

· 临床研究 ·

基于扩展现实的眼镜式可穿戴视野计在黄斑疾病视野功能评估中的应用

袁静¹ 王兴昌² 孙锡全² 焦辉广² 王倩² 童艳霞¹ 涂碧玥¹ 严茜茜¹ 赵振¹
欧小杰¹ 阿卜杜拉·萨伍提¹

¹武汉大学人民医院眼科中心, 武汉 430060; ²深圳视力棒医疗科技有限公司, 深圳 518055

通信作者: 袁静, Email: xyj711@163.com

【摘要】 目的 评价基于扩展现实(XR)的眼镜式可穿戴视野计(XRVF)在黄斑疾病患者视野评估中的应用效果。**方法** 采用自身对照研究方法,于2022年10月至2024年10月在武汉大学人民医院眼科中心连续招募黄斑疾病患者41例41眼作为研究对象。所有受试者均采用自主研发的可穿戴视野计 XRVF 进行10-2中心视野检测,与传统的 Humphrey 视野计(HFA)检测参数进行比较,比较参数包括视网膜敏感度、假阳性率、假阴性率、测试时长,并进行受试者满意度问卷调查。**结果** 受检眼使用 HFA 测试的视网膜敏感度为(23.24±3.71)dB,高于 XRVF 的(22.01±3.45)dB,差异有统计学意义($t=4.924, P=0.036$)。受检眼使用 HFA 和 XRVF 测试的假阳性率分别为(2.39±2.51)%和(2.59±3.29)%,假阴性率分别为(3.49±6.05)%和(3.74±5.38)%,差异均无统计学意义($t=-3.624, P=0.948; t=-1.241, P=0.519$)。受检眼采用 HFA 和 XRVF 的测试时长分别为 6.15(5.78, 6.65)和 5.98(5.71, 6.69)min,差异无统计学意义($Z=-1.987, P=0.953$)。92.6%的受试者认为 XRVF 设备舒适且简单实用。**结论** 可穿戴视野计 XRVF 与 HFA 具有良好的 consistency,能够有效可靠地评估黄斑疾病患者的视野功能,且易被患者接受。

【关键词】 黄斑疾病; 视野; 扩展现实; Humphrey 视野计; 视网膜敏感度

基金项目: 湖北省重点研发计划(2021BCA125)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20250610-00196

Application of a wearable visual field meter based on extended reality glasses in macular disease

Yuan Jing¹, Wang Xingchang², Sun Xiquan², Jiao Huiguang², Wang Qian², Tong Yanxia¹, Tu Biye¹, Yan Xixi¹, Zhao Zhen¹, Ou Xiaojie¹, Abdulla Sawut¹

¹Eye Center, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430060, China; ²Shenzhen Vision Stick Medical Technology Co., Ltd., Shenzhen 518055, China

Corresponding author: Yuan Jing, Email: xyj711@163.com

[Abstract] Objective To evaluate the application effect of a wearable visual field meter based on extended reality (XR) glasses for patients with macular disease. **Methods** A self-controlled study was conducted. A total of 41 consecutive patients (41 eyes) with macular disease were recruited at Renmin Hospital of Wuhan University from October 2022 to October 2024. All patients underwent 10-2 center visual field test using a self-developed wearable visual field meter (XRVF), and the results were compared with those obtained using a traditional Humphrey field analyzer (HFA). The comparison parameters included mean retinal sensitivity (MS), false positive rate (FPR), false negative rate (FNR), and testing duration. A subject satisfaction questionnaire was administered. This study followed the Declaration of Helsinki. The study protocol was approved by the Medical Ethics Committee of Renmin Hospital of Wuhan University (No. WDRY2024-K263), and all subjects signed the informed consent form. **Results** The retinal sensitivity of patients measured by HFA was (23.24±3.71)dB, which was higher than (22.01±3.45)dB by XRVF, showing a statistically significant difference ($t=4.924, P=0.036$). The FPR measured by HFA and XRVF were (2.39±2.51)% and (2.59±3.29)%, respectively, and the FNR were (3.49±6.05)% and (3.74±5.38)%, respectively, showing no statistically significant difference ($t=-3.624, P=0.948; t=-1.241, P=0.519$). The median test duration for HFA and XRVF was 6.15 (5.78, 6.65) and 5.98 (5.71, 6.69) minutes, respectively,

without statistically significant difference ($Z = -1.987, P = 0.953$). 92.6% of the subjects thought the device was comfortable, simple and practical. **Conclusions** The XRVF has good consistency with the HFA, can effectively and reliably evaluate the visual field function of patients with macular disease, and is easily accepted by patients.

[Key words] Macular disease; Visual field; Extended reality; Humphrey visual field meter; Mean light sensitivity

Fund program: Key R&D Plan Project of Hubei Province (2021BCA125)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20250610-00196

黄斑疾病是全球范围内导致严重不可逆性视力损伤的主要原因之一^[1-2],已成为严重的社会公共卫生问题,包括年龄相关性黄斑变性、糖尿病黄斑水肿、视网膜中央或分支静脉阻塞、特发性黄斑裂孔、黄斑前膜、病理性近视黄斑病变等,这些疾病随病情进展可发展为视力丧失。因此,《“十四五”全国眼健康规划(2021—2025 年)》提出“构建眼底病慢病管理体系”,强调建立全程系统性慢病管理体系^[3]。全程系统性慢病管理涉及筛查、诊断、治疗及随访等多个方面^[4],其中视野是评估黄斑疾病发生和发展以及预后判断的重要功能指标之一。目前,临床上常用的视野计,如 Goldmann 视野计、Octopus 视野仪、Humphrey 视野计(Humphrey field analyzer, HFA)、MP-1 或 MP-3 微视野计和 MAIA 微视野计等,均为大型设备,仅适用于医院等定点医疗场所,且多集中于大型三级甲等医院,国内大多数基层医院或社区医院很难配备,导致很多患者错过了最佳监测时机和治疗机会。因此,亟需一种普及性高、便于携带的低成本视野检测装置,以满足国家对慢病管理战略的需求。

近年来,随着头戴式显示器(head mounted display, HMD)技术的快速发展,已经可以实现虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)或扩展现实(extended reality, XR)等不同效果,在视物与成像方面具有越来越先进和智能的技术优势^[5-6]。基于先进的 XR 技术(如计算机图像和目标识别),用户周围的环境信息变得具有交互性和数字可操作性,与环境 and 物体相关的虚拟化信息能够叠加在真实世界之上,且 XR 可提供 10~60°的视野范围,可以满足眼科视野阈值检测的要求,为黄斑疾病患者的主动视觉健康管理提供一种新的技术手段。

本研究团队前期开发了一款基于 XR 眼镜式可穿戴视野计(XR-based wearable visual field meter, XRVF)^[7],该设备具备智能化、便携化及小型化的可穿戴效果,借助 XR 眼镜可实现数字化视野检测及监测。本研究拟评估和验证该设备在黄斑疾病患者视野检查中应用的准确性和可靠性。

1 资料与方法

1.1 一般资料

采用自身对照研究方法,连续纳入 2022 年 10 月至 2024 年 10 月在武汉大学人民医院眼科中心就诊的黄斑疾病患者。采用配对样本等效性检验计算样本量,参照黄斑疾病视野计验证标准 Δ (等效阈值)=1.9 dB, I 类错误 $\alpha = 0.05$ (双侧), II 类错误 $\beta = 0.10$ (效能=90%), $Z_{0.975} = 1.96, Z_{0.90} = 1.28$, HFA 与 XRVF 的合并标准差 $\sigma = 3.68$ dB, 计算公式为 $n = \frac{(Z_{1-\alpha/2} + Z_{1-\beta})^2 \times \sigma^2}{\Delta^2}$, 可得 $n = 40.2$ 。共纳入黄斑疾病

患者 41 例 41 眼,其中男 19 例,女 22 例;年龄 21~60 岁,平均(49.60±8.74)岁。纳入标准:(1)矫正视力 ≥ 0.1 ,且眼部病情稳定;(2)有一定的电子产品使用基础;(3)愿意配合此项研究者。排除标准:(1)有黄斑区出血、水肿和活动性病灶者;(2)合并屈光间质混浊、青光眼、眼外伤等或任何可能影响视野检测的其他视觉通路疾病,如垂体病变、脱髓鞘疾病等者;(3)有双手活动障碍者;(4)有其他影响阅读的不适症状者,如头痛等;(5)有语言障碍、智力障碍者或癫痫者。41 例患者中有年龄相关性黄斑变性 15 例、视网膜脱离术后黄斑病变 7 例、糖尿病黄斑水肿 6 例、黄斑裂孔(含术后)5 例、脉络膜新生血管 4 例、视网膜中央或分支静脉阻塞 2 例、黄斑前膜 2 例。自身对照采用受试者同期 HFA 检测结果。本研究遵循《赫尔辛基宣言》,研究方案经武汉大学人民医院医学伦理委员会批准(批文号:WDRY2024-K263),所有受试者均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 视野检测 采用自主研发的便携式视野计 XRVF 对受试者进行视野检测(图 1)。(1)视野检测策略 在中心 10°范围内,以注视点为中心,向各方向延伸。在中心 10°视野检测范围内,刺激位点视标固定为 68 个,平均分布在 4 个象限中,每个象限中的刺激位点视标为 17 个。视标大小按照 Goldmann 视野计标准设计。通常情况下,测试选择 III 级光标,直径对应

单眼视张角 26° ; 典型检查距离为 300 mm, 刺激点持续时间为 100~200 ms, 间隔时间为 1.5~4 s, 背景光亮度 ≥ 3 asb ($1 \text{ asb} = 1 \text{ cd/m}^2$)。 (2) 受检眼信息录入 测试前, 登录系统准确录入受试者信息, 包括检测日期和时间、姓名、性别、年龄、出生日期、ID 号、眼别、视力、病史等, 以便系统能够自动识别和分析患者基线和随访检测结果。 (3) 受检眼屈光矫正 测试前, 通过系统软件控制 XR 眼镜对应的光学显示模组, 遮蔽一侧眼, 同时左右拨动设备上的屈光度调节旋钮 (可矫正 1~5 D 范围), 使受检眼调至最清晰状态, 如果达不到清晰状态, 可适配光学眼镜。 (4) 测试环境 测试在暗环境下进行, 面向无障碍物墙壁, 避免光线和杂物等影响测试质量。系统软件自动识别环境光照度, 当光照度达到 5 lx 以下时进入测试准备。 (5) 测试步骤 测试时, 嘱受试者保持注视中心红色十字光标, 若看不到十字光标, 保持注视中心; 不同亮度的圆点会在红十字周围随机出现, 看到光标闪烁时按下确认键。接下来, 在该点下一次显示刺激位点时, 视标亮度减小 4 dB, 直到受试者首次表示看不到刺激位点视标为止。根据受试者的应答情况得到各测试位点敏感度值。测试结束时, 系统根据交互结果自动分析并生成可视化数据图表, 包括单次测试时的数据阵列图、彩色图、灰度图 (图 2A~C); 患者也可根据需要进行下载打印初次或不同随访阶段的测试结果 (图 2D), 以便及时动态了解疾病的发生和发展趋势。

1.2.2 视野检测效果评价 为校正自动视野测试在受试者的学习曲线, 选取第 3 次测试结果进行比较, 以评估设备检测的准确性、可靠性和可接受性。分析指标包括平均视网膜敏感度 (mean light sensitivity, MS)、假阳性率 (false positive rate, FPR)、假阴性率 (false negative rate, FNR)、测试时长, 评估内容由系统平台测试

后自动分析数据 (图 3)。 (1) MS 检测准确性指标, 即在系统 10° 视野检测范围内, 计算各测试点的光敏感度算术平均值, 以评估视网膜的平均光敏感度。 (2) FPR 受试者没有真正看到视标却按下应答按钮的比例, 是反映测试可靠性的重要指标。如果 FPR 超过 33%, 提示检测结果不可靠, 需要重复测试。 (3) FNR 受试者应该看到视标却没有按下应答按钮的比例, 是反映测试可靠性的另一指标, 主要用于评估受试者注意力分散情况。如果 FNR 超过 33%, 提示检测结果不可靠, 需要重复测试。 (4) 测试时长 受检眼分别使用 XRVF 和 HFA 测试视野, 系统自动记录测

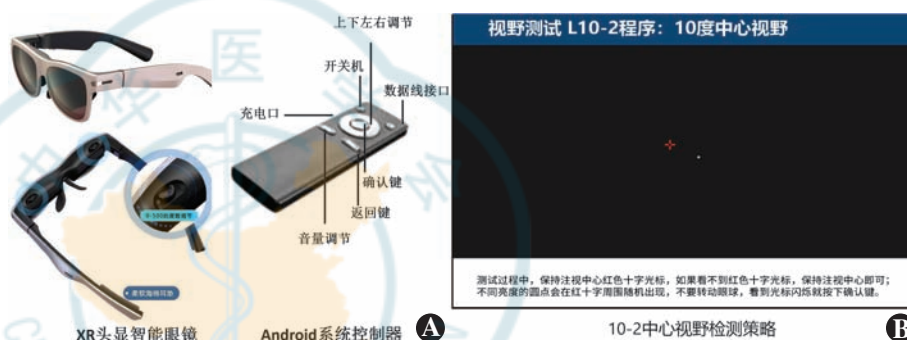


图 1 XR 智能眼镜外观及视野检测模式图 A: 设备外观 B: 视野检测模式 XR: 扩展现实
Figure 1 Appearance and visual field detection mode of XR smart glasses A: Device appearance B: Visual field detection mode XR: extended reality

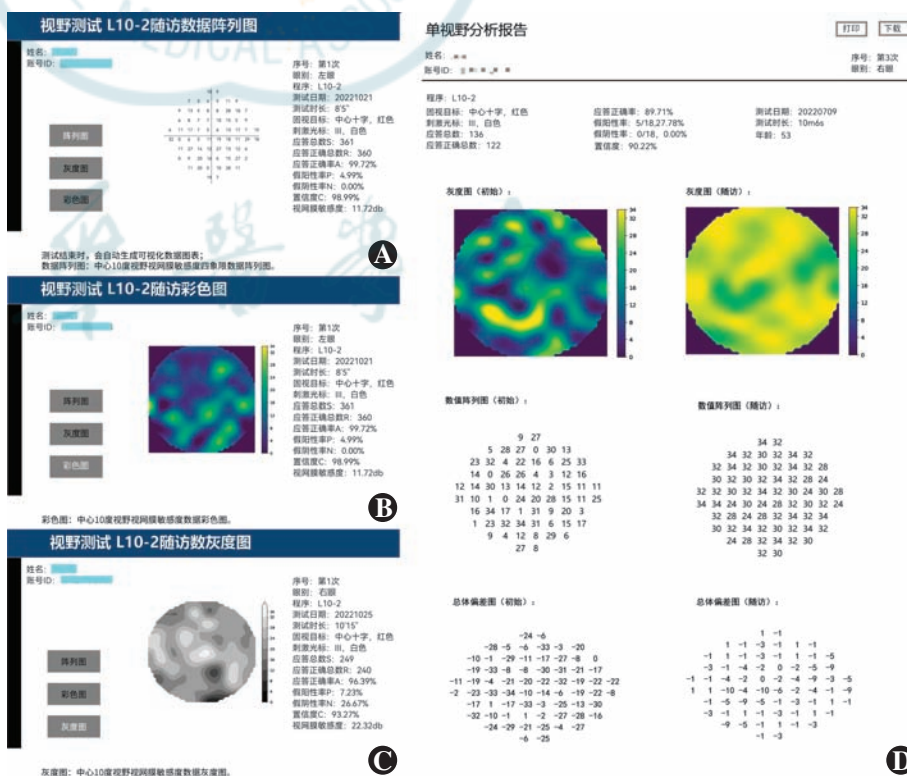


图 2 系统中心 10-2 视野测试结果图 A: 阵列图 B: 彩色图 C: 灰度图 D: 单视野分析报告
Figure 2 Central 10-2 visual field test results A: Array diagram B: Color diagram C: Grayscale diagram D: Single visual field analysis report

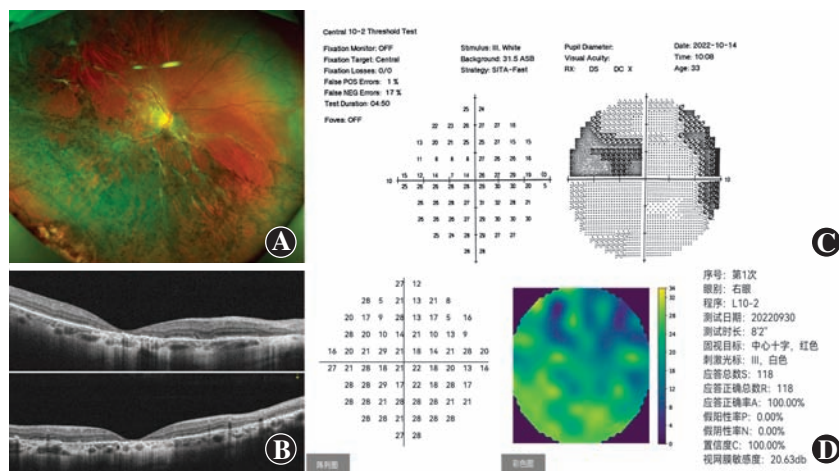


图 3 1 例男性视网膜脱离患者外路手术后 16 年眼底彩色照相、光学相干断层扫描、HFA 和 XR VF 视野检测结果 A:眼底彩色照相 B:黄斑光学相干断层扫描显示黄斑区外层视网膜结构紊乱 C:HFA 视野检测阵列图、灰度图及参数结果 D:XR VF 视野检测阵列图、彩色图及参数结果 HFA:Humphrey 视野计;XR VF:基于 XR 眼镜式可穿戴视野计

Figure 3 Color fundus photography, optical coherence tomography, HFA, and XR VF visual field tests results of a male patient 16 years after external retinal detachment surgery A: Color fundus photography B: Macular optical coherence tomography showed disorganization of the outer retinal structure in the macular region C: Array diagram, grayscale diagram, and parameter results of HFA visual field test D: Array diagram, grayscale diagram, and parameter results of XR VF visual field test HFA: Humphrey field analyzer; XR VF: XR-based wearable visual field meter

试时长。(5)满意度问卷调查 在视野测试之后,进行受试者满意度问卷调查^[8],记录受试者对该设备的难易度、信心和舒适度评价。还需记录测试时设备是否发生故障、使用便捷性、眼部及全身不良反应、在家重复测试的意愿等。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 24.0 统计学软件进行统计分析。计量资料经 Shapiro-Wilk 检验,符合正态分布的数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示,2 种视野检测的 MS、FPR、FNR 比较采用配对 t 检验;不符合正态分布的数据以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,2 种视野检测的时长比较采用 Wilcoxon 符号秩检验。采用 Spearman 等级相关分析 MS 值之间的相关性。计数资料以频数和百分比描述。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 HFA 与 XR VF 视野测试 MS 比较

受检眼使用 HFA 测试的 MS 值为 (23.24 ± 3.71) dB,明显高于 XR VF 的 (22.01 ± 3.45) dB,差异有统计学意义

($t = 4.924, P = 0.036$)。XR VF 与 HFA 之间 MS 值呈正相关($r_s = 0.937, P < 0.001$) (图 4A)。

2.2 HFA 与 XR VF 视野测试 FPR 和 FNR 比较

受检眼使用 HFA 和 XR VF 测试的 FPR 值分别为 $(2.39 \pm 2.51)\%$ 和 $(2.59 \pm 3.29)\%$,FNR 值分别为 $(3.49 \pm 6.05)\%$ 和 $(3.74 \pm 5.38)\%$,差异均无统计学意义($t = -3.624, P = 0.948; t = -1.241, P = 0.519$) (图 4B, C)。但用 XR VF 测试时,FNR 值略高。

2.3 HFA 与 XR VF 视野测试时长比较

受检眼采用 HFA 和 XR VF 视野测试时长分别为 6.15 (5.78, 6.65) 和 5.98 (5.71, 6.69) min,差异无统计学意义($Z = -1.987, P = 0.953$) (图 4D)。其中,年龄较大或中央视野缺损程度较重者使用 HFA 测试视野时长较 XR VF 短,而年龄较小或病情较轻者使用 XR VF

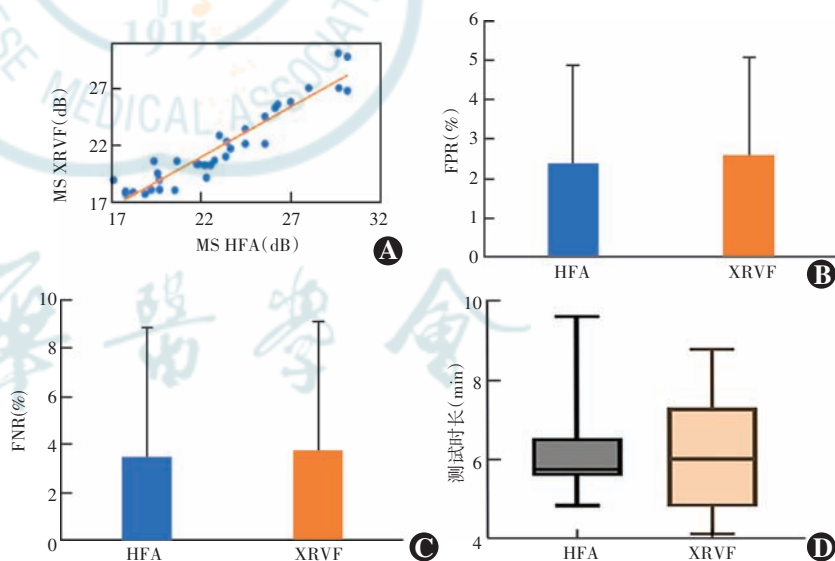


图 4 受试者 HFA 和 XR VF 视野检测中的不同参数比较 ($n = 41$) A:MS 相关性散点图 橙色实线为最佳拟合线, $r_s = 0.937, P < 0.001$ (Spearman 秩相关性分析) B:FPR 比较 $t = -3.624, P = 0.948$ (配对 t 检验) C:FNR 比较 $t = -1.241, P = 0.519$ (配对 t 检验) D:测试时长比较 $Z = -1.987, P = 0.953$ (Wilcoxon 符号秩检验) HFA:Humphrey 视野计;XR VF:基于 XR 眼镜式可穿戴视野计;MS:平均视网膜敏感度;FPR:假阳性率;FNR:假阴性率

Figure 4 Comparison of different parameters between HFA and XR VF visual field tests ($n = 41$) A: Correlation scatter plot of MS The red solid line represented the best-fit line, $r_s = 0.937, P < 0.001$ (Spearman rank correlation analysis) B: Comparison of FPR $t = -3.624, P = 0.948$ (Paired t -test) C: Comparison of FNR $t = -1.241, P = 0.519$ (Paired t -test) D: Comparison of Test duration $Z = -1.987, P = 0.953$ (Wilcoxon signed-rank test) HFA: Humphrey field analyzer; XR VF: XR-based wearable visual field meter; MS: mean light sensitivity; FPR: false positive rate; FNR: false negative rate

2.4 HFA 与 XR VF 视野测试满意度

所有受试者均完成了满意度问卷调查。总体来说,所有受试者在使用中未出现设备电池或控制器故障等硬件或软件问题,使用过程顺利。仅 2 例年龄偏大的受试者对于设备使用评价表示中立,1 例表示使用困难。92.6% 的受试者,尤其是年轻患者对可穿戴设备非常有兴趣,认为使用简单且舒适,与 HFA 相比更易于接受。所有受试者在使用中均未抱怨有眩晕、疲劳、闷热等不适感(表 1)。

表 1 受试者满意度调查结果 (N=41)
Table 1 Subject satisfaction survey results (N=41)

问题	评价标准	人数 (n)
总体而言,您觉得使用这个设备有多难?	0=非常简单	30
	1=简单	8
	2=中立	2
	3=困难	1
	4=非常困难	0
您再次独自使用该设备时会有多大的信心?	0=非常自信	22
	1=自信	17
	2=中立	2
	3=不自信	0
	4=完全不自信	0
与您之前进行的视野检查相比,使用该设备的体验如何?	0=非常舒适	19
	1=舒适	20
	2=中立	2
	3=不舒适	0
	4=完全不舒适	0
	5=不适用	0

3 讨论

视野是监测视觉功能的金标准。理想情况下,居家测试视野可能更有助于黄斑疾病患者的主动视觉健康管理。随着 HMD 和大数据分析技术的发展,便携式视野计有望突破现有依赖医院应用场景的监测模式,实现居家场景动态监测^[8-12]。本研究中所采用的视野检测设备即 XR 眼镜式,使用便携、经济、易操作,患者佩戴稳定,头部和眼镜一体固定,使患者能按照测试要求进行视野检测。这种 XR 眼镜集成安装红外照明器和眼动摄像头,通过信号接口与移动端连接,由移动端的应用软件实现数字化动态视野检测,其中黄斑疾病视野检测程序采用视野计对应的 10-2 策略,由系统在 10°视野范围内给出设定位置和亮度的视标投射到 XR 眼镜,根据患者是否看到视标作出应答,系统根据交互结果给出检测结果,并自动生成可视化数据图表。

由于设备处于应用初期,规范数据库不足以确定准确的平均缺损 (mean deviation, MD) 或模式标准差 (pattern standard deviation, PSD),因此,本研究主要的准确性评价指标采用 MS,即将受检眼在每个点的光敏感度取平均值,可在一定程度上反映视网膜功能情况。结果显示受检眼在该设备检测得到的 MS 值与 HFA 相比,尽管较低,但仍具有相当的一致性 ($r_s=0.937$),提示该设备检测具有一定的准确性和有效性。但需要注意的是,通过 MS 来评估该系统可能具有局限性,这是由于不同设备刺激和背景亮度的不同、不同年龄段对设备的接受能力不同,其敏感度输出可能并不一定直接可比,导致测试结果可能存在选择偏倚。更准确的评估可能是通过 MD 或 PSD 等参数的直接比较^[9-10]。随着未来可视化数据的积累,借助人工智能 XR 交互核心算法技术,引入更多功能性视野参数,以便更好地提高疾病的诊断性能及预测分析能力。

关于可靠性分析,2 种设备测试的 FPR 及 FNR 差异均无统计学意义。但由于 XR VF 亮度有限,可能无法产生如 HFA 足够高的光强度刺激,可能不足以满足部分视野缺损严重的黄斑疾病患者的检测需要。此外,设备还可能受到硬件因素(如电池电量、设备温度等)影响,因此,FNR 在病情较重患者中的测试值较高,但总体上仍保持在合理范围内 ($\leq 20\%$)。

在测试时长方面,XR VF 与 HFA 的测试时间相似但在年轻或病情较轻的患者中使用 XR VF 的测试时长明显短于 HFA,这与 Stapelfeldt 等^[9]的报道结果相反,这可能归因于这类患者经过学习曲线后能更快地接受 XR VF 的测试环境,并做出适应性反应,或与设备测试算法及类型等差异有关。较短测试时间的一个潜在优势在于受试者疲劳效应降低。

关于设备的可接受性,本研究结果显示 92.6% 的受试者认为 XR VF 设备非常好用,比 HFA 更舒适,这之前报道的几款 VR 设备的使用可接受性结果一致^[8,11,13]。所不同的是,尽管这些报道中提到 VR 设备用于短时间视野测试不足以产生 HMD 相关的视觉问题^[13-14],但本课题组前期使用类似的 VR 设备进行视野测试时,仍有较多受试者抱怨有眩晕、易疲劳、闷热等不适感,体验感较该款 XR 设备明显不同。受试者普遍更愿意接受使用该 XR 设备进行测试,认为其更有趣、轻盈、实用,这主要由于该 XR 是基于 AR 的设计^[6]。相较 VR,该 XR 眼镜更注重轻便性(质量 < 100 g),用户与眼镜的互动更自然,极大地提升了使用的便携性与实际应用价值。

目前,有关可穿戴视野计应用的研究报道不多,仍缺乏大样本的随机对照研究。不同研究对其有效性和可靠性存在一定争议^[10],市面上也缺乏便捷的视野检查设备,且已有的大多是基于 VR 的设计。本研究显示该 XR 设备对黄斑疾病的视野功能检测有效,能够较准确地评价黄斑对光刺激的敏感度,定量检测绝对(相对)暗点的位置和大小。该设备最大的优势在于操作简单、可穿戴、可随时随地进行视野检查,避免了往返医院的不便。这种基于 XR 界面的沉浸性和互动性显著提高了患者的舒适度和参与度,且应用程序后台可通过远程实时指导患者检测过程,提高患者依从性,有利于临床医师更高效地发现和跟踪疾病进展,评估治疗效果,并制定和调整治疗计划,有望实现集疾病早期筛查、随访监测及主动预警于一体的慢病管理模式。但本研究为设备应用的初期阶段,样本量较小、观察时间不充分、评价指标不完善,且与传统视野计设备相比存在一定技术限制,例如背景和刺激亮度的范围受限、缺乏高级眼动追踪功能等,这些可能会影响视野评估的精确性和可靠性。虽然这种便携式设备目前可能不如传统大型高分辨率的视野计准确,但其具备采集大量实时数据的价值。实际上,居家场景所获取的更多数据与医院场景获取的少量高质量数据相比可能更具预测价值。下一步,将逐步扩大样本量和适应证,开展随机对照研究及重测变异性研究,更深入地探讨和验证设备的精确度和可靠性,并进一步提高设备的性能,如改进眼追踪功能、扩大亮度范围、改良 XR 交互核心算法技术、优化头戴设备人体工学等,以期为黄斑疾病患者的视觉健康管理提供一种更为便捷的创新技术手段。

综上,XRVF 与标准 HFA 在评估中心视野时表现出良好的一致性,证明 XR 视野计能够提供可靠、有效的视野功能评估结果,其在保证检测可靠性的同时,兼具便携性和良好的用户体验,展现出较好的临床推广应用潜力。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 袁静:研究设计、研究指导、论文撰写及定稿;王兴昌、孙锡全、焦辉广:设备制备和维护、数据收集、数据分析和解释;王倩、童艳霞、涂碧玥:研究设计、数据分析和解释;严茜茜、赵振、欧小杰、阿卜杜拉·萨伍提:实验操作和数据收集

参考文献

- [1] Xu T, Wang B, Liu H, et al. Prevalence and causes of vision loss in China from 1990 to 2019: findings from the Global Burden of Disease Study 2019[J/OL]. *Lancet Public Health*, 2020, 5(12): e682-e691 [2025-06-02]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33271081/>. DOI:10.1016/S2468-2667(20)30254-1.
- [2] Li R, Yang Z, Zhang Y, et al. Cost-effectiveness and cost-utility of traditional and telemedicine combined population-based age-related macular degeneration and diabetic retinopathy screening in rural and urban China[J]. *Lancet Reg Health West Pac*, 2022, 23: 100435. DOI:10.1016/j.lanwpc.2022.100435.
- [3] 国家卫生健康委. 国家卫生健康委关于印发“十四五”全国眼健康规划(2021-2025年)的通知[EB/OL]. (2022-01-11) [2025-06-01]. <https://www.nhc.gov.cn/yzygj/c100068/202201/1f1852aea23b4ca78e52ca9fdbfa20d4.shtml>.
- [4] 刘望,陈翀,许迅.《我国主要眼底病慢病管理专家共识》解读[J]. *中华眼底病杂志*, 2024, 40(5): 342-346. DOI:10.3760/cma.j.cn511434-20240328-00126.
- [5] Liu K, Chen C, Xu X. Interpretation of *National consensus on the management of major chronic fundus diseases in China: a modified Delphi approach*[J]. *Chin J Ocul Fundus Dis*, 2024, 40(5): 342-346. DOI:10.3760/cma.j.cn511434-20240328-00126.
- [6] Gao L, Wang C, Wu G. Wearable biosensor smart glasses based on augmented reality and eye tracking[J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(20): 6740. DOI:10.3390/s24206740.
- [7] Faizan Siddiqui M, Jabeen S, Alwazzan A, et al. Integration of augmented reality, virtual reality, and extended reality in healthcare and medical education: a glimpse into the emerging horizon in LMICs-a systematic review[J]. *J Med Educ Curric Dev*, 2025, 12: 23821205251342315. DOI:10.1177/23821205251342315.
- [8] 王倩,王兴昌,孙锡全,等.基于拓展现实的视觉障碍康复训练设备、系统及方法:202310320410.3[P]. 2023-03-29.
- [9] McLaughlin DE, Savatovsky EJ, O'Brien RC, et al. Reliability of visual field testing in a telehealth setting using a head-mounted device: a pilot study[J]. *J Glaucoma*, 2024, 33(1): 15-23. DOI:10.1097/IJG.0000000000002290.
- [10] Stapelfeldt J, Kucur SS, Huber N, et al. Virtual reality-based and conventional visual field examination comparison in healthy and glaucoma patients[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2021, 10(12): 10. DOI:10.1167/tvst.10.12.10.
- [11] Phu J, Wang H, Kalloniatis M. Comparing a head-mounted virtual reality perimeter and the Humphrey Field Analyzer for visual field testing in healthy and glaucoma patients[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2024, 44(1): 83-95. DOI:10.1111/opo.13229.
- [12] Hu GY, Prasad J, Chen DK, et al. Home monitoring of glaucoma using a home tonometer and a novel virtual reality visual field device: acceptability and feasibility[J]. *Ophthalmol Glaucoma*, 2023, 6(2): 121-128. DOI:10.1016/j.ogla.2022.05.001.
- [13] Hekmatjah N, Chibututu C, Han Y, et al. Virtual reality perimetry compared to standard automated perimetry in adults with glaucoma: a systematic review[J/OL]. *PLoS One*, 2025, 20(1): e0318074 [2025-06-02]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39854584/>. DOI:10.1371/journal.pone.0318074.
- [14] Lallouette A, Gillmann K. Patient comfort, acceptance, and tolerability of virtual reality (VR) headsets with real-time eye tracking for remote visual field testing[J/OL]. *J Clin Med*, 2025, 14(9): 3219 [2025-06-02]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39854584/>. DOI:10.3390/jcm14093219.
- [15] Yuan J, Mansouri B, Pettey HJ, et al. The visual effects associated with head-mounted displays[J]. *Int J Ophthalmol Clin Res*, 2018, 5(2): 85.

(收稿日期:2025-08-06 修回日期:2025-10-19)

(本文编辑:张宇 骆世平)

