹状体环路的功能异常, 提示眼动特征作为共性生物标志物的潜力。本文总结了 ETT 于神经精神疾病中的应用, 归纳了神经精神疾病下的分支疾病的眼动共性, 从而探究是否能够将针对一种疾病的应用推广该类疾病范畴, 进一步实现诊疗手段的互通。ETT、设备的革新, 例如隐形眼镜眼动仪与 AI 算法的结合突破了传统设备的不足与使用限制, 多模态融合模型应用于神经精神疾病更是提升了复杂疾病的诊断精度, 使个性化诊疗成为全面而精确的临床方案。

然而, 当前研究仍存在三大挑战:

- 1) 针对不同研究的眼动任务, 例如反扫视范式、自由观看任务等差异较大, 导致数据可比性不足, 标准化问题有待解决, 需建立跨疾病的标准化评估方案;
- 2) 现有研究多聚焦于眼动或 MRI 的单一模态, 需加强眼动数据与基因组、蛋白组等多维度数据的融合, 构建全链条病理模型;
- 3) 强化学习干预在短期训练中效果显著, 但其长期疗效维持机制目前依然不明确, 需开展大规模纵向研究以探究并验证动态干预的长效性。

往后的研究不应仅仅局限于对神经精神疾病的眼动特征展开更为深入细致的探究, 同时需验证其作为一种共性生物标志物所具备的分子机制。除此之外, 还需把目光聚焦在技术转化方面, 比如可以围绕基于虚拟现实所开展的诊疗以及康复计划来进行相关工作, 着手开发沉浸式 VR 系统以及与之配套的硬件设备, 针对那些和神经退行性疾病诊断、治疗密切相关的辅助工具等展开一系列的研究与实践活动, 以此来促使眼动追踪技术能够从单纯的科研工具逐步向临床当中的常规检测手段或者治疗手段实现有效的过渡。

5. 结论

眼动追踪技术提供了一种客观的、量化的、非侵入式的方法, 不仅可以为单一疾病研究提供可靠

且高效的技术支持,也可以走向跨疾病整合研究与个性化临床诊疗领域。未来的研究应更深入神经精神疾病中眼动指标的共性生物标志物,实现针对一种疾病的应用推广该类疾病范畴,推动眼动追踪技术于标准化临床治疗、验证预测性 AI 模型以及整合到多模式治疗策略中,实现疾病诊断到治疗匹配到预后评估的全方位诊疗。

参考文献

- [1] Fernando, A.B.P. and Robbins, T.W. (2011) Animal Models of Neuropsychiatric Disorders. *Annual Review of Clinical Psychology*, **7**, 39-61. <https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-032210-104454>
- [2] Bell, V., Wilkinson, S., Greco, M., Hendrie, C., Mills, B. and Deeley, Q. (2020) What Is the Functional/Organic Distinction Actually Doing in Psychiatry and Neurology? *Wellcome Open Research*, **5**, Article 138. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.16022.1>
- [3] Khowdiary, M.M., Al-kuraishy, H.M., Al-Gareeb, A.I., Albuhadily, A.K., Elhenawy, A.A., Babalghith, A.O., *et al.* (2025) Dysregulation of Serotonergic Neurotransmission in Parkinson Disease: A Key Duet. *European Journal of Pharmacology*, **995**, Article ID: 177419. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2025.177419>
- [4] Goto, S. (2024) Functional Pathology of Neuroleptic-Induced Dystonia Based on the Striatal Striosome-Matrix Dopamine System in Humans. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, **96**, 177-183. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2024-334545>
- [5] Marafioti, G., Culicetto, L., Latella, D., Marra, A., Quartarone, A. and Lo Buono, V. (2025) Neural Correlates of Subjective Cognitive Decline in Alzheimer's Disease: A Systematic Review of Structural and Functional Brain Changes for Early Diagnosis and Intervention. *Frontiers in Aging Neuroscience*, **17**, Article 1549134. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2025.1549134>
- [6] Liss, A., Siddiqi, M.T., Marsland, P. and Varodayan, F.P. (2025) Neuroimmune Regulation of the Prefrontal Cortex Tetrapartite Synapse. *Neuropharmacology*, **269**, Article ID: 110335. <https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2025.110335>
- [7] Hekmatimoghaddam, S., Zare-Khormizi, M.R. and Pourrajab, F. (2016) Underlying Mechanisms and Chemical/Biochemical Therapeutic Approaches to Ameliorate Protein Misfolding Neurodegenerative Diseases. *BioFactors*, **43**, 737-759. <https://doi.org/10.1002/biof.1264>
- [8] Thapar, A., Cooper, M. and Rutter, M. (2017) Neurodevelopmental Disorders. *The Lancet Psychiatry*, **4**, 339-346. [https://doi.org/10.1016/s2215-0366\(16\)30376-5](https://doi.org/10.1016/s2215-0366(16)30376-5)
- [9] Pitsikas, N. (2024) Evaluation of the Potential Efficacy of the Nitric Oxide Donor Molsidomine for the Treatment of Schizophrenia. *Medical Gas Research*, **15**, 228-233. <https://doi.org/10.4103/mgr.medgasres-d-24-00070>
- [10] Wu, S., Zhang, Y., Lu, Y., Yin, Y., Yang, C., Tang, W., *et al.* (2025) Vascular Depression: A Comprehensive Exploration of the Definition, Mechanisms, and Clinical Challenges. *Neurobiology of Disease*, **211**, Article ID: 106946. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2025.106946>
- [11] Bray, N.J. and O'Donovan, M.C. (2018) The Genetics of Neuropsychiatric Disorders. *Brain and Neuroscience Advances*, **2**, 1-6. <https://doi.org/10.1177/2398212818799271>
- [12] Kisku, A., Nishad, A., Agrawal, S., Paliwal, R., Datusalia, A.K., Gupta, G., *et al.* (2024) Recent Developments in Intranasal Drug Delivery of Nanomedicines for the Treatment of Neuropsychiatric Disorders. *Frontiers in Medicine*, **11**, Article 1463976. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1463976>
- [13] Missal, M. and Keller, E.L. (2002) Common Inhibitory Mechanism for Saccades and Smooth-Pursuit Eye Movements. *Journal of Neurophysiology*, **88**, 1880-1892. <https://doi.org/10.1152/jn.2002.88.4.1880>
- [14] Przybyszewski, A.W., Śledzianowski, A., Chudzik, A., Szlufik, S. and Koziorowski, D. (2023) Machine Learning and Eye Movements Give Insights into Neurodegenerative Disease Mechanisms. *Sensors*, **23**, Article 2145. <https://doi.org/10.3390/s23042145>
- [15] Poletti, B., Carelli, L., Solca, F., Lafronza, A., Pedroli, E., Faini, A., *et al.* (2017) An Eye-Tracker Controlled Cognitive Battery: Overcoming Verbal-Motor Limitations in ALS. *Journal of Neurology*, **264**, 1136-1145. <https://doi.org/10.1007/s00415-017-8506-z>
- [16] Tao, L., Wang, Q., Liu, D., Wang, J., Zhu, Z. and Feng, L. (2020) Eye Tracking Metrics to Screen and Assess Cognitive Impairment in Patients with Neurological Disorders. *Neurological Sciences*, **41**, 1697-1704. <https://doi.org/10.1007/s10072-020-04310-y>
- [17] Daffner, K.R., Scinto, L.F.M., Weintraub, S., Guinessey, J.E. and Mesulam, M.M. (1992) Diminished Curiosity in Patients with Probable Alzheimer's Disease as Measured by Exploratory Eye Movements. *Neurology*, **42**, 320-320. <https://doi.org/10.1212/wnl.42.2.320>

- [18] Levy, D.L., Holzman, P.S., Matthisse, S. and Mendell, N.R. (1993) Eye Tracking Dysfunction and Schizophrenia: A Critical Perspective. *Schizophrenia Bulletin*, **19**, 461-536. <https://doi.org/10.1093/schbul/19.3.461>
- [19] Holzman, P.S. (1988) A Single Dominant Gene Can Account for Eye Tracking Dysfunctions and Schizophrenia in Offspring of Discordant Twins. *Archives of General Psychiatry*, **45**, 641-647. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.1988.01800310049006>
- [20] Klin, A., Jones, W., Schultz, R., Volkmar, F. and Cohen, D. (2002) Visual Fixation Patterns during Viewing of Naturalistic Social Situations as Predictors of Social Competence in Individuals with Autism. *Archives of General Psychiatry*, **59**, 809-816. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.59.9.809>
- [21] Perugini, A., Ditterich, J., Shaikh, A.G., Knowlton, B.J. and Basso, M.A. (2018) Paradoxical Decision-Making: A Framework for Understanding Cognition in Parkinson's Disease. *Trends in Neurosciences*, **41**, 512-525. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2018.04.006>
- [22] Chow, N., Aarsland, D., Honarpisheh, H., Beyer, M.K., Somme, J.H., Elashoff, D., et al. (2012) Comparing Hippocampal Atrophy in Alzheimer's Dementia and Dementia with Lewy Bodies. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, **34**, 44-50. <https://doi.org/10.1159/000339727>
- [23] Wang, C.-A., McInnis, H., Brien, D.C., Pari, G. and Munoz, D.P. (2016) Disruption of Pupil Size Modulation Correlates with Voluntary Motor Preparation Deficits in Parkinson's Disease. *Neuropsychologia*, **80**, 176-184. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.11.019>
- [24] Pavisic, I.M., Firth, N.C., Parsons, S., Rego, D.M., Shakespeare, T.J., Yong, K.X.X., et al. (2017) Eyetracking Metrics in Young Onset Alzheimer's Disease: A Window into Cognitive Visual Functions. *Frontiers in Neurology*, **8**, Article 377. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00377>
- [25] Lee, D.Y., Choi, B., Kim, C., Fridgeirsson, E., Reps, J., Kim, M., et al. (2023) Privacy-Preserving Federated Model Predicting Bipolar Transition in Patients with Depression: Prediction Model Development Study. *Journal of Medical Internet Research*, **25**, e46165. <https://doi.org/10.2196/46165>
- [26] Kang, S., Jeon, S., Lee, Y. and Ye, B.S. (2023) Striatal Dopamine Transporter Uptake, Parkinsonism and Cognition in Alzheimer's Disease. *European Journal of Neurology*, **30**, 3105-3113. <https://doi.org/10.1111/ene.15995>
- [27] Lio, G., Corazzol, M., Fadda, R., Doneddu, G. and Sirigu, A. (2025) A Neuronal Marker of Eye Contact Spontaneously Activated in Neurotypical Subjects but Not in Autistic Spectrum Disorders. *Cortex*, **183**, 87-104. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2024.10.022>
- [28] Orui, M., Ishikuro, M., Obara, T., Noda, A., Shinoda, G., Murakami, K., et al. (2025) Longitudinal Association between the Duration of Eye Gaze Fixation on Social Information and Specific Symptoms of Neurodevelopmental Disorders in Children: A Large-Scale Community-Based Cohort Study. *Psychiatry and Clinical Neuroscience Reports*, **4**, e70095. <https://doi.org/10.1002/pcn5.70095>
- [29] Tatham, A.J., Murray, I.C., McTrusty, A.D., Cameron, L.A., Perperidis, A., Brash, H.M., et al. (2020) Speed and Accuracy of Saccades in Patients with Glaucoma Evaluated Using an Eye Tracking Perimeter. *BMC Ophthalmology*, **20**, Article No. 259. <https://doi.org/10.1186/s12886-020-01528-4>
- [30] Kumar, D., Dutta, A., Das, A. and Lahiri, U. (2016) SmartEye: Developing a Novel Eye Tracking System for Quantitative Assessment of Oculomotor Abnormalities. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **24**, 1051-1059. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2016.2518222>
- [31] Efron, N. (2023) Augmented Reality Contact Lenses—So near Yet So Far. *Clinical and Experimental Optometry*, **106**, 349-350. <https://doi.org/10.1080/08164622.2023.2188176>
- [32] Wu, C., Liaqat, S., Cheung, S., Chuah, C. and Ozonoff, S. (2019) Predicting Autism Diagnosis Using Image with Fixations and Synthetic Saccade Patterns. 2019 *IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*, Shanghai, 8-12 July 2019, 647-650. <https://doi.org/10.1109/icmew.2019.00125>
- [33] 王文浩. 应用眼动技术和深度学习对自闭症的分类评估研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2023.
- [34] Wang, Y., Lyu, H., Tian, X., Lang, B., Wang, X., St Clair, D., et al. (2022) The Similar Eye Movement Dysfunction between Major Depressive Disorder, Bipolar Depression and Bipolar Mania. *The World Journal of Biological Psychiatry*, **23**, 689-702. <https://doi.org/10.1080/15622975.2022.2025616>
- [35] 戚静瑜, 阮宗才. 虚拟现实在自闭症儿童干预训练中的应用及展望[J]. 信息化研究, 2017, 43(6): 7-12.
- [36] 梁璇. 虚拟现实技术对自闭症干预的适用性研究[J]. 绥化学院学报, 2017, 37(7): 100-103.
- [37] Roh, O.B., Son, C.N., Park, T.W., et al. (2011) The Effects of Neurofeedback Training on Inattention and Hyperactivity/Impulsivity in Children with ADHD. *Korean Journal of Clinical Psychology*, **30**, 397-418. <https://doi.org/10.15842/kjcp.2011.30.2.003>
- [38] Cantwell, D.P. and Baker, L. (1989) Stability and Natural History of DSM-III Childhood Diagnoses. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, **28**, 691-700. <https://doi.org/10.1097/00004583-198909000-00009>

- [39] Sekaninová, N., Mestanik, M., Mestanikova, A., Hamrakova, A. and Tonhajzerova, I. (2019) Novel Approach to Evaluate Central Autonomic Regulation in Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD). *Physiological Research*, **68**, 531-545. <https://doi.org/10.33549/physiolres.934160>
- [40] Kwon, S.Y., Seo, G., Jang, M., Shin, H., Choi, W., Lim, Y.B., *et al.* (2023) The Effect of Mobile Neurofeedback Training in Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder: A Randomized Controlled Trial. *Clinical Psychopharmacology and Neuroscience*, **22**, 67-78. <https://doi.org/10.9758/cpn.23.1054>
- [41] Lee, T., Yeung, M., Sze, S. and Chan, A. (2020) Computerized Eye-Tracking Training Improves the Saccadic Eye Movements of Children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Brain Sciences*, **10**, Article 1016. <https://doi.org/10.3390/brainsci10121016>
- [42] 陈建语, 苗婵婵, 樊琦, 等. 癫痫共患情绪障碍的发病机制与诊疗进展[J]. 山东医药, 2024, 64(34): 108-111.
- [43] Lunn, J., Donovan, T., Litchfield, D., Lewis, C., Davies, R. and Crawford, T. (2016) Saccadic Eye Movement Abnormalities in Children with Epilepsy. *PLOS ONE*, **11**, e0160508. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160508>
- [44] Nagasawa, T., Matsuzaki, N., Juhász, C., Hanazawa, A., Shah, A., Mittal, S., *et al.* (2011) Occipital Gamma-Oscillations Modulated during Eye Movement Tasks: Simultaneous Eye Tracking and Electrooculography Recording in Epileptic Patients. *NeuroImage*, **58**, 1101-1109. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.07.043>
- [45] Sekar, A., Panouillères, M. and Kaski, D. (2024) Detecting Abnormal Eye Movements in Patients with Neurodegenerative Diseases—Current Insights. *Eye and Brain*, **16**, 3-16. <https://doi.org/10.2147/eb.s384769>
- [46] Mosimann, U.P. (2004) Visual Exploration Behaviour during Clock Reading in Alzheimer's Disease. *Brain*, **127**, 431-438. <https://doi.org/10.1093/brain/awh051>
- [47] Parra, M.A., Della Sala, S., Logie, R.H. and Morcom, A.M. (2014) Neural Correlates of Shape-Color Binding in Visual Working Memory. *Neuropsychologia*, **52**, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.09.036>
- [48] Hannonen, S., Andberg, S., Kärkkäinen, V., Rusanen, M., Lehtola, J., Saari, T., *et al.* (2022) Shortening of Saccades as a Possible Easy-to-Use Biomarker to Detect Risk of Alzheimer's Disease. *Journal of Alzheimer's Disease*, **88**, 609-618. <https://doi.org/10.3233/jad-215551>
- [49] Kassavetis, P., Kaski, D., Anderson, T. and Hallett, M. (2022) Eye Movement Disorders in Movement Disorders. *Movement Disorders Clinical Practice*, **9**, 284-295. <https://doi.org/10.1002/mdc3.13413>
- [50] Stuart, S., Lawson, R.A., Yarnall, A.J., Nell, J., Alcock, L., Duncan, G.W., *et al.* (2019) Pro-Saccades Predict Cognitive Decline in Parkinson's Disease: ICICLE-PD. *Movement Disorders*, **34**, 1690-1698. <https://doi.org/10.1002/mds.27813>
- [51] Riek, H.C., Brien, D.C., Coe, B.C., *et al.* (2023) Cognitive Correlates of Antisaccade Behaviour across Multiple Neurodegenerative Diseases. *Brain Communications*, **5**, fcad049.
- [52] Pretegianni, E. and Optican, L.M. (2017) Eye Movements in Parkinson's Disease and Inherited Parkinsonian Syndromes. *Frontiers in Neurology*, **8**, Article 592. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00592>
- [53] George, S., Rey, N.L., Tyson, T., Esquibel, C., Meyerdirk, L., Schulz, E., *et al.* (2019) Microglia Affect α -Synuclein Cell-to-Cell Transfer in a Mouse Model of Parkinson's Disease. *Molecular Neurodegeneration*, **14**, Article No. 34. <https://doi.org/10.1186/s13024-019-0335-3>
- [54] Zhu, H., Yang, H., Xu, S., Ma, Y., Zhu, S., Mao, Z., *et al.* (2024) Frequency-Encoded Eye Tracking Smart Contact Lens for Human-Machine Interaction. *Nature Communications*, **15**, Article No. 3588. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47851-y>
- [55] Qi, Z., Liu, H., Jin, F., Wang, Y., Lu, X., Liu, L., *et al.* (2025) A Wearable Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Device. *Nature Communications*, **16**, Article No. 2731. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58095-9>
- [56] Diotaiuti, P., Marotta, G., Di Siena, F., Vitiello, S., Di Prinzio, F., Rodio, A., *et al.* (2025) Eye Tracking in Parkinson's Disease: A Review of Oculomotor Markers and Clinical Applications. *Brain Sciences*, **15**, Article 362. <https://doi.org/10.3390/brainsci15040362>
- [57] Wang, C. and Munoz, D.P. (2015) A Circuit for Pupil Orienting Responses: Implications for Cognitive Modulation of Pupil Size. *Current Opinion in Neurobiology*, **33**, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2015.03.018>
- [58] Tabashum, T., Zaffer, A., Yousefzai, R., Colletta, K., Jost, M.B., Park, Y., *et al.* (2021) Detection of Parkinson's Disease through Automated Pupil Tracking of the Post-Illumination Pupillary Response. *Frontiers in Medicine*, **8**, Article 645293. <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.645293>
- [59] 韦卓男, 樊响, 余可妍, 等. 结构 MRI 联合基于 VR 眼动追踪技术的计算机化认知评估在阿尔茨海默病早期诊断中的应用价值[J]. 磁共振成像, 2024, 15(6): 49-53.
- [60] 程蓉, 赵众, 侯文文, 等. 不同意图场景眼动注视模式机器学习算法识别孤独症谱系障碍的研究[J]. 中国当代儿科杂志, 2024, 26(2): 151-157.
- [61] 杨丽颖, 郑月, 康传依, 等. 眼动追踪技术应用于抑郁障碍患者注意偏向观察的研究进展[J]. 神经疾病与精神卫

- 生, 2021, 21(10): 730-734.
- [62] 王诗雅, 魏璇, 颜颖, 等. 多模态 MRI 在帕金森病快速眼动期睡眠行为障碍中综述应用的研究进展[J]. 临床和实验医学杂志, 2023, 22(2): 221-225.
- [63] 杨燕楠, 宋天彬, 詹淑琴. 快眼动睡眠期行为障碍相关影像学研究进展[J]. 中风与神经疾病杂志, 2025, 42(3): 209-212, 192.
- [64] 李嘉祺, 罗光丽, 陈星宇, 等. 信息技术对抑郁症心理调适的模式开发创新研究——基于 VR 沉浸技术的应用[J]. 电子质量, 2022(1): 62-66.
- [65] 郭婧, 张一, 张瑜, 等. 眼动追踪测试与认知量表的相关性研究[C]//中国康复医学会. 2023 中国康复医学会综合学术年会暨国际康复医疗产业博览会论文汇编. 常州: 常州市第一人民医院, 2023: 185-192.