

自适应光学视觉模拟器测量波前像差的重复性及与OPD-Scan III的一致性研究

王艳¹, 廖莹¹, 兰长骏^{2,3}, 李彪^{2,3}, 苗壮^{2,3}, 谭青青¹, 秦苏云¹, 黄欢¹

引用:王艳,廖莹,兰长骏,等. 自适应光学视觉模拟器测量波前像差的重复性及与OPD-Scan III的一致性研究. 国际眼科杂志, 2024,24(5):810-815.

基金项目:四川省医学科研课题项目(No. S21011);爱尔眼科医院集团临床研究所科研基金项目经费资助项目(No. AIG2306D01)
作者单位:¹(637000)中国四川省南充市,川北医学院附属医院眼科;²(610056)中国四川省成都市,成都东区爱尔眼科医院;³(610047)中国四川省成都市,成都高新区爱尔眼科研究所

作者简介:王艳,在读硕士研究生,研究方向:屈光性白内障与视觉质量。

通讯作者:兰长骏,硕士,主任医师,教授,硕士研究生导师,院长,研究方向:屈光性白内障手术与视觉质量. eyelanchangjun@163.com

收稿日期:2023-12-07 修回日期:2024-03-27

摘要

目的:评价自适应光学视觉模拟器(VAO)测量全眼高阶像差的重复性及与OPD-Scan III测量全眼高阶像差的一致性。

方法:采用横断面研究方法。纳入2023-08/09在成都东区爱尔眼科医院屈光科就诊的近视患者204例204眼(均取右眼数据)。由同一位操作熟练的检查者分别使用两种设备进行检查,使用VAO测量4.5 mm瞳孔直径下3-6阶的高阶像差,VAO和OPD-Scan III测量3-6 mm瞳孔直径下全眼总高阶像差(tHOA)、球差(SA)、彗差(Coma)和三叶草像差(Trefoil),评估VAO测量全眼像差的重复性及两种设备的一致性。

结果:VAO测量全眼的高阶像差均显示较高的重复性($0.767 \leq ICC \leq 0.941$, $S_w < 0.01 \mu\text{m}$, $TRT < 0.1 \mu\text{m}$)。4-6 mm瞳孔直径下VAO与OPD-Scan III的Coma测量值无差异($P > 0.05$),其余瞳孔直径下全眼总高阶像差的测量值均有差异(均 $P < 0.05$)。VAO与OPD-Scan III的3 mm瞳孔直径下各阶像差以及4、5 mm瞳孔直径下的SA、4 mm瞳孔直径下的Coma测量值的95%LoA < 0.1 ,显示一致性较好,其余瞳孔直径下的像差测量值的95%LoA > 0.1 ,显示一致性较差,两种设备3 mm($r = 0.218 - 0.317$, $P < 0.01$)、4 mm($r = 0.406 - 0.672$, $P < 0.01$)、5 mm($r = 0.538 - 0.839$, $P < 0.01$; $r = 0.030 - 0.109$, $P > 0.01$)以及6 mm($r = 0.369 - 0.766$, $P < 0.01$)瞳孔直径下高阶像差测量值差异较大。

结论:VAO测量3-6 mm瞳孔直径下全眼高阶像差结果时具有良好的重复性,但VAO与OPD-Scan III的3-6 mm瞳孔直径下的全眼高阶像差测量值存在差异性,一致性较差,临床应用不可互换。

关键词:自适应光学视觉模拟器;OPD-Scan III;波前像差;重复性;一致性

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2024.5.28

Repeatability of wavefront aberration measured by adaptive optics visual simulator and agreement of OPD-Scan III

Wang Yan¹, Liao Xuan¹, Lan Changjun^{2,3}, Li Biao^{2,3}, Miao Zhuang^{2,3}, Tan Qingqing¹, Qin Suyun¹, Huang Huan¹

Foundation item: Medical Research Project of Sichuan Province (No. S21011); Clinic Research Foundation of Aier Eye Hospital Group (No. AIG2306D01)

¹Department of Ophthalmology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan Province, China;

²Aier Eye Hospital (East of Chengdu), Chengdu 610056, Sichuan Province, China; ³Aier Eye Institute in Chengdu High-tech Zone, Chengdu 610047, Sichuan Province, China

Correspondence to: Lan Changjun. Aier Eye Hospital (East of Chengdu), Chengdu 610056, Sichuan Province, China; Aier Eye Institute in Chengdu High-tech Zone, Chengdu 610047, Sichuan Province, China. eyelanchangjun@163.com

Received:2023-12-07 Accepted:2024-03-27

Abstract

• **AIM:** To assess the repeatability and agreement of higher-order aberration obtained by adaptive optics visual simulator (VAO) compared with OPD-Scan III.

• **METHODS:** A cross-sectional study was conducted from August to September 2023, including a total of 204 patients (204 eyes) with myopia whose right eyes were measured. The examinations were performed by the same skilled examiner using both devices separately. The VAO device was used to measure higher order aberrations of orders 3 to 6 at a pupil diameter of 4.5 mm, while both the VAO and OPD-Scan III devices were utilized to measure total higher-order aberration (tHOA), spherical aberration (SA), coma aberration (Coma), and trefoil aberration (Trefoil) of the entire eye at pupil diameters ranging from 3 to 6 mm. Furthermore, the repeatability of whole eye aberration measurements obtained with the VAO device was evaluated and the agreement of the two devices was assessed.

• **RESULTS:** The whole-eye higher-order aberrations measured by VAO demonstrated excellent repeatability ($0.767 \leq ICC \leq 0.941$, $S_w < 0.01 \mu\text{m}$, $TRT < 0.1 \mu\text{m}$). There was no statistically significant difference in Coma

measured by VAO or OPD-Scan III for pupil diameters ranging from 4 to 6 mm ($P>0.05$), while a statistically significant difference was observed in whole-eye tHOA of other pupil diameters (all $P<0.05$). The agreement of aberration measurements for each order between VAO and OPD-Scan III for 3 mm pupil diameters, SA at 4 and 5 mm pupil diameter and Coma at 4 mm pupil diameter showed a 95% limit of agreement (LoA) <0.1 , indicating good agreement; however, poor agreement was found for the remaining aberration measurements at different pupil diameters, with a 95% LoA >0.1 , and there were significant differences in higher-order aberrations measured by two devices under a pupil diameter of 3 mm ($r=0.218-0.317$, $P<0.01$), 4 mm ($r=0.406-0.672$, $P<0.01$), 5 mm ($r=0.538-0.839$, $P<0.01$ and $r=0.030-0.109$, $P>0.01$) and 6 mm ($r=0.369-0.766$, $P<0.01$).

• CONCLUSION: The VAO demonstrates favorable repeatability when assessing whole-eye higher order aberration under pupil diameters of 3-6 mm. However, there is inadequate agreement and interchangeability in whole-eye higher order aberration at 3-6 mm pupil diameter between VAO and OPD-Scan III for clinical purposes.

• KEYWORDS: adaptive optics visual simulator; OPD-Scan III; wavefront aberration; repeatability; agreement

Citation: Wang Y, Liao X, Lan CJ, et al. Repeatability of wavefront aberration measured by adaptive optics visual simulator and agreement of OPD-Scan III. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2024,24(5):810-815.

0 引言

人眼波前像差包括低阶像差(离焦、散光)和高阶像差。高阶像差源于人眼本身光学系统微小不规则或缺陷,无法用框架眼镜矫正^[1]。目前高阶像差的测量已在临床上用于波前像差引导个性化准分子激光手术、功能性人工晶状体植入手术、视觉质量评价和接触镜验配等方面^[2-5]。波前像差的测量设备主要以客观测量为主,主要包括 Hartmann-Shack 原理、光路追迹 Ray-tracing 原理、Tscherning 原理和视网膜检影镜双程技术原理等。自适应光学技术(adaptive optics, AO)^[6]能够实时测量和校正波前像差,使光学系统能适应外界条件变化,保持良好光学性能,在眼科领域逐渐受到关注,该技术可以根据波前像差进行主客观验光、消除人眼像差对视网膜成像的影响使眼底检查设备清晰度更高、为视神经功能评价提供更精准的数据、改善视知觉学习训练的效果、模拟和预测术后视觉效果等^[7]。本研究评价的自适应光学视觉模拟器(adaptive optics visual simulator, VAO)^[8]采用 Hartmann-Shack 原理测量波前像差,可测得 3-6 mm 瞳孔直径下的全眼 3-6 阶像差值,并通过测得的像差数据转换为客观验光度数,同时结合自适应光学技术^[9]进行球镜或柱镜的转换实现客观验光与主观验光一体化。VAO 不仅用于校正离焦和散光,还可以校正和/或诱导所有光学像差,因此

可以针对不同的视觉任务和条件优化光学校正^[10],同时解释夜间近视^[11]的可能原因以及球差和色差对视觉质量的综合影响^[12]。前期我们比较 VAO 主客观验光与传统验光,结果显示具有较好一致性,测量差值可以接受^[13]。目前该设备还没有进入国内临床,相关研究也很少,需要评价其重复性。OPD-Scan III 视觉质量分析仪采用视网膜检影镜双程技术原理和 Placido 盘原理的组合,可以测量全眼、角膜、眼内的像差、客观验光值、角膜曲率值、角膜地形图、Kappa 角和 Alpha 角等数值,目前已广泛应用于临床。本研究通过 3 次重复测量评价 VAO 测量波前像差的重复性以及比较 VAO 与 OPD-Scan III 测量全眼像差值的一致性,以评估 VAO 测量波前像差应用于临床的可行性。

1 对象和方法

1.1 对象 采用横断面研究方法,纳入 2023-08/09 在成都东区爱尔眼科医院屈光科就诊的近视患者 204 例 204 眼(均取右眼数据)。纳入标准:(1)等效球镜度 ≤ -9.00 D,柱镜度数 ≤ -5.00 D,最佳矫正视力(LogMAR 视力)优于 0;(2)泪膜功能正常,认知能力正常,能积极配合检查者;(3)4 wk 内未戴硬性接触镜,2 wk 内未戴软性接触镜;(4)测量前未进行过眼部创伤性检查;(5)无眼部手术和外伤史。排除标准:(1)角结膜病变者(如圆锥角膜、角膜瘢痕、翼状胬肉等);(2)葡萄膜炎、青光眼病史者;(3)晶状体混浊、眼底黄斑和视网膜病变者。本研究遵循《赫尔辛基宣言》,本研究方案经成都东区爱尔眼科医院伦理委员会批准(No.DQAIER202308006),所有患者纳入研究前均签署知情同意书。

1.2 方法 检查前用 0.5%复方托吡卡胺滴眼液将双眼散瞳至 ≥ 7 mm,由同一位检查者在同一间检查室在暗室条件下首先利用 VAO 进行全眼像差测量,采用快速模式进行像差测量,患者瞬目数次后充分睁眼暴露角膜,注视探测头内视标,检查者调整 VAO 使其对准受检眼,待屏幕上出现的 Hartmann-Shack 图像各点均清晰可见且角膜反射最小化时进行测量,测量 3 次后屏幕显示全眼像差的平均值,保存患者全眼像差数据。若测量结果显示包含错误点,表明结果不可靠,需重新测量。随后同一条件下,采用 OPD-Scan III 测量患者的波前像差值,嘱患者瞬目数次后充分睁眼注视固视目标,检查者操作使屏幕上的交叉点位于瞳孔中心并调整焦距,使显示器上的 Placido 盘同心环影像清晰,自动采集 3 次生成客观验光数据及全眼像差数值,再嘱患者瞬目充分睁眼,图像清晰时再次采集角膜地形图生成角膜像差数值。记录瞳孔直径为 3、4、5 和 6 mm 的全眼像差值。若结果显示 Placido 环数低于 20 环说明角膜未暴露完全,需重新测量。

统计学分析:采用 SPSS 27.0 软件进行数据统计和分析。参数的分布情况应用 Kolmogorov-Smirnov 检验,所有测量参数 $P>0.05$,提示符合正态分布,计数资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示。采用组内标准差(within-subject standard deviation, Sw)、组内相关系数(intraclass correlation coefficients, ICC,越接近 1,重复性越高^[14])和重测重复性(test-retest repeatability, TRT)综合分析重复性。TRT 又名重复性限(repeatability limits),定义为 $1.96\sqrt{2}Sw$ 即 $2.77Sw$,数值越

小,重复性越高^[15]。采用配对样本 *t* 检验、Pearson 相关系数($0 \leq r < 0.3$ 为弱相关, $0.3 \leq r < 0.8$ 为中等相关, $0.8 \leq r < 1.0$ 为强相关, $r = 1.0$ 为完全相关)、Bland-Altman 散点图、95%一致性界限(95% limits of agreement, 95% LoA) 综合分析两种设备的一致性。95%LoA 定义为 $MD \pm 1.96SD$, 小于 $0.1 \mu m$ 为临床可接受,范围越窄,一致性越好^[16-17]。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 纳入患者一般资料 本研究共纳入近视患者 204 例 204 眼(为避免双眼同源性的影响,双眼患者均取右眼数据进行比较),其中男 101 例,女 103 例;年龄 18-41(平均 25.34 ± 16.32) 岁;球镜度数 $-0.75 - -9.00$ (平均 -4.65 ± 1.65) D;柱镜度数 $0 - -4.75$ (平均 -1.06 ± 0.79) D。

2.2 VAO 测量全眼高阶像差的重复性 VAO 测量的 4.5 mm 瞳孔直径下全眼高阶像差均具有良好的重复性, ICC 均大于 0.76, 其中 4.5 mm 瞳孔直径下球差(SA)的 ICC 大于 0.9。 S_w 与 TRT 均小于 $0.01 \mu m$ (表 1)。

2.3 VAO 与 OPD-Scan III 测量不同瞳孔直径下全眼高阶像差的一致性 VAO 和 OPD-Scan III 在 3-6 mm 瞳孔直径下测量全眼的总高阶像差(tHOA)、SA 和三叶草像差(Trefoil)值,差异均有统计学意义($P < 0.05$), 3 mm 瞳孔直径下测量的彗差(Coma)值,差异均有统计学意义($P <$

0.05), 4-6 mm 瞳孔直径下测量的 Coma 值,差异无统计学意义($P > 0.05$)。3-6 mm 瞳孔直径下两种设备之间全眼高阶像差测量值均具有相关性($P < 0.01$),但相关程度有一定差异(表 2)。

3 mm 瞳孔直径下,全眼高阶像差测量值的 95% LoA 范围均较窄,小于 $0.1 \mu m$, 显示一致性较好。Bland-Altman 散点图,分别有 4.4% (9/204)、3.4% (7/204)、3.9% (8/204)、3.4% (7/204) 位于 95% LoA 以外(图 1)。4 mm 瞳孔直径下,全眼高阶像差测量值 SA、Coma 的 95% LoA 范围较窄,小于 $0.1 \mu m$, 显示一致性较好,tHOA、Trefoil 的 95% LoA 范围较宽,大于 $0.1 \mu m$, 显示一致性较差。Bland-Altman 散点图,分别有 3.4% (7/204)、3.4% (7/204)、4.9% (10/204)、2.9% (6/204) 位于 95% LoA 以外(图 2)。5 mm 瞳孔直径下,全眼高阶像差测量值的 95% LoA 范围除 SA 以外均较宽,大于 $0.1 \mu m$, 显示一致性较差。Bland-Altman 散点图,分别有 4.9% (10/204)、4.4% (9/204)、5.3% (11/204)、3.9% (8/204)、位于 95% LoA 以外(图 3)。6 mm 瞳孔直径下,全眼高阶像差测量值的 95% LoA 范围均较宽,大于 $0.1 \mu m$, 显示一致性较差。Bland-Altman 散点图,分别有 4.9% (10/204)、5.3% (11/204)、4.9% (10/204)、5.8% (12/204) 位于 95% LoA 以外(图 4)。

表 1 VAO 测量全眼高阶像差及重复性

高阶像差	PD(mm)	$\bar{x} \pm s (\mu m)$	ICC	95% ICC	$S_w (\mu m)$	TRT (μm)
tHOA	4.5	0.185 ± 0.062	0.824	0.778-0.862	0.002	0.00554
SA	4.5	0.057 ± 0.045	0.941	0.926-0.955	0.000	0
Coma	4.5	0.087 ± 0.057	0.868	0.833-0.897	0.001	0.00277
Trefoil	4.5	0.09 ± 0.051	0.767	0.706-0.818	0.001	0.00277

注:PD:瞳孔直径;tHOA:总高阶像差;SA:四阶球差;Coma:彗差;Trefoil:三叶草像差; S_w :组内标准差;TRT:重测信度;ICC:组内相关系数。

表 2 3-6 mm 瞳孔直径下 VAO 与 OPD-Scan III 测量全眼高阶像差一致性

高阶像差	PD(mm)	$\bar{x} \pm s (\mu m)$		Mean Difference $\pm SD (\mu m)$	95% LoA (μm)	配对样本 <i>t</i> 检验		Pearson 相关性	
		VAO	OPD-Scan III			<i>t</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
tHOA	3	0.096 ± 0.032	0.082 ± 0.039	0.013 ± 0.043	-0.072-0.097	4.198	<0.01	0.266	<0.01
	4	0.128 ± 0.040	0.150 ± 0.061	-0.022 ± 0.058	-0.135-0.092	-5.349	<0.01	0.406	<0.01
	5	0.214 ± 0.068	0.253 ± 0.093	-0.039 ± 0.081	-0.197-0.119	-6.896	<0.01	0.538	<0.01
	6	0.368 ± 0.119	0.400 ± 0.131	-0.032 ± 0.131	-0.289-0.225	-3.483	<0.01	0.454	<0.01
SA	3	0.016 ± 0.020	0.004 ± 0.011	0.012 ± 0.020	-0.026-0.051	8.94	<0.01	0.317	<0.01
	4	0.038 ± 0.031	0.016 ± 0.029	0.022 ± 0.024	-0.026-0.069	12.78	<0.01	0.672	<0.01
	5	0.081 ± 0.063	0.052 ± 0.058	0.029 ± 0.035	-0.039-0.097	11.967	<0.01	0.839	<0.01
	6	0.158 ± 0.132	0.120 ± 0.116	0.039 ± 0.086	-0.131-0.208	6.363	<0.01	0.766	<0.01
Coma	3	0.037 ± 0.022	0.024 ± 0.015	0.013 ± 0.024	-0.033-0.059	7.751	<0.01	0.229	<0.01
	4	0.058 ± 0.039	0.056 ± 0.037	0.002 ± 0.040	-0.076-0.080	0.774	0.44	0.446	<0.01
	5	0.112 ± 0.079	0.109 ± 0.072	0.003 ± 0.101	-0.196-0.201	0.363	0.717	0.109	0.121
	6	0.185 ± 0.116	0.186 ± 0.118	-0.001 ± 0.132	-0.259-0.256	-0.141	0.888	0.369	<0.01
Trefoil	3	0.040 ± 0.023	0.061 ± 0.037	-0.022 ± 0.039	-0.098-0.055	-7.849	<0.01	0.218	<0.01
	4	0.065 ± 0.035	0.111 ± 0.062	-0.047 ± 0.057	-0.158-0.064	-11.741	<0.01	0.436	<0.01
	5	0.111 ± 0.0615	0.176 ± 0.094	-0.065 ± 0.111	-0.283-0.153	-8.374	<0.01	0.030	0.669
	6	0.166 ± 0.090	0.249 ± 0.131	-0.083 ± 0.119	-0.316-0.151	-9.882	<0.01	0.470	<0.01

注:PD:瞳孔直径;tHOA:总高阶像差;SA:四阶球差;Coma:彗差;Trefoil:三叶草像差;95% LoA:一致性界限,95% LoA = $MD \pm 1.96SD$; *r*:Pearson 相关系数。

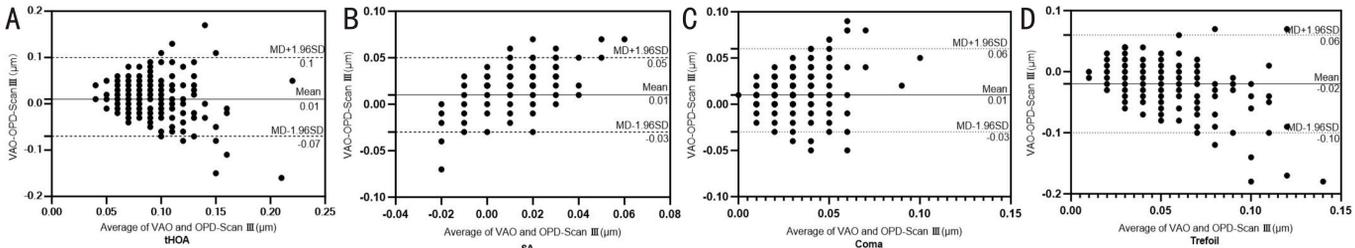


图 1 3 mm 瞳孔直径下两台设备测量全眼高阶像差的 Bland-Altman 散点图 A: tHOA; B: SA; C: Coma; D: Trefoil。

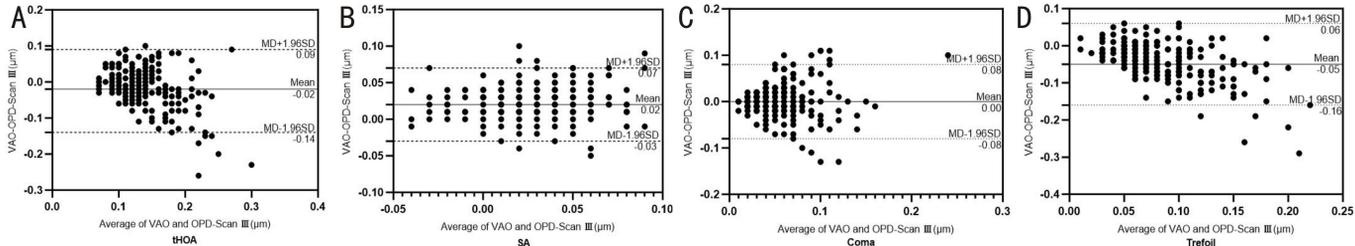


图 2 4 mm 瞳孔直径下两台设备测量全眼高阶像差的 Bland-Altman 散点图 A: tHOA; B: SA; C: Coma; D: Trefoil。

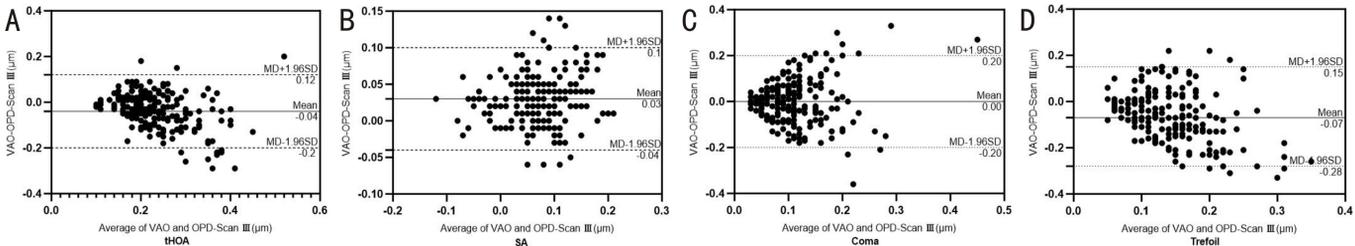


图 3 5 mm 瞳孔直径下两台设备测量全眼高阶像差的 Bland-Altman 散点图 A: tHOA; B: SA; C: Coma; D: Trefoil。

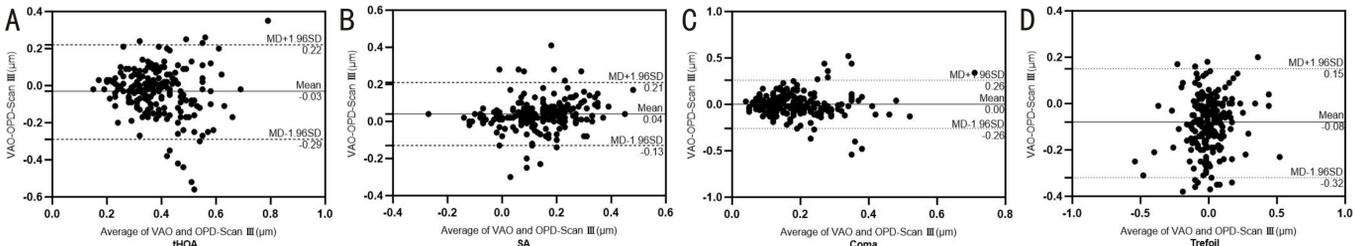


图 4 6 mm 瞳孔直径下两台设备测量全眼高阶像差的 Bland-Altman 散点图 A: tHOA; B: SA; C: Coma; D: Trefoil。

3 讨论

人眼独特的波前像差轮廓是定义该眼所达到的视觉质量的重要因素^[18]。波前像差的减少改善了眼球的光学质量,改善了在视网膜上形成的图像的对比度,从而改善了空间视觉^[19]。近年来,在视觉科学和眼科学领域,通过减少高阶眼波前像差(散光和离焦以外的像差)来提高视觉性能受到了极大的关注^[20]。在本研究中,评价了基于 Hartmann-Shack 传感器的新型仪器自适应光学视觉模拟器(VAO)测量全眼高阶像差的可重复性,结果显示有良好的重复性,而 VAO 与 OPD-Scan III 波前像差仪测量全眼高阶像差的一致性较差。

本研究中 VAO 测量全眼高阶像差的重复性,数据显示 ICC 均大于 0.76,其中 4.5 mm 瞳孔直径下 SA 的 ICC 大于 0.9, S_w 与 TRT 均小于 0.01 μm ,表示有较高的重复性,与先前 VAO 测量正常眼^[21]以及圆锥角膜^[22]全眼高阶像差有相似的研究结果。另外本研究中 VAO 测量的全眼高阶像差均为近视患者,先前鲜有报道,根据本研究以及以

往研究表明 VAO 测量正常眼、近视眼以及圆锥角膜全眼高阶像差均具有良好重复性。

本研究中 VAO 与 OPD-Scan III 在 3-6 mm 瞳孔直径下测量的全眼 tHOA、SA、Trefoil 值,差异有统计学意义 ($P < 0.05$),4-6 mm 瞳孔直径下 Coma 值差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。VAO 与 OPD-Scan III 测量在 3 mm 瞳孔直径下全眼高阶像差测量值的 95%LoA 较窄,小于 0.1 μm ,显示一致性较好,4-6 mm 瞳孔直径下全眼高阶像差测量值(除 4-5 mm 的 SA、4 mm 的 Coma)的 95%LoA 较宽,大于 0.1 μm ,显示一致性较差。VAO 与 OPD-Scan III 全眼高阶像差测量值 ICC 相关系数除 5 mm 瞳孔直径下 Coma、Trefoil 以外,其余均具有显著相关性 ($P < 0.01$)。Wan 等^[23]研究中 Pentacam AXL Wave (Hartmann-Shack 原理)和 OPD-Scan III 设备间全眼高阶像差测量值一致性较差,并且即使测量值存在一致的偏差,设备之间的比较也可以显著相关。Visser 等^[24]研究中 Irx3、Keratron (Hartmann-Shack 原理)和 OPD-Scan 在 5 mm 瞳孔直径

下均显示出所有总眼部像差的显著相关性($P<0.01$),总眼高阶像差显示,三叶草像差 $Z(3, -3)$ 和球差 $Z(4, 0)$ 存在显著差异($P<0.001$)且高阶像差的 95% LoA 相对较宽。Cerviño 等^[25]采用 Hartmann-Shack 原理像差仪和自动视网膜检影法原理的像差仪测量正常人群高阶像差结果中显示垂直三叶草像差、彗差、球差等差异具有统计学意义($P<0.05$)。以上 Hartmann-Shack 原理与自动视网膜检影法原理的像差仪的一致性研究结果与本研究一致。邹华鲜等^[26]对于 OPD-Scan III 与其他 Hartmann-Shack 原理的像差仪进行了测量角膜像差的一致性比较,本研究对基于 Hartmann-Shack 原理的 VAO 与 OPD-Scan III 测量全眼像差的一致性进行了对比分析,此前无相关研究。

与以往研究不同的是本研究中瞳孔均为散大状态测得,不同瞳孔大小的像差值均为真实,无需进行算法推算,避免了推算及调节^[27-28]引起的像差测量误差,但检查过程中,眼球轻微运动、泪膜的不稳定都会引起像差测量误差,其中泪膜的不稳定对 OPD-Scan III 的影响更大^[29]。另外本研究中两台设备一致性较差可能有多种原因导致:(1)VAO 采用 Hartmann-Shack 原理光源波长为 780 nm, OPD-Scan III 采用视网膜检影镜双程技术原理光源波长为 880 nm,不同单色波长引起不同的纵向色差^[30],所以不同单色波长也可能导致一致性差;(2)两台设备测量像差原理完全不同、采样点数也不同也会导致一致性差。另外,数学计算、传感器架构、每个像差仪采用的波前分解算法的差异以及用于定位主光线的算法的差异每个小透镜图像或瞳孔中心都可能进一步导致测量结果的差异^[31];(3)测量值随时间的变化可能不仅归因于仪器及其精度,还归因于从视网膜反射的光特性的变化以及测量期间眼睛中发生的变化。综上所述人眼像差是动态的,调节的波动、泪膜的不稳定性和眼睛的固视微运动以及像差仪本身设计不同等原因会直接影响其测量结果,所以两种设备测量像差结果存在差异性的原因较多。

VAO 是一种非侵入性工具,用于评估理论眼波前面对视觉性能的影响,该模拟器包括一个 Hartmann-Shack 波前传感器^[8]来测量眼球的像差,一个主动元件来操纵这个波前像差,和视觉测试路径,以确定结果的空间视觉^[32]。相比较于 OPD-Scan III 对于视觉质量相关方面的评价 VAO 也有些不足,如不能提供角膜和眼内波前像差、未提供 Kappa 角、Alpha 角具体数值等^[33-34]。这些方面可以加以改进,使该设备在临床应用的范围更广。最后,本次研究也有其局限性,由于受限于传感器的探测精度和变形镜的校正能力,VAO 尚无法测量以及后续矫正全部的波前像差,残余像差仍然会影响测量和后续矫正结果。另外,本研究纳入成年近视患者作为研究对象,后期准备进一步评估圆锥角膜或屈光手术后等角膜疾病两设备测量像差的一致性。

本研究在国内首次对 VAO 的全眼像差测量功能进行了全面评价,研究结果表明 VAO 测量全眼高阶像差具有良好的重复性,可作为临床像差的测量以及下一步视觉模拟;VAO 与 OPD-Scan III 波前像差仪测量全眼高阶像差一致性较差,临床中不可互相替代,关于 VAO 其他功能的评价仍需进一步探索。

参考文献

- [1] Ancora D, Furieri T, Bonora S, et al. Spinning pupil aberration measurement for anisoplanatic deconvolution. *Opt Lett*, 2021,46(12):2884-2887.
- [2] Song J, Cao H, Chen X, et al. Small Incision Lenticule Extraction (SMILE) Versus Laser Assisted Stromal In Situ. *Am J Ophthalmol*, 2023,247:181-199.
- [3] Auffarth GU, Gerl M, Tsai L, et al. Clinical evaluation of a new monofocal IOL with enhanced intermediate function in patients with cataract. *J Cataract Refract Surg*, 2021,47(2):184-191.
- [4] Tan QQ, Wen BW, Liao X, et al. Optical quality in low astigmatic eyes with or without cylindrical correction. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2020,258(2):451-458.
- [5] Nti AN, Berntsen DA. Optical changes and visual performance with orthokeratology. *Clin Exp Optom*, 2020,103(1):44-54.
- [6] 钱玖林, 廖莹, 兰长骏. 自适应光学技术在眼科的应用进展. *中华实验眼科杂志*, 2022,40(3):284-288.
- [7] 钱玖林, 廖莹, 唐玉玲, 等. 非球面人工晶状体偏心和倾斜以及视觉质量的对比研究. *中华眼科杂志*, 2022,58(7):521-528.
- [8] Fernández EJ, Manzanera S, Piers P, et al. Adaptive optics visual simulator. *J Refract Surg*, 2002,18(5):S634-S638.
- [9] Saleh M. Optique adaptative pour l'ophtalmologie. *J Fran Ophthalmol*, 2016,39(4):380-386.
- [10] Prieto P, Fernández E, Manzanera S, et al. Adaptive optics with a programmable phase modulator: applications in the human eye. *Opt Express*, 2004,12(17):4059-4071.
- [11] Artal P, Schwarz C, Cánovas C, et al. Night myopia studied with an adaptive optics visual analyzer. *PLoS One*, 2012,7(7):e40239.
- [12] Schwarz C, Cánovas C, Manzanera S, et al. Binocular visual acuity for the correction of spherical aberration in polychromatic and monochromatic light. *J Vis*, 2014,14(2):8.
- [13] 周桂梅, 谭青青, 廖莹, 等. 自适应光学视觉模拟仪验光与传统验光的一致性研究. *中华实验眼科杂志*, 2022,40(3):241-246.
- [14] Carkeet A. Comment on: statistical methods for conducting agreement (comparison of clinical tests) and precision (repeatability or reproducibility) studies in optometry and ophthalmology. *Ophthalmic Physiologic Optic*, 2015,35(3):345-346.
- [15] López-Miguel A, Martínez-Almeida L, González-García MJ, et al. Precision of higher-order aberration measurements with a new Placido-disk topographer and Hartmann-Shack wavefront sensor. *J Cataract Refract Surg*, 2013,39(2):242-249.
- [16] Xu ZQ, Hua YJ, Qiu W, et al. Precision and agreement of higher order aberrations measured with ray tracing and Hartmann-Shack aberrometers. *BMC Ophthalmol*, 2018,18(1):18.
- [17] Durán JA, Gutiérrez E, Atienza R, et al. Vector analysis of astigmatic changes and optical quality outcomes after wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis using a high-resolution aberrometer. *J Cataract Refract Surg*, 2017,43(12):1515-1522.
- [18] Borkenstein AF, Borkenstein EM, Luedtke H, et al. Impact of decentration and tilt on spherical, aberration correcting, and specific aspherical intraocular lenses: an optical bench analysis. *Ophthalmic Res*, 2022,65(4):425-436.
- [19] Vincent M, Marin G, Legras R. Effect of simulated and real spherical and astigmatism defocus on visual acuity and image quality score. *Optom Vis Sci*, 2020,97(1):36-44.
- [20] Jaisankar D, Suheimat M, Rosén R, et al. Defocused contrast sensitivity function in peripheral vision. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2022,42(2):384-392.
- [21] Otero C, Vilaseca M, Arjona M, et al. Repeatability of

aberrometric measurements with a new instrument for vision analysis based on adaptive optics. *J Refract Surg*, 2015,31(3):188-194.

[22] Shetty R, Kochar S, Grover T, et al. Repeatability of a commercially available adaptive optics visual simulator and aberrometer in normal and keratoconic eyes. *J Refract Surg*, 2017,33(11):769-772.

[23] Wan KH, Liao XL, Yu M, et al. Wavefront aberrometry repeatability and agreement – a comparison between Pentacam AXL Wave, iTrace and OPD-Scan III. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2022,42(6):1326-1337.

[24] Visser N, Berendschot TTJM, Verbakel F, et al. Evaluation of the comparability and repeatability of four wavefront aberrometers. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2011,52(3):1302-1311.

[25] Cerviño A, Hosking SL, Montés-Micó R. Comparison of higher order aberrations measured by NIDEK OPD-Scan dynamic skiascopy and Zeiss WASCAs Hartmann-Shack aberrometers. *J Refract Surg*, 2008,24(8):790-796.

[26] 邹华鲜, 陈琦, 李丽丽, 等. 三种波前像差仪测量成年近视患者角膜高阶像差的一致性. *国际眼科杂志*, 2023, 23(10):1723-1731.

[27] Shetty N, Kochar S, Paritekar P, et al. Patient – specific determination of change in ocular spherical aberration to improve near and intermediate visual acuity of presbyopic eyes. *J Biophotonics*, 2019,

12(4):e201800259.

[28] Fernández J, Rodríguez-Vallejo M, Burguera N, et al. Spherical aberration for expanding depth of focus. *J Cataract Refract Surg*, 2021,47(12):1587-1595.

[29] Gao YF, Liu RJ, Liu YY, et al. Optical quality in patients with dry eye before and after treatment. *Clin Exp Optom*, 2021,104(1):101-106.

[30] Łabuz G, Yan WJ, Baur ID, et al. Chromatic aberration and spectral dependency of extended – range – of – vision intraocular lens technology. *Sci Rep*, 2023,13(1):14781.

[31] Rodríguez P, Navarro R, González L, et al. Accuracy and reproducibility of Zywave, Tracey, and experimental aberrometers. *J Refract Surg*, 2004,20(6):810-817.

[32] Piers PA, Manzanera S, Prieto PM, et al. Use of adaptive optics to determine the optimal ocular spherical aberration. *J Cataract Refract Surg*, 2007,33(10):1721-1726.

[33] 赵抒羽, 何锦贤, 吴燕纯, 等. OPD-Scan III 型像差分析仪评估高度近视合并白内障患者植入三焦点 IOL 术后视觉质量. *国际眼科杂志*, 2022,22(2):318-321.

[34] Liu RJ, Ma BK, Gao YF, et al. Evaluations of wavefront aberrations and corneal surface regularity in dry eye patients measured with OPD Scan III. *Int J Ophthalmol*, 2022,15(3):407-412.