

·综述·

本文引用: 李丹阳, 高远, 廖林丽, 李书楠, 张傑屹, 彭清华. 眼动技术在医学诊断中的研究现状及其在中医领域的应用前景[J]. 湖南中医药大学学报, 2023, 43(5): 949-954.

# 眼动技术在医学诊断中的研究现状及其 在中医领域的应用前景

李丹阳<sup>1</sup>, 高远<sup>1</sup>, 廖林丽<sup>1</sup>, 李书楠<sup>1</sup>, 张傑屹<sup>1</sup>, 彭清华<sup>1,2\*</sup>

1.湖南中医药大学,湖南长沙 410208;2.湖南中医药大学附属第一医院,湖南长沙 410007

**[摘要]** 眼动技术作为一种可以客观记录眼球运动轨迹、瞳孔变化等眼动特征的技术,被广泛应用于认知行为学、心理学研究。随着技术的发展,便携式、非侵入式、成本效益高的眼动仪的出现,眼动技术开始逐步应用于临床医学和基础研究。眼动信息在疾病的诊断、分型以及疗效评价等方面起着关键作用,已成为检测疾病发生发展及评价治疗效果的客观生物标记物。本文阐述了眼动技术的分类及基本工作原理,对近年来眼动技术在医学诊断方面的研究进行综述,并结合中医学特点,探索中医学与眼动技术的有机结合途径,对该技术在中医领域未来的应用前景进行展望。

**[关键词]** 眼动技术;诊断;疗效评价;中医;应用前景;眼动特征;研究现状

**[中图分类号]**R276.7 **[文献标志码]**A **[文章编号]**doi:10.3969/j.issn.1674-070X.2023.05.029

## Research status of eye movement technique in medical diagnosis and prospect for its application in Chinese medicine

LI Danyang<sup>1</sup>, GAO Yuan<sup>1</sup>, LIAO Linli<sup>1</sup>, LI Shunan<sup>1</sup>, ZHANG Jieyi<sup>1</sup>, PENG Qinghua<sup>1,2\*</sup>

1. Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China; 2. The First Hospital of Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410007, China

**[Abstract]** Eye movement technique is widely used in cognitive behavior science and psychology by recording eye movement features such as trajectories and pupil changes. With the developed portable, non-invasive, and cost-effective eye trackers, eye movement technique has been gradually applied to clinical medicine and basic research. The obtained eye tracking information plays a key role in the diagnosis, classification and clinical efficacy evaluation of diseases, and it has become the objective biomarker for detecting the occurrence and development of diseases and evaluating treatment effects. To sum up, this paper has expounded the classification and basic principles of eye tracking technique, and has reviewed the research of it in medical diagnosis in recent years. Then it has discussed the organic combination of Chinese medicine and eye tracking technique based on the characteristics of Chinese medicine, and finally put forward the prospect for its application in Chinese medicine.

**[Keywords]** eye movement technique; diagnosis; clinical efficacy evaluation; Chinese medicine; prospect for application; eye movement features; research status

眼动技术通过客观记录眼动信息,从中提取量化的眼动数据进行分析,进而为疾病的诊断及疗效评价提供客观化的参考依据,是一种具体、精确、可重复的测量工具。眼动主要包括3种基本类型:注

**[收稿日期]**2022-05-18

**[基金项目]**湖南省中医药防治眼耳鼻喉疾病与视功能保护工程技术研究中心建设项目(2018TP2008);湖南省中医药科研计划重点课题(201901);湖南省教育厅科学研究项目(21C0224);湖南省卫生健康委科研课题(202319018792);湖南省研究生科研创新项目(CX20220775)。

**[第一作者]**李丹阳,女,博士研究生,研究方向:中医目诊及数字化研究。

**[通信作者]\***彭清华,男,博士,二级教授,博士研究生导师,E-mail:pqh410007@126.com。

视、眼跳以及平滑追踪,部分疾病还涉及对眼球震颤、微眼跳、共轭运动、会聚等眼动的研究。目前,眼动技术已在医学诊断领域得到了广泛应用,得益于部分眼动模式所涉及区域的神经生理学研究相对完善,对应的临床研究均可以在成熟的神经科学理论框架下进行<sup>[1-4]</sup>。中医学很早就认识到眼动在疾病诊断中的重要作用,《灵枢·大惑论》曰:“目者,五脏六腑之精也,营卫魂魄之所常营也,神气之所生也。”目是精、气、神所蕴藏之处,受五脏六腑、全身经络之精气充养。通过目诊,能实现对人体精、气、神等内在状态的评估<sup>[5]</sup>。将眼动追踪技术运用于中医领域,能够为中医临床信息的采集以及中医目诊的研究提供更加客观化、标准化的手段和方法,对疾病的早期诊断及干预具有重要意义。

## 1 眼动技术的分类及工作原理

眼动技术有一个漫长的发展过程,随着科学技术的发展,眼动信息的提取由机械法、电信号法逐渐发展到光反射法,最后随着图像处理技术及人工智能技术的兴起,基于图像处理技术的眼动分析开始得到了广泛的应用。下面介绍4种最常用的眼动技术的工作原理。

### 1.1 基于眼电图法(electro-oculography, EOG)的眼动技术

眼电图法<sup>[6]</sup>是基于人眼存在电偶极子(角膜正极,眼底负极)这一原理,眼动会使表面电位发生改变,因此,眼电信号的幅值变化就反映了眼动信息。这种方法的优势在于,其设备较为简单且为非侵入式,但因为该设备极易受到包括皮肤表面电位差、皮肤导电率、汗水等客观因素的影响,使得其信号分辨率受到噪声的干扰,导致记录结果的精度不佳、误差较大。但该方法作为唯一能够在闭眼条件下进行眼动记录的方法,在睡眠眼动研究中具有其独特的地位。

### 1.2 基于红外反射法(infrared reflection devices, IRD)的眼动技术

红外反射法是依据眼部不同部位对红外光反射率的不同来追踪眼动方向,在此基础上,又分为角膜反射法、瞳孔-角膜反射法、瞳孔-普尔钦像法等。(1)角膜反射法<sup>[7-8]</sup>:在光线及头部位置相对固定的前提下,眼动使得角膜表面反射光斑随之变化,通过获取角膜反射光斑的位置变化可以记录眼动的相

关信息,但该方法对头部及光源的相对位置要求较高,如果相对位置发生改变,测试结果将会受到较大干扰,最终视线落点也会存在较大误差。(2)瞳孔-角膜反射法(pupil center corneal reflection, PC-CR)法<sup>[9]</sup>:该方法的核心原理在于眼动方向可以由瞳孔及角膜反射光线间的相对角度确定。人眼各部分的红外光反射率不同,角膜对红外光最为敏感。因此,在红外光照射下,通过对反射红外光进行收集,可以获得清晰的暗瞳图像并伴明亮的反射光斑,测量瞳孔和光斑间的相对位置即说明了眼动方向。(3)瞳孔-普尔钦像法<sup>[10]</sup>:由于瞳孔和虹膜的红外光反射率相差较大,瞳孔可以吸收大部分红外光,而虹膜则反射大部分红外光。因此,可以在眼部的拍摄图像中获得清晰的普尔钦斑及瞳孔位置,通过分析二者的位置变化,可以准确获取眼动的信息。

### 1.3 基于录像眼动图法(video-oculography, VOG)的眼动技术

录像眼动图法依赖于快速发展的电子数据处理技术,直接将包含整张脸或整个人眼部分在内的二维图像作为参数输入,提取眼球固定标记的位置坐标,通过大数据学习建立标定样本,再利用人工智能技术对眼动模式进行分类。要实现眼动信号的精准捕捉,需要大量的样本进行前期训练,前期标定和建模的研究成本较高,但随着算法的逐步完善,得益于设备简单、成本低廉以及被试者有较大活动度的特点,基于VOG的眼动技术已经广泛应用于眼动研究的各个领域。

### 1.4 基于搜索线圈法的眼动技术

搜索线圈法是一种机械性、侵入式的眼动研究方法,通过在眼球上附着搜索线圈,由方向线圈及两个扭转线圈共同构成正交磁场,眼动带动搜索线圈在磁场内产生诱导电压,据此计算眼动信号。由于搜索线圈记录的眼动信息具有精度高、噪声小、可靠性高的特点<sup>[11]</sup>,因此该方法被认为是眼动研究最具有权威性的参考标准<sup>[12]</sup>。但该方法设备设置复杂,且由于设备直接与眼球接触,可能会对被试者的视力造成损伤<sup>[13]</sup>,这些因素都限制了搜索线圈的应用与发展。

## 2 眼动技术在医学诊断领域的研究现状

从诊断学角度看,眼动技术是评估大脑功能的

经典方法,在理解精神障碍、认知行为障碍等方面也起着关键作用,量化并记录眼动数据可以提高对疾病亚临床缺陷的检测灵敏度,为疾病的临床诊断提供有力的补充证据,并有助于疾病发病机制及预后效果的讨论。目前,已有许多研究者将眼动技术纳入了神经系统疾病、精神障碍疾病以及眼科疾病的诊断学研究。

### 2.1 神经系统疾病的筛查与诊断

眼动技术作为基础神经科学的重要研究工具,被广泛应用于帕金森病(Parkinson's disease, PD)、阿尔茨海默病(Alzheimer's disease, AD)、多系统萎缩症(multiple system atrophy, MSA)等神经系统疾病的诊断学研究。ZHANG等<sup>[14]</sup>用眼动技术跟踪了PD患者包含注视稳定性、扫视潜伏期、平滑追踪增益等在内的6项动眼神经参数,并同时记录了PD患者的临床表现,研究结果显示,PD患者的平均扫视潜伏期与对照组相比增加了16.3%,同时,其注视稳定性与对照组相比显著下降,结合6项眼动指标可将PD的诊断准确率提高至90%以上。另一方面,该研究显示追踪增益指标与PD的多项临床评估指标呈显著相关,这表明眼动技术不仅能够辅助PD的诊断,还能为PD的临床评估提供客观参考依据。同时,眼动还可能作为神经系统疾病早期分化和进展的敏感标记物。BROOKS等<sup>[15]</sup>在研究中发现,MSA患者的眼跳潜伏期显著减慢,MSA及PD患者的抗眼跳错误率明显高于健康对照组,MSA的眼跳潜伏期长于PD组及健康对照组。更有趣的是,7个月后的重复测试表明,PD组及健康对照组的眼跳潜伏期随时间推移出现缩短,而这种缩短并未发生在MSA患者中。MSA患者的异常潜伏期表明,在MSA的病程早期存在区别于PD的眼动功能改变,且这种变化可能能够较为敏感的反映MSA和PD在短时间段内产生的病理差异。因此,眼动表现可能作为早期区分PD及MSA的客观标记物,同时也可以作为衡量MSA进展的有效标志。还有研究通过对轻度认知障碍(mild cognitive impairment, MCI)患者、AD患者以及对健康对照者的眼跳数据进行分析,发现抗扫视潜伏期、抗扫视错误率等指标可以用来区分AD患者及健康对照者,同时,在间隙及重叠扫视任务中,AD患者的扫视潜伏期明显长于MCI患者,其抗扫视错误率相较MCI患者也显著升高。因此,可以借助眼跳技术实现对MCI、AD及健康对照者

之间的有效区分<sup>[16]</sup>。眼动技术还可以应用于多发性硬化症患者传出视觉系统功能障碍的检测与评估,以及预后及疾病进展监测<sup>[17-18]</sup>。并且,眼动指标作为神经创伤的一种有前途的内表型,在创伤性脑损伤的检测与诊断中也具有重要价值<sup>[19]</sup>。

### 2.2 精神障碍疾病的筛查与诊断

越来越多的证据表明,眼动功能障碍是精神障碍性疾病的一种稳定特征,可能作为精神障碍疾病的一种内表型或遗传标记<sup>[20-21]</sup>。因眼动数据可以被客观记录并量化,因此,也被广泛运用于精神障碍疾病的早期筛查与诊断。目前,精神分裂症相关的眼动研究已经取得了一定进展,包括对精神分裂症患者的非典型扫描路径、注视及眼跳的次数及时间、平滑追踪数据的探索与研究。目前比较一致的研究结果认为,注视时间、点数及距离等指标可能被视为早期检测精神分裂症患者的潜在生物标志物<sup>[22-25]</sup>,并辅助精神分裂症患者的临床进展评估。孤独症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)的临床前预测也是当前研究的重点之一,CAMERO等<sup>[26]</sup>利用眼动技术对在语言互动任务中孤独症儿童与健康儿童的注视跟踪及瞳孔扩张情况进行评估,结果显示二者在注视跟踪次数及时间上存在显著差异,因此,注视指标可能作为ASD存在的潜在生物指标。

眼动技术还被广泛应用于抑郁症、焦虑症及双相情感障碍等疾病的诊断研究。MALSERT等<sup>[27]</sup>利用眼动技术对抑郁患者的抗眼跳指标进行评估,结果显示抗眼跳指标与抑郁患者的临床评估间存在相关关系,提示眼动特征可以作为抑郁状态的一项衡量指标。另有部分研究发现,抑郁患者的眼跳及平滑追踪运动与健康对照组间存在显著差异<sup>[28-29]</sup>,说明抑郁患者在眼动数据上与非抑郁者存在差异性。CHROBAK等<sup>[30]</sup>发现,双相情感障碍患者存在收敛干扰及眼跳侵入等眼动异常。前期研究表明,该人群的扫视及抗眼跳运动也存在异常,可能作为双相情感障碍的一种生物标志<sup>[31]</sup>。

虽然现在的眼动研究在研究对象、观测指标、研究范式等方面不尽相同,且仍需要大量的后续研究佐证其诊断价值,但眼动技术无疑提供了基于神经生理学进行疾病诊断及评估的新思路。

### 2.3 眼科疾病的筛查与辅助诊断

眼动技术在眼科疾病的诊断中起到了重要的作用。大量的前期研究表明,青光眼所引起的神经退行

性改变同样会影响视觉运动系统,因此,眼动技术也被广泛地应用于青光眼的功能缺陷评估以及临床诊断分型<sup>[32-35]</sup>。BALLAE 等<sup>[36]</sup>对高眼压型青光眼(high tension glaucoma, HTG)、正常眼压型青光眼(normal tension glaucoma, NTG)及原发性闭角型青光眼(primary angle closure glaucoma, PACG)的眼跳运动进行比较,发现不同亚型青光眼角间存在眼跳差异,因此,眼跳运动可能为青光眼的临床分型提供客观的参考指标。有研究利用眼跳数据来对青光眼所致视野缺损进行评估,结果显示青光眼患者眼动数据的眼间差异与临床视力评测眼间差异存在着显著相关,提示眼动数据可能被用作青光眼患者视野损伤的生物标志<sup>[37]</sup>。

随着计算机技术的不断发展,眼动技术还与人工智能相结合,使用眼动数据联合卷积神经网络构建智能化的视力检测工具,用于斜视、隐斜视的筛查与诊断<sup>[38-40]</sup>。也有研究将其用于特殊智力障碍儿童的视力评估,为小儿视力障碍的检测提供了附加价值信息<sup>[41-42]</sup>。

### 3 眼动技术在中医领域的应用前景

#### 3.1 眼动技术在中医诊断方面的应用前景

3.1.1 在中医表征信息采集中的应用 现代科学技术的进步为中医的客观化、规范化、标准化发展提供了可能。传统的中医诊断学依赖于四诊信息对疾病进行辨识与诊断,而从沈自尹教授“微观辨证”概念的首次提出<sup>[43]</sup>,到李灿东教授“宏、中、微”三观并用的中医健康状态表征参数体系的建立<sup>[44]</sup>,中医表征信息涵盖范围在逐步扩充,表征信息采集得到了进一步的完善,中医辨证参考体系已不仅仅局限于传统的四诊信息,还包含了越来越多现代科技所采集的数据指标。眼动技术可以通过记录人体在处理视觉信息时的眼动轨迹以及瞳孔扩张,反映大脑功能和认知功能,还能从一定程度上作为大脑病理性结构改变的生物标志。对于部分病情较轻或早期无明显临床症状的疾病,如 PD、AD 以及主要依靠主观感性指标进行临床评价的疾病,如抑郁症、焦虑症等,借助眼动指标可以发现其潜在证候,为疗效评价提供客观化的参考指标,有助于提高临床诊断的准确性并完善客观化中医疗效评价体系。而眼动技术作为一种灵敏、精准、客观的现代化检测工具,将其应用于中医表征信息采集,既是对中医健康状态

表征参数体系的完善,也是对中医整体观的继承与发展。

3.1.2 在中医现代化目诊研究中的应用 目诊通过观察目的神、色、形、态 4 个方面的变化,来推断疾病的发生,辨别疾病的性质,预测疾病的发展与转归,在中医的临床诊断中起着至关重要的作用。目诊包括望目神、望目色、望目形、望目态 4 个方面,但目前研究仍大多集中于望目色及望目形的研究,传统望目辨证以五轮八廓学说为理论基础对眼部进行了脏腑划分,望目辨证的重点仍是观察眼睛不同部位所产生的形色变化,并据此诊断相应的脏腑病变<sup>[45]</sup>。现代中医目诊的研究顺应科学发展的要求,广泛应用各种诊疗仪器为临床诊断提供客观化的参考指标。但同样,这些新技术也多是基于对眼部病理性形色改变的记录来实现对疾病的诊断。中医目诊的目态研究仍基本处于空白阶段。中医学早在《黄帝内经》中就强调了目态在疾病辨证审因、推测预后中的重要作用,如“瞳子高者,太阳不足”,“戴眼者,太阳已绝,此决生死之要”,均指出了目睛上视与太阳经气衰竭之间的密切联系。“少阳终者,耳聋、百节皆纵,目系绝。目系绝,一日半则死矣”,指出双目直视且转动不灵是少阳之气衰竭的表现,提示病情危重且预后较差。《黄帝内经》中所涉及的目态还包括直视、瞪视、斜视、目眦等多种,均具有较高的诊断价值,但由于诊断技术的局限性,以往的目态研究多依赖于临床医生的床边检查,具有相当大的主观性,目态指标难以被量化并记录,这不利于研究结果的互通。眼动技术的发展为中医目诊的目态研究提供了技术可行性,能够对目态数据进行具体、精准、可重复的测量,实现目态数据的客观化、标准化,从目态角度为疾病的临床诊断、辨证分型以及疗效评价研究提供数据支持。此外,基于眼动技术的前期研究成果,以眼动指标与中枢神经系统之间的关系网络为媒介,可以进一步探索疾病的神经生理学发病机制,能够从更全面角度解读眼动信息变化与疾病发生发展之间的关系。同时,借助眼动技术进行客观化、标准化的目态研究,也是对中医目诊体系的进一步完善与发展。

#### 3.2 眼动技术在中医健康管理方面的应用前景

中医学“治未病”思想自春秋战国伊始,经过上千年的传承与发展,已经形成了一套完备、系统的认识论及方法学,这种理论与现代的健康管理核心概

念不谋而合,顺应着时代的需求,中医健康管理得到了迅速的发展。目前中医健康管理的核心难点及发展瓶颈,在于如何实现对亚健康人群的健康管理、如何实现对于“未病之病”的早期筛查与监测,简单来说就是如何实现“未病先防”。一方面,随着眼动技术的发展,其研究领域已经从心理学、神经科学研究逐渐扩展到临床医学研究,眼动数据作为部分眼科疾病及神经系统疾病的早期生物标志,在疾病的早期诊断与筛查方面有着明显优势,将眼动技术应用于中医健康管理,能够为中医健康风险预警提供新的观测指标,也为中医健康状态的客观化评估提供新的证据支撑。另一方面,随着社会对心理健康问题的关注度逐年增加,实现对精神心理疾病的早期筛查、诊断及干预治疗也已经成为中医健康管理发展亟待解决的关键问题,而研究显示眼部运动特征可以作为部分精神障碍疾病诊断及评估的生理基础指标,这也与中医学“望目察神”的思想相通,因此,将眼动技术应用于中医情志病的健康管理,也能够为情志病客观化诊断标准的建立提供新思路,为中医健康管理的发展提供更广阔的科技平台。

#### 4 结语与展望

随着计算机技术的发展及图像分析水平的提高,眼动技术的使用成本已经得到了有效控制。得益于其便捷、灵敏、精准的特点,眼动技术已经在医学诊断方面得到了广泛应用。虽然目前研究因受到眼动参数、仪器种类、仪器精度、活动范式以及样本量大小等因素的影响而导致数据可靠性降低,但眼跳数据对疾病的诊断价值仍是至关重要。目前,眼动技术还尚未应用于中医诊断领域,但望目态作为中医目诊的重要组成部分,在中医临床诊断、治疗及预后的评估中均具有重要意义,故本文通过对眼动技术在现代医学诊断领域的研究进展进行梳理,结合中医学特点对眼动技术在中医领域的应用前景进行探讨,以期对中医现代化研究提供新思路与参考方向。

#### 参考文献

[1] HALLETT P E. Primary and secondary saccades to goals defined by instructions[J]. *Vision Research*, 1978, 18(10): 1279–1296.  
 [2] EVERLING S, MUNOZ D P. Neuronal correlates for preparatory set associated with pro-saccades and anti-saccades in the primate frontal eye field[J]. *The Journal of Neuroscience: the Official*

*Journal of the Society for Neuroscience*, 2000, 20(1): 387–400.  
 [3] FUNAHASHI S, BRUCE C J, GOLDMAN-RAKIC P S. Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1989, 61(2): 331–349.  
 [4] LUNA B, VELANOVA K, GEIER C F. Development of eye-movement control[J]. *Brain and Cognition*, 2008, 68(3): 293–308.  
 [5] 张丹丹, 陶静, 陈立典. 基于“目通于脑”探讨眼动反映认知功能障碍[J]. *中医杂志*, 2019, 60(24): 2154–2156.  
 [6] CORNSWEET T N, CRANE H D. Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1973, 63(8): 921–928.  
 [7] BRISSON J, MAINVILLE M, MAILLOUX D, et al. Pupil diameter measurement errors as a function of gaze direction in corneal reflection eyetrackers[J]. *Behavior Research Methods*, 2013, 45(4): 1322–1331.  
 [8] SHUPERT C, FUCHS A F. Development of conjugate human eye movements[J]. *Vision Research*, 1988, 28(5): 585–596.  
 [9] 张闯, 迟健男, 张朝晖, 等. 一种新的基于瞳孔-角膜反射技术的视线追踪方法[J]. *计算机学报*, 2010, 33(7): 1272–1285.  
 [10] SHIH S W, LIU J. A novel approach to 3-D gaze tracking using stereo cameras[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B*, 2004, 34(1): 234–245.  
 [11] A DUCHOWSKI. Eye-Based Interaction in Graphical Systems: Theory & Practice[J]. *Acm Siggraph Course Notes*, 2000, 18(1): 246–248.  
 [12] EGGERT T. Eye movement recordings: Methods[J]. *Developments in Ophthalmology*, 2007, 40: 15–34.  
 [13] IRVING E L, ZACHER J E, ALLISON R S, et al. Effects of scleral search coil wear on visual function[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2003, 44(5): 1933–1938.  
 [14] ZHANG Y, YAN A J, LIU B Y, et al. Oculomotor performances are associated with motor and non-motor symptoms in parkinson's disease[J]. *Frontiers in Neurology*, 2018, 9: 960.  
 [15] BROOKS S H, KLIER E M, RED S D, et al. Slowed prosaccades and increased antisaccade errors: As a potential behavioral biomarker of multiple system atrophy[J]. *Frontiers in Neurology*, 2017, 8: 261.  
 [16] OPWONYA J, DOAN D N T, KIM S G, et al. Saccadic eye movement in mild cognitive impairment and alzheimer's disease: A systematic review and meta-analysis[J]. *Neuropsychology Review*, 2022, 32(2): 193–227.  
 [17] REMPE T, DASTGHEYB N, MINER A, et al. Quantification of smooth pursuit dysfunction in multiple sclerosis[J]. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 2021, 54: 103073.  
 [18] SHEEHY C K, BENSINGER E S, ROMEO A, et al. Fixational microsaccades: A quantitative and objective measure of disability in multiple sclerosis[J]. *Multiple Sclerosis*, 2020, 26(3): 343–353.  
 [19] HUNFALVAY M, MURRAY N P, CARRICK F R. Fixation stability as a biomarker for differentiating mild traumatic brain in-

- jury from age matched controls in pediatrics[J]. *Brain Injury*, 2021, 35(2): 209–214.
- [20] BENSON P J, BEEDIE S A, SHEPHARD E, et al. Simple viewing tests can detect eye movement abnormalities that distinguish schizophrenia cases from controls with exceptional accuracy[J]. *Biological Psychiatry*, 2012, 72(9): 716–724.
- [21] LUKASOVA K, LEMOS ZANIN L, CHUCRE M V, et al. Analysis of exploratory eye movements in patients with schizophrenia during visual scanning of projective tests' figures[J]. *Jornal Brasileiro De Psiquiatria*, 2010, 59(2): 119–125.
- [22] BEEDIE S A, BENSON P J, ST CLAIR D M. Atypical scanpaths in schizophrenia: Evidence of a trait or state-dependent phenomenon? [J]. *Journal of Psychiatry & Neuroscience*, 2011, 36(3): 150–164.
- [23] HE Q, WANG Q D, WU Y X, et al. Automatic classification of children with autism spectrum disorder by using a computerized visual-orienting task[J]. *PsyCh Journal*, 2021, 10(4): 550–565.
- [24] MINASSIAN A, GRANHOLM E, VERNEY S, et al. Visual scanning deficits in schizophrenia and their relationship to executive functioning impairment[J]. *Schizophrenia Research*, 2005, 74(1): 69–79.
- [25] MORITA K, MIURA K, FUJIMOTO M, et al. Eye movement as a biomarker of schizophrenia: Using an integrated eye movement score[J]. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 2017, 71(2): 104–114.
- [26] CAMERO R, MARTÍNEZ V, GALLEGO C. Gaze following and pupil dilation as early diagnostic markers of autism in toddlers[J]. *Children*, 2021, 8(2): 113.
- [27] MALSERT J, GUYADER N, CHAUVIN A, et al. Antisaccades as a follow-up tool in major depressive disorder therapies: A pilot study[J]. *Psychiatry Research*, 2012, 200(2/3): 1051–1053.
- [28] GANTZ L, CASPI A. Synchronization of a removable optical element with an eye tracker: Test case for heterophoria measurement[J]. *Translational Vision Science & Technology*, 2020, 9(7): 40.
- [29] CHEN Z H, FU H, LO W L, et al. Strabismus recognition using eye-tracking data and convolutional neural networks[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2018, 2018: 7692198.
- [30] CHROBAK A A, RYBAKOWSKI J K, ABRAMOWICZ M, et al. Vergence eye movements in bipolar disorder[J]. *Psychiatria Polska*, 2020, 54(3): 467–485.
- [31] BOLDING M S, LAHTI A C, WHITE D, et al. Vergence eye movements in patients with schizophrenia[J]. *Vision Research*, 2014, 102: 64–70.
- [32] LIPTON R B, LEVIN S, HOLZMAN P S. Horizontal and vertical pursuit eye movements, the oculocephalic reflex, and the functional psychoses[J]. *Psychiatry Research*, 1980, 3(2): 193–203.
- [33] ARMSTRONG T, OLATUNJI B O. Eye tracking of attention in the affective disorders: A meta-analytic review and synthesis[J]. *Clinical Psychology Review*, 2012, 32(8): 704–723.
- [34] ASFAW D S, JONES P R, MÖNTER V M, et al. Does Glaucoma alter eye movements when viewing images of natural scenes? A between-eye study[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2018, 59(8): 3189–3198.
- [35] MCKENDRICK A M, SAMPSON G P, WALLAND M J, et al. Contrast sensitivity changes due to glaucoma and normal aging: Low-spatial-frequency losses in both magnocellular and parvocellular pathways[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2007, 48(5): 2115–2122.
- [36] BALLAE G S, JALEEL A, MADICHARLA S, et al. Comparison of saccadic eye movements among the high-tension glaucoma, primary angle-closure glaucoma, and normal-tension glaucoma[J]. *Journal of Glaucoma*, 2021, 30(3): e76–e82.
- [37] LEK J J, VINGRYS A J, MCKENDRICK A M. Rapid contrast adaptation in glaucoma and in aging[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2014, 55(5): 3171–3178.
- [38] MCKENDRICK A M, SAMPSON G P, WALLAND M J, et al. Impairments of contrast discrimination and contrast adaptation in glaucoma[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2010, 51(2): 920–927.
- [39] GLEN F C, CRABB D P, SMITH N D, et al. Do patients with glaucoma have difficulty recognizing faces? [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2012, 53(7): 3629–3637.
- [40] MESTRE C, OTERO C, DÍAZ-DOUÓN F, et al. An automated and objective cover test to measure heterophoria[J]. *PLoS One*, 2018, 13(11): e0206674.
- [41] KOOIKER M J, PEL J J, VAN DER STEEN-KANT S P, et al. A method to quantify visual information processing in children using eye tracking[J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2016(113): 54031.
- [42] BARSINGERHORN A D, BOONSTRA F N, GOOSSENS J. Saccade latencies during a preferential looking task and objective scoring of grating acuity in children with and without visual impairments[J]. *Acta Ophthalmologica*, 2019, 97(6): 616–625.
- [43] 沈自尹. 微观辨证和辨证微观化[J]. *中医杂志*, 1986(2): 55–57.
- [44] 李灿东, 杨雪梅, 纪立金, 等. 健康状态表征参数体系的建立与集合分析[J]. *中华中医药杂志*, 2011, 26(3): 525–528.
- [45] 王今觉. 从辨病用药、辨证论治谈辨病证医药学[J]. *中医杂志*, 2000, 41(7): 443–444.

(本文编辑 匡静之)