

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

邹华鲜¹, 陈琦², 李丽丽², 韦蝶凤², 毛合娟², 黄燕燕², 陆鹏飞², 钟海彬³

引用: 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

基金项目: 广西科技计划项目 (No. 桂科 AD19245193)

作者单位: ¹(541199) 中国广西壮族自治区桂林市, 桂林医学院; (530021) 中国广西壮族自治区南宁市, 广西壮族自治区人民医院² 视光科; ³眼科

作者简介: 邹华鲜, 在读硕士研究生, 研究方向: 眼视光学。

通讯作者: 钟海彬, 毕业于华中科技大学, 硕士, 主任医师, 硕士研究生导师, 研究方向: 眼底病的临床诊治. guixizhong@126.com

收稿日期: 2023-06-06 修回日期: 2023-08-24

摘要

目的: 评估 Topcon KR-1W、i.Profiler、OPD-Scan III 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。

方法: 前瞻性临床研究。收集 2022-06/08 在广西壮族自治区人民医院视光中心就诊的成年近视患者 92 例 92 眼, 分别采用 Topcon KR-1W、i.Profiler、OPD-Scan III 测量 4、6mm 瞳孔直径下角膜三、四阶像差, 评估三种波前像差仪的差异性和一致性。

结果: 三种像差仪 6mm 瞳孔直径下测量值均高于 4mm 瞳孔直径下测量值。4mm 瞳孔直径下三种像差仪 Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} 测量值均无差异 ($P>0.05$), 其余测量值均有差异 ($P<0.05$); 6mm 瞳孔直径下三种像差仪测量值均有差异 ($P<0.05$)。4mm 瞳孔直径下三阶像差测量值、6mm 瞳孔直径下三、四阶像差 (除 Z_4^{-2}) 测量值的 95%LoA $>0.1\mu\text{m}$, 一致性相关系数 $P_c<0.90$, 显示一致性较差。三种像差仪 4、6mm 瞳孔直径下角膜高阶像差测量值相关性差异较大 ($r_{4\text{mm}}=0.215\sim0.805$, $P_{4\text{mm}}<0.05$; $r_{6\text{mm}}=0.561\sim0.916$, $P_{6\text{mm}}<0.001$)。

结论: Topcon KR-1W、i.Profiler 与 OPD-Scan III 测量 4、6mm 瞳孔直径下角膜三、四阶像差时测量结果存在差异性, 一致性较差, 临床应用中三种像差仪不可相互替代。

关键词: Topcon KR-1W; i.Profiler; OPD-Scan III; 角膜像差; 一致性

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2023.10.23

Agreement of corneal high - order aberrations measured by three wavefront aberrometers in myopic adults

Hua-Xian Zou¹, Qi Chen², Li-Li Li², Die-Feng Wei², He-Juan Mao², Yan-Yan Huang², Peng-Fei Lu², Hai-Bin Zhong³

Foundation item: Guangxi Science and Technology Project (No. GuiKeAD19245193)

¹Guilin Medical University, Guilin 541199, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China; ²Department of Optometry; ³Department of Ophthalmology, the People's Hospital of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530021, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China

Correspondence to: Hai-Bin Zhong. Department of Ophthalmology, the People's Hospital of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530021, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China. guixizhong@126.com

Received: 2023-06-06 Accepted: 2023-08-24

Abstract

• AIM: To evaluate the agreement of corneal high - order aberrations from Topcon KR - 1W, i.Profiler and OPD - Scan III wavefront aberrometers in myopic adults.

• METHODS: A prospective clinical study. A total of 92 adult patients (92 eyes) with myopia in the department of optometry, the People's Hospital of Guangxi Zhuang Autonomous Region from June to August 2022 were enrolled. The third - order and fourth - order corneal aberrations at the pupil diameter of 4 and 6mm were measured by Topcon KR - 1W, i.Profiler, and OPD - Scan III, respectively. The difference and agreement of the three aberrometers were evaluated.

• RESULTS: The measurements at 6mm pupil diameter were all greater than those at 4mm pupil diameter. Although there were no statistical differences in the measurements of Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} by the three aberrometers at 4 pupil diameter ($P>0.05$), there were statistical differences in other measurements ($P<0.05$). The aberration results measured by the three aberrometers were statistically different at the 6mm pupil diameter ($P<0.05$). The 95% limit of agreement (95%LoA) of the measurements of higher - order aberration, including the third - order aberrations at 4mm pupil diameter and the third - order and fourth - order aberrations at 6mm pupil diameter (except for the Z_4^{-2}) were greater than $0.1\mu\text{m}$. The concordance correlation coefficient (P_c) was lower than 0.90, indicating a poor consistency. The correlation coefficients of corneal higher - order aberrations were significantly different among the three aberrometers at 4 and 6mm pupil diameter ($r_{4\text{mm}}=0.215\sim0.805$, $P_{4\text{mm}}<0.05$; $r_{6\text{mm}}=0.561\sim0.916$, $P_{6\text{mm}}<0.001$).

• CONCLUSION: There were significant differences in the measurements of the third - and fourth - order corneal aberrations at 4 and 6mm pupil diameter among Topcon KR - 1W, i.Profiler, and OPD - Scan III, and the agreements were poor, so they are not interchangeably in clinical applications.

• KEYWORDS: Topcon KR - 1W; i.Profiler; OPD - Scan III; corneal aberration; agreement

Citation: Zou HX, Chen Q, Li LL, *et al.* Agreement of corneal high-order aberrations measured by three wavefront aberrometers in myopic adults. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2023; 23 (10): 1723-1731

0 引言

波前像差包括低阶像差和高阶像差,影响视觉成像质量的高阶像差主要为三、四阶像差,主要来源于角膜和晶状体,其中角膜像差占人眼总像差的80%,是影响视网膜成像的主要因素^[1-2]。波前像差测量技术不断进步和发展,对了解人眼的光学特性、成像质量和矫正高阶像差改善视觉质量具有重要意义,如手术前后视觉质量评估^[3]、屈光手术类型选择^[4]、人工晶状体个体化选择^[5]、角膜塑形镜与光学镜片的验配^[6]、弱视眼像差特点^[7]、干眼的诊治^[8]等。目前尚无评估波前像差仪测量结果的金标准,因此对不同波前像差仪测量结果进行对比研究是有必要的。既往研究在实验室各条件严格控制的情况下,对不同原理像差仪测量正常人群所得结果进行比较,得出结果大部分一致的结论^[9]。Topcon KR-1W、i.Profiler与OPD-Scan III均是集波前像差仪、角膜地形图、自动验光仪、角膜曲率计于一体的检查设备。OPD-Scan III采用光程差原理设计,是日本Nidek公司最新研发的设备,具有一键即得操作简单、快捷、非接触测量等优势,但同其他像差仪的差异性和一致性还未得到充分的临床验证,泪膜的完整性对检查结果影响也较大^[10]。Topcon KR-1W和i.Profiler采用Hartmann-Shack原理设计,Hartmann-Shack波阵面感受器通过测量眼底的点光源反射出眼球的视网膜像测量波阵面像差^[11]。Topcon KR-1W可分别测量4、6mm瞳孔直径下全眼、角膜、眼内高阶像差;i.Profiler采用Zernike系数对眼睛像差结果进行定量描述,国外主要应用于视光师验光配镜^[12],结合I.Scription技术对人眼高阶像差进行定量及处理,测量不同瞳孔直径下验光数据,个性化改善患者夜间暗视力。两者设计原理相同,但受测量误差、受检者配合程度、像差仪的准确性等原因影响,结果可能存在差异性。本研究旨在评估Topcon KR-1W、OPD-Scan III与i.Profiler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,为各像差仪的临床应用提供参考。

1 对象和方法

1.1 对象 前瞻性临床研究。纳入2022-06/08在广西壮族自治区人民医院视光中心检查的成年近视患者92例,其中男53例,女39例;年龄18~35(平均22±5)岁;球镜度数-0.75~-8.50(平均-4.31±1.74)D;柱镜度数0~-1.50(平均-0.62±0.46)D。纳入标准:(1)球镜度数-0.75~-9.00D,柱镜度数0~-1.50D,最佳矫正视力(BCVA)(LogMAR)优于0;(2)年龄18~35岁;(3)泪膜功能正常,能正确配合检查者;(4)自然睁眼时双眼角膜暴露≥2/3者;(5)测量前未进行任何眼表侵入性检查;(6)近1mo内未配戴硬性角膜接触镜,2wk内未配戴软性角膜接触镜;(7)无眼部外伤史和手术史。排除标准:(1)既往行准分子激光或其他角膜屈光手术者;(2)有斜弱视、屈光间质混浊、眼底疾病、眼表疾病等眼部疾病史。本研究已获得广西壮族自治区人民医院伦理委员会批准(No.伦理-KY-QT-202210)。所有受检者均签署知情同意书。

1.2 方法 为减少像差测量值波动,所有受检者均在同一天由同一位熟练的检查者分别使用Topcon KR-1W、

i.Profiler与OPD-Scan III三种波前像差仪在相同低度照明条件下进行波前像差测量,检测顺序随机,间隔15min,取右眼检测结果进行分析。检查方法:在自然瞳孔条件下,受检者下颌置于像差仪颌托,额头紧贴额带,调整水平标线与其外眦相平,嘱受检者双眼瞬目后注释像差仪的目标图像/指示灯,适当眨眼维持角膜湿润,并完全暴露角膜,准确聚焦后完成测量,测量参数包括4、6mm瞳孔直径下角膜三、四阶像差,分别为三阶三叶草差(Z_3^{-3} 、 Z_3^3)、三阶彗差(Z_3^{-1} 、 Z_3^1)和四阶四叶草差(Z_4^{-4} 、 Z_4^4)、四阶球差(Z_4^0)、四阶二级散光(Z_4^{-2} 、 Z_4^2)值。每只眼重复测量3次。

统计学分析:采用SPSS 20.0统计学软件、GraphPad Prism 9.0.0和MedCalc 18.2.1软件进行统计分析。计量资料经Shapiro-Wilk检验均服从正态分布,以 $\bar{x} \pm s$ 表示,三种像差仪角膜高阶像差测量值比较采用重复测量方差分析,两两比较采用Bonferroni检验。相关性分析采用Pearson相关性分析法,相关系数 r 值越大,表示相关性越强,其中 $r=1.00$ 时为完全相关, $0.70 \leq r < 1.00$ 为强相关, $0.40 \leq r < 0.70$ 为中等相关, $0.10 \leq r < 0.40$ 为弱相关。三种像差仪角膜高阶像差测量值的一致性采用一致性相关系数(concordance correlation coefficient, CCC, P_c)、Bland-Altman散点图、一致性界限(95% limit of agreement, 95% LoA)进行分析,其中 $P_c < 0.90$ 时表明一致性较差^[13],95% LoA(上下限绝对值最大值) $< 0.1 \mu\text{m}$ 为临床可接受范围,范围越窄,表明一致性越好^[14]。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 三种像差仪测量角膜高阶像差的差异性 三种像差仪6mm瞳孔直径下角膜高阶像差测量值均高于4mm瞳孔直径下角膜高阶像差测量值,见表1。

4mm瞳孔直径下,三种像差仪 Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} 测量值差异均无统计学意义($P > 0.05$),见表1。OPD Scan III Z_3^{-1} 、 Z_3^2 测量值分别与i.Profiler、Topcon KR-1W测量值比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$);OPD Scan III Z_3^{-3} 、 Z_3^1 、 Z_3^3 测量值与i.Profiler测量值比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$);OPD Scan III Z_4^0 、 Z_4^4 测量值与Topcon KR-1W测量值比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。i.Profiler Z_3^{-3} 、 Z_3^3 、 Z_4^0 、 Z_4^4 测量值与Topcon KR-1W测量值比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$),见表2。

6mm瞳孔直径下,三种像差仪角膜高阶像差测量值差异均有统计学意义($P < 0.05$),见表1。OPD Scan III Z_3^{-1} 、 Z_4^2 、 Z_4^4 测量值分别与i.Profiler、Topcon KR-1W测量值比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$);OPD Scan III Z_3^{-3} 、 Z_3^1 测量值与i.Profiler测量值比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$);OPD Scan III Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} 、 Z_4^0 测量值与Topcon KR-1W测量值比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。i.Profiler Z_3^{-3} 、 Z_3^3 、 Z_4^{-4} 、 Z_4^0 、 Z_4^4 测量值与Topcon KR-1W测量值比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$),见表3。

2.2 三种像差仪测量角膜高阶像差的相关性 Pearson相关性分析结果显示,三种像差仪4、6mm瞳孔直径下角膜高阶像差测量值均具有相关性($P < 0.05$),但相关性程度差异较大,见表2、3。Topcon KR-1W与i.Profiler、Topcon KR-1W与OPD Scan III、i.Profiler与OPD Scan III 6mm瞳孔直径下四阶像差(Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} 、 Z_4^0 、 Z_4^2 、 Z_4^4)测量值相关系数(0.561~0.790、0.601~0.852、0.638~0.790)高于4mm瞳孔直径下四阶像差测量值相关系数(0.232~0.405、0.249~0.460、0.215~0.352)。

表1 角膜高阶像差测量值比较

 $(\bar{x} \pm s, \mu\text{m})$

角膜高阶像差	瞳孔直径(mm)	Topcon KR-1W	i.Profiler	OPD-SCAN III	F	P
Z_3^{-3}	4	-0.002±0.045	-0.013±0.051	0.000±0.049	6.611	0.002
	6	0.001±0.096	-0.045±0.132	-0.009±0.137	18.664	<0.001
Z_3^{-1}	4	0.009±0.052	0.002±0.061	-0.013±0.061	11.137	<0.001
	6	0.011±0.132	0.017±0.181	-0.059±0.187	31.566	<0.001
Z_3^1	4	-0.033±0.028	-0.029±0.030	-0.037±0.032	3.158	0.045
	6	-0.108±0.081	-0.104±0.082	-0.121±0.078	3.355	0.046
Z_3^3	4	-0.008±0.028	-0.015±0.037	-0.007±0.033	4.240	0.016
	6	-0.009±0.064	-0.030±0.088	-0.018±0.089	6.266	0.002
Z_4^{-4}	4	0.003±0.014	0.006±0.014	0.004±0.017	0.949	0.389
	6	0.017±0.023	0.028±0.034	0.028±0.034	9.973	<0.001
Z_4^{-2}	4	0.000±0.009	-0.002±0.013	-0.002±0.013	0.986	0.375
	6	-0.010±0.021	-0.015±0.026	-0.019±0.031	8.535	<0.001
Z_4^0	4	0.030±0.017	0.053±0.019	0.049±0.019	66.364	<0.001
	6	0.201±0.050	0.255±0.065	0.262±0.069	125.146	<0.001
Z_4^2	4	-0.005±0.016	-0.002±0.019	-0.019±0.020	34.555	<0.001
	6	-0.018±0.037	-0.024±0.048	-0.036±0.051	13.368	<0.001
Z_4^4	4	0.001±0.018	-0.008±0.019	-0.012±0.021	17.045	<0.001
	6	0.005±0.038	-0.011±0.042	-0.020±0.048	22.402	<0.001

注: Z_3^{-3} :斜向三叶草差; Z_3^{-1} :垂直彗差; Z_3^1 :水平彗差; Z_3^3 :水平三叶草差; Z_4^{-4} :斜向四叶草差; Z_4^{-2} :斜向二级散光; Z_4^0 :球差; Z_4^2 :水平二级散光; Z_4^4 :水平四叶草差。

表2 4mm 瞳孔直径下三种像差仪角膜高阶像差测量值的差异性和相关性及其一致性

角膜高阶像差	差异性		相关性		一致性		
	$\bar{x} \pm s (\mu\text{m})$	P	r	P	P_c	95%LoA	上下限绝对值最大值
Topcon KR-1W vs i.Profiler							
Z_3^{-3}	0.011±0.037	<0.05	0.718	<0.001	0.694	-0.061~0.083	0.144
Z_3^{-1}	0.007±0.047	0.567	0.664	<0.001	0.651	-0.086~0.099	0.185
Z_3^1	-0.004±0.032	0.674	0.398	<0.001	0.393	-0.067~0.059	0.126
Z_3^3	0.007±0.028	<0.05	0.662	<0.001	0.621	-0.048~0.063	0.111
Z_4^{-4}	-0.003±0.015	0.358	0.405	<0.001	0.398	-0.033~0.028	0.061
Z_4^{-2}	0.002±0.014	0.810	0.232	0.026	0.217	-0.026~0.030	0.056
Z_4^0	-0.023±0.020	<0.05	0.384	<0.001	0.213	-0.062~0.017	0.079
Z_4^2	-0.002±0.020	0.760	0.376	<0.001	0.369	-0.042~0.037	0.079
Z_4^4	0.009±0.022	<0.05	0.296	0.004	0.262	-0.034~0.053	0.087
Topcon KR-1W vs OPD Scan III							
Z_3^{-3}	-0.001±0.031	1.000	0.789	<0.001	0.786	-0.062~0.059	0.121
Z_3^{-1}	0.022±0.037	<0.05	0.805	<0.001	0.741	-0.050~0.093	0.143
Z_3^1	0.004±0.033	0.724	0.392	<0.001	0.383	-0.062~0.070	0.132
Z_3^3	-0.001±0.027	1.000	0.627	<0.001	0.619	-0.053~0.052	0.105
Z_4^{-4}	-0.001±0.019	1.000	0.249	0.017	0.243	-0.038~0.036	0.074
Z_4^{-2}	0.002±0.014	0.480	0.254	0.014	0.237	-0.025~0.029	0.054
Z_4^0	-0.020±0.020	<0.05	0.433	<0.001	0.271	-0.058~0.019	0.077
Z_4^2	0.015±0.020	<0.05	0.404	<0.001	0.299	-0.025~0.055	0.080
Z_4^4	0.013±0.021	<0.05	0.460	<0.001	0.372	-0.027~0.053	0.080
i.Profiler vs OPD Scan III							
Z_3^{-3}	-0.012±0.038	<0.05	0.719	<0.001	0.698	-0.086~0.062	0.148
Z_3^{-1}	0.015±0.050	<0.05	0.673	<0.001	0.654	-0.082~0.112	0.194
Z_3^1	0.008±0.028	<0.05	0.601	<0.001	0.580	-0.047~0.063	0.110
Z_3^3	-0.008±0.031	<0.05	0.630	<0.001	0.611	-0.068~0.052	0.120
Z_4^{-4}	0.001±0.018	1.000	0.324	0.002	0.319	-0.034~0.037	0.071
Z_4^{-2}	0.000±0.016	1.000	0.215	0.039	0.215	-0.032~0.033	0.065
Z_4^0	0.003±0.022	0.542	0.352	0.001	0.348	-0.040~0.046	0.086
Z_4^2	0.017±0.024	<0.05	0.288	0.005	0.209	-0.029~0.064	0.093
Z_4^4	0.004±0.024	0.444	0.307	0.003	0.301	-0.043~0.050	0.093

注: Z_3^{-3} :斜向三叶草差; Z_3^{-1} :垂直彗差; Z_3^1 :水平彗差; Z_3^3 :水平三叶草差; Z_4^{-4} :斜向四叶草差; Z_4^{-2} :斜向二级散光; Z_4^0 :球差; Z_4^2 :水平二级散光; Z_4^4 :水平四叶草差。

表3 6mm瞳孔直径下三种像差仪角膜高阶像差测量值的差异性和相关性及其一致性

角膜高阶像差	差异性		相关性		一致性		
	$\bar{x} \pm s (\mu\text{m})$	P	r	P	P_c	95%LoA	上下限绝对值最大值
Topcon KR-1W vs i.Profiler							
Z_3^{-3}	0.046±0.075	<0.05	0.826	<0.001	0.727	-0.102~0.194	0.296
Z_3^{-1}	-0.006±0.113	1.000	0.783	<0.001	0.745	-0.228~0.215	0.443
Z_3^1	-0.004±0.073	1.000	0.598	<0.001	0.597	-0.148~0.139	0.287
Z_3^3	0.021±0.054	<0.05	0.787	<0.001	0.722	-0.085~0.128	0.213
Z_4^{-4}	-0.011±0.029	<0.05	0.561	<0.001	0.484	-0.068~0.045	0.113
Z_4^{-2}	0.005±0.020	0.051	0.675	<0.001	0.642	-0.034~0.044	0.078
Z_4^0	-0.053±0.040	<0.05	0.790	<0.001	0.537	-0.131~0.024	0.155
Z_4^2	0.006±0.032	0.283	0.735	<0.001	0.704	-0.058~0.069	0.127
Z_4^4	0.016±0.037	<0.05	0.570	<0.001	0.527	-0.057~0.088	0.145
Topcon KR-1W vs OPD Scan III							
Z_3^{-3}	0.010±0.077	0.614	0.837	<0.001	0.783	-0.141~0.161	0.302
Z_3^{-1}	0.070±0.113	<0.05	0.802	<0.001	0.690	-0.152~0.292	0.444
Z_3^1	0.013±0.074	0.291	0.565	<0.001	0.558	-0.133~0.159	0.292
Z_3^3	0.009±0.061	0.472	0.732	<0.001	0.689	-0.110~0.128	0.238
Z_4^{-4}	-0.011±0.027	<0.05	0.601	<0.001	0.519	-0.065~0.042	0.107
Z_4^{-2}	0.009±0.022	<0.05	0.712	<0.001	0.622	-0.034~0.052	0.086
Z_4^0	-0.061±0.037	<0.05	0.852	<0.001	0.535	-0.134~0.012	0.146
Z_4^2	0.018±0.034	<0.05	0.743	<0.001	0.648	-0.049~0.086	0.135
Z_4^4	0.025±0.035	<0.05	0.701	<0.001	0.583	-0.043~0.093	0.136
i.Profiler vs OPD Scan III							
Z_3^{-3}	-0.036±0.075	<0.05	0.845	<0.001	0.816	-0.182~0.111	0.293
Z_3^{-1}	0.076±0.075	<0.05	0.916	<0.001	0.843	-0.072~0.224	0.296
Z_3^1	0.017±0.049	<0.05	0.813	<0.001	0.793	-0.080~0.114	0.194
Z_3^3	-0.012±0.057	0.136	0.789	<0.001	0.781	-0.125~0.100	0.225
Z_4^{-4}	0.000±0.029	1.000	0.638	<0.001	0.638	-0.057~0.057	0.114
Z_4^{-2}	0.004±0.021	0.215	0.752	<0.001	0.735	-0.037~0.045	0.082
Z_4^0	-0.008±0.044	0.269	0.790	<0.001	0.783	-0.093~0.078	0.171
Z_4^2	0.013±0.037	<0.05	0.723	<0.001	0.698	-0.060~0.085	0.145
Z_4^4	0.009±0.037	<0.05	0.665	<0.001	0.644	-0.063~0.082	0.145

注: Z_3^{-3} :斜向三叶草差; Z_3^{-1} :垂直彗差; Z_3^1 :水平彗差; Z_3^3 :水平三叶草差; Z_4^{-4} :斜向四叶草差; Z_4^{-2} :斜向二级散光; Z_4^0 :球差; Z_4^2 :水平二级散光; Z_4^4 :水平四叶草差。

2.3 三种像差仪测量角膜高阶像差的一致性 4mm瞳孔直径下,三种像差仪间三阶像差(Z_3^{-3} 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_3^3)测量值的95%LoA>0.1 μm , P_c <0.90,显示一致性较差;四阶像差(Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} 、 Z_4^0 、 Z_4^2 、 Z_4^4)测量值的95%LoA<0.1 μm ,显示一致性较好,而 P_c <0.90,显示一致性较差。6mm瞳孔直径下,三种像差仪间三阶像差(Z_3^{-3} 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_3^3)、四阶四叶草差(Z_4^{-4} 、 Z_4^4)、四阶球差(Z_4^0)、四阶水平二级散光(Z_4^2)测量值的95%LoA>0.1 μm , P_c <0.90,显示一致性较差,见表2、3。

三种像差仪4、6mm瞳孔直径下角膜高阶像差测量值Bland-Altman散点图95%LoA线外点比例较低,图1~4。4mm瞳孔直径下,Topcon KR-1W与i.Profiler、Topcon KR-1W与OPD Scan III、i.Profiler与OPD Scan III三阶像差(Z_3^{-3} 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_3^3)测量值95%LoA线外点比例分别为7.60%、3.30%、5.40%、7.60%、7.60%、4.30%、5.40%、4.30%、6.50%、5.40%、6.50%、7.60%;四阶像差(Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} 、 Z_4^0 、 Z_4^2 、 Z_4^4)测量值95%LoA线外点比例分别为7.60%、9.80%、6.50%、5.40%、8.70%、5.40%、5.40%、6.50%、

7.60%、7.60%、5.40%、7.60%、6.50%、7.60%、6.50%。6mm瞳孔直径下,Topcon KR-1W与i.Profiler、Topcon KR-1W与OPD Scan III、i.Profiler与OPD Scan III三阶像差(Z_3^{-3} 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_3^3)测量值95%LoA线外点比例分别为4.30%、3.30%、4.30%、3.30%、4.30%、4.30%、4.30%、4.30%、6.50%、5.40%、5.40%、5.40%;四阶像差(Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} 、 Z_4^0 、 Z_4^2 、 Z_4^4)测量值95%LoA线外点比例分别为5.40%、7.60%、2.20%、3.30%、5.40%、5.40%、8.70%、6.50%、5.40%、6.50%、5.40%、5.40%、3.30%、4.30%、2.20%。

3 讨论

人眼低阶像差可以通过光学镜片矫正,但高阶像差导致的视敏度和视觉质量下降无法通过一般光学方法矫正。角膜屈光手术会改变角膜形状和角膜高阶像差,如角膜球差增加,可能导致术后出现单眼复视、眩光、光晕等,影响术后视觉质量^[15-16]。屈光手术前对患者进行准确的波前像差检查,根据检测结果选择合适的手术方式可减少术后高阶像差,提高术后视觉质量。个性化的波前像差引导^[17]、

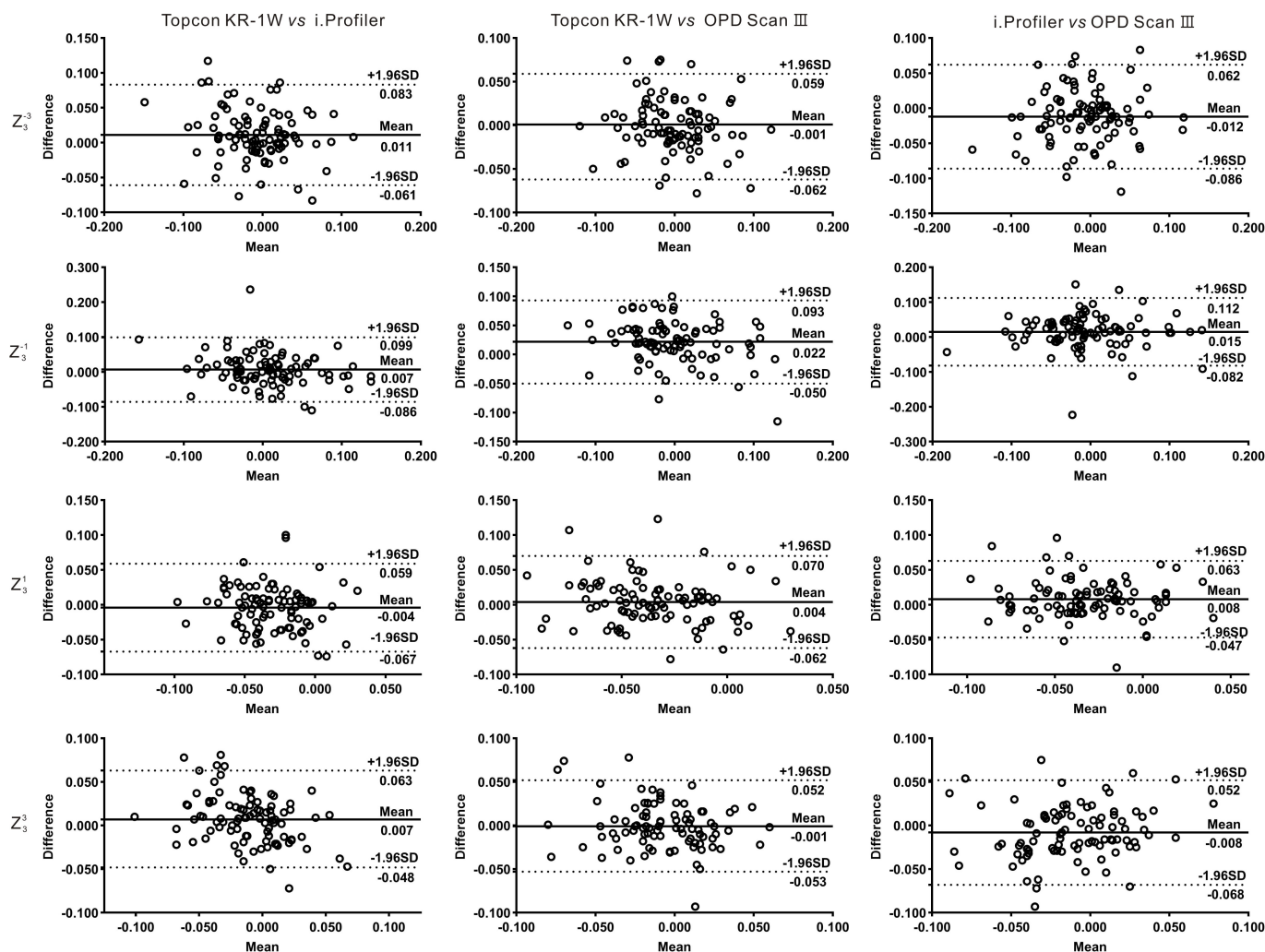


图1 三种像差仪4mm瞳孔直径下角膜三阶像差测量值的Bland-Altman分析图 Z_3^{-3} :斜向三叶草差; Z_3^{-1} :垂直彗差; Z_3^1 :水平彗差; Z_3^3 :水平三叶草差。

角膜地形图引导^[18]、Q值引导的角膜屈光手术^[19]就是为了减少角膜屈光手术后波前像差的增加,进一步提高术后视觉质量,所以准确的屈光术前像差测量显得尤为重要。

本研究中,三种像差仪6mm瞳孔直径下角膜高阶像差测量值均高于4mm瞳孔直径下角膜高阶像差测量值。既往研究显示,不同瞳孔直径下角膜高阶像差随瞳孔直径的增大而增大^[20]。本研究结果显示,Topcon KR-1W与i.Profiler、Topcon KR-1W与OPD Scan III、i.Profiler与OPD Scan III 6mm瞳孔直径下三阶像差测量值相关系数范围分别为 $r=0.598\sim 0.826$ 、 $0.565\sim 0.837$ 、 $0.789\sim 0.916$,四阶像差测量值相关系数范围分别为 $r=0.561\sim 0.790$ 、 $0.601\sim 0.852$ 、 $0.638\sim 0.790$;4mm瞳孔直径下三阶像差测量值相关系数范围分别为 $r=0.398\sim 0.718$ 、 $0.392\sim 0.805$ 、 $0.601\sim 0.719$,四阶像差测量值相关系数范围分别为 $r=0.232\sim 0.405$ 、 $0.249\sim 0.460$ 、 $0.215\sim 0.352$ 。高阶像差的阶数越高,测量值越小,在较小瞳孔直径下测量值更小,不同设备间较小的测量值波动可能引起结果差异,这可能是导致4mm瞳孔直径下角膜三、四阶像差测量值相关性差异大于6mm瞳孔直径下三、四阶像差测量值相关性的原因。

OPD-Scan III与Topcon KR-1W、i.Profiler设计原理不同,OPD-Scan III设计采用光程差原理,在测量健康人眼

角膜像差^[21]、轻微圆锥角膜患眼像差^[22]时具有较好的准确性,与其他不同设计原理像差仪测量高阶像差结果的一致性尚无统一结论^[23-24]。本研究中,4、6mm瞳孔直径下OPD-Scan III与Topcon KR-1W Z_3^{-1} 、 Z_4^0 、 Z_4^2 、 Z_4^4 测量值,OPD-Scan III与i.Profiler Z_3^{-3} 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_4^2 测量值差异均有统计学意义($P<0.05$);OPD-Scan III与Topcon KR-1W、i.Profiler 4mm瞳孔直径下三阶像差测量值、6mm瞳孔直径下三、四阶像差测量值(除 Z_4^2)的95%LoA $>0.1\mu\text{m}$, $P_c<0.90$,显示一致性较差。Wan等^[21]对比Pentacam AXL Wave(Hartmann-shack原理)和OPD-Scan III角膜高阶像差测量值,结果显示四阶球差存在差异性,且大部分结果一致性较差。Visser等^[25]对比分析采用Hartman-shack设计原理的Keratron与OPD-Scan角膜三、四阶球差测量值,结果显示相关性($r=0.216\sim 0.719$)与一致性均较差,表明设备间不可互换,与本研究结果相似。Cook等^[26]对比Zywave(Hartmann-Shack原理)、iDesign(Hartmann-Shack原理)、OPD-Scan III、GALILEI™ G2(Schiempflug原理)四种像差仪测量高阶像差的一致性,结果显示角膜像差比全眼像差更具有可比性。角膜屈光手术主要改变角膜像差,而角膜像差可能比全眼像差更具可比性,故本研究主要选取角膜像差作为研究内容并进一步分析不同像差仪间的

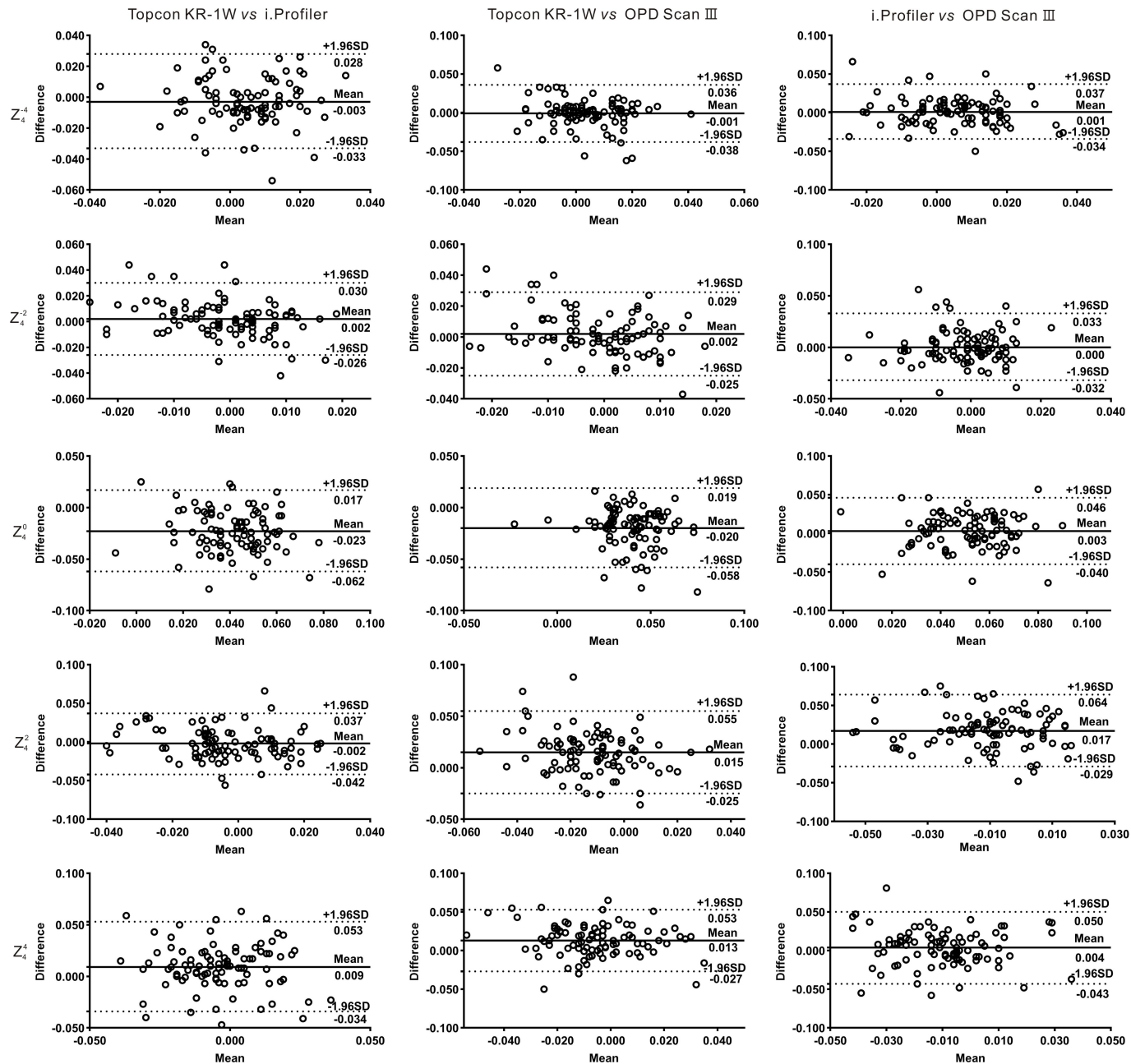


图2 三种像差仪4mm瞳孔直径下角膜四阶像差测量值的Bland-Altman分析图 Z_4^{-4} :斜向四叶草差; Z_4^{-2} :斜向二级散光; Z_0^0 :球差; Z_2^2 :水平二级散光; Z_4^4 :水平四叶草差。

差异。谭琦等^[27]采用Hartmann-Shack原理设计的Zywave II和OPD-Scan II测量6mm瞳孔直径范围内眼高阶像差时发现, Z_3^{-1} 、 Z_4^{-4} 测量结果差异有统计学意义($P < 0.05$),与本研究6mm瞳孔直径下OPD-Scan III和另外两种Hartmann-Shack原理的像差仪测量结果一致。OPD-Scan III测量结果受泪膜质量影响较大,既往研究显示干眼患者波前像差与角膜不规则性大于泪膜正常者^[8],本研究中三种仪器测量间隔时间较短,泪膜质量可能影响仪器之间测量结果的一致性。OPD-Scan III采用波长为880nm光源,测量范围可达角膜直径9.5mm,可确保测量范围完全涵盖几乎任何瞳孔直径并为波前像差测量提供2520个数据点。i.Profiler使用Hartmann-Shack原理,采用光源波长为555nm,角膜直径测量范围为7mm,可提供1500个采样点进行波前像差采样。Topcon KR-1W同样

使用Hartmann-Shack原理,光源波长为840nm,可提供8mm瞳孔直径范围内2609个数据采样点并进行波前像差采样。不同设计原理、测量范围以及光源波长^[28]均会造成测量结果误差。

Topcon KR-1W和i.Profiler均采用Hartmann-Shack设计原理,相同原理不同类型像差仪间测量结果也可能有差异。本研究结果显示,两种像差仪4、6mm瞳孔直径下三阶彗差(Z_3^{-1} 、 Z_3^1)、四阶二级散光(Z_4^{-2} 、 Z_4^2)差异均无统计学意义($P > 0.05$),三阶三叶草差(Z_3^{-3} 、 Z_3^3)、四阶球差(Z_4^0)、水平四叶草差(Z_4^4)差异均有统计学意义($P < 0.05$)。Koh等^[29]对比4mm瞳孔直径下Pentacam AXL(Hartmann-Shack原理)和Topcon KR-1W角膜三、四阶像差发现,仅水平彗差(Z_3^1)差异有统计学意义($P < 0.05$),与本研究结果有差异。本研究纳入研究对象92例,而Koh等^[29]研究

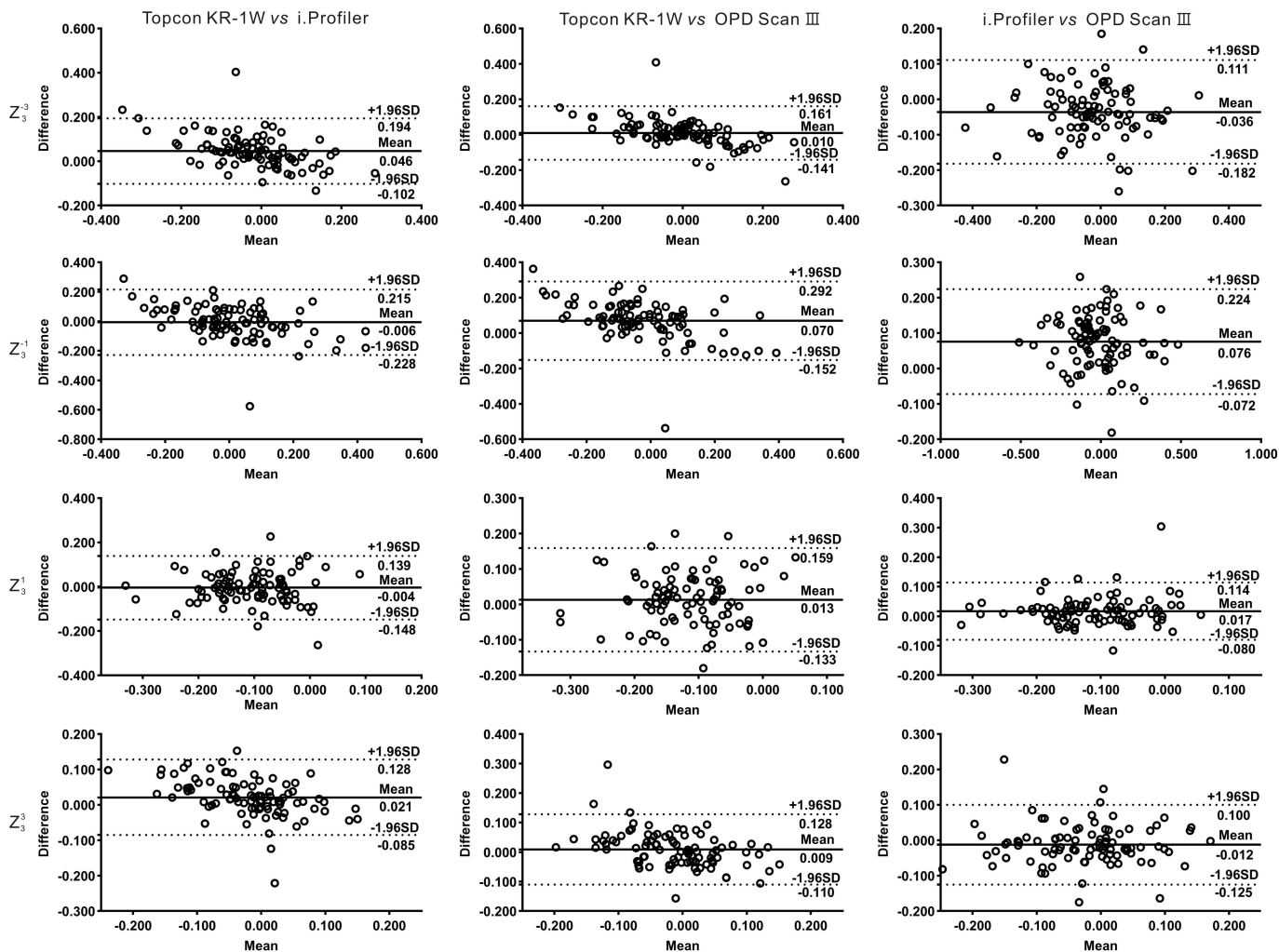


图3 三种像差仪6mm瞳孔直径下角膜三阶像差测量值的Bland-Altman分析图 Z_3^{-3} :斜向三叶草差; Z_3^{-1} :垂直彗差; Z_3^1 :水平彗差; Z_3^3 :水平三叶草差。

纳入研究对象29例,样本量可能造成研究结果偏倚;此外,i.Profiler与Pentacam AXL(光源波长为475nm,可测量角膜前、后表面像差)设计方面存在差异性,光源波长、仪器的精确性与像差计算方法等不同均可能导致测量结果存在差异。本研究发现,6mm瞳孔直径下Topcon KR-1W和i.Profiler三、四阶像差测量值相关系数范围为 $r=0.561\sim 0.826$,三、四阶像差(除 Z_4^2)测量值的95%LoA $>0.1\mu\text{m}$,显示一致性较差。Lou等^[30]对比Pentacam AXL和Topcon KR-1W 6mm瞳孔直径下角膜高阶像差测量值,结果显示三、四阶像差测量值的95%LoA $>0.1\mu\text{m}$ 且相关性差,与本研究结果一致。测量误差或像差仪的精确性^[31]、泪膜质量^[32]、双眼调节^[26]等均可能影响波前像差的测量结果及设备间测量结果的一致性。Wavescan和Zywave也是两种采用Hartmann-Shack设计的像差仪,研究发现两种像差仪 Z_4^0 测量值差异有统计学意义, Z_3^1 测量值差异无统计学意义^[33]。Topcon KR-1W与i.Profiler两种像差仪原理虽然相同,但不同仪器内部像差结果计算存在差异,传感器架构、波前分解以及光线与透镜、瞳孔等算法差异均可能造成结果差异,为进一步证实相同原理不同类型像差仪测量结果的差异需进一步优化实验对象,同时在实验室条件下进行其他相关研究,以评估其他潜在

因素对数据结果的影响。

本研究存在以下不足:(1)不同像差检查均在同一天完成,测量间隔时间为15min,可能导致泪膜质量下降,造成设备间测量结果差异较大;(2)不同像差检查量均在自然瞳孔下进行,前一次测量导致的调节波动也可能造成设备间测量结果存在差异,由于目前缺乏测量波前像差的金标准,故仍无法确定不同像差仪测量结果的准确性;(3)本研究仅纳入成年近视患者作为研究对象,未纳入角膜屈光术后患者,无法明确屈光手术对仪器间测量值一致性的影响;(4)本研究仅分析了三种像差仪4、6mm瞳孔直径下角膜高阶像差测量结果的一致性,缺乏多个瞳孔直径下高阶像差结果一致性的分析,缺乏全眼、眼内像差测量结果一致性的分析。在今后的研究中将进一步扩大样本范围,对不同瞳孔直径下全眼、角膜、眼内高阶像差进行研究,增加屈光术后不同像差仪间测量结果差异性的研究,为三种像差仪的临床应用提供参考依据。

综上所述,Topcon KR-1W、i.Profiler与OPD-Scan III三种像差仪4、6mm瞳孔直径下角膜三、四阶像差测量结果存在统计学差异,一致性较差,角膜屈光术前应用时三种像差仪不可相互替代。在临床应用中应多了解各个仪器测量结果之间的差异性,参考多个仪器测量结果并谨慎使用。

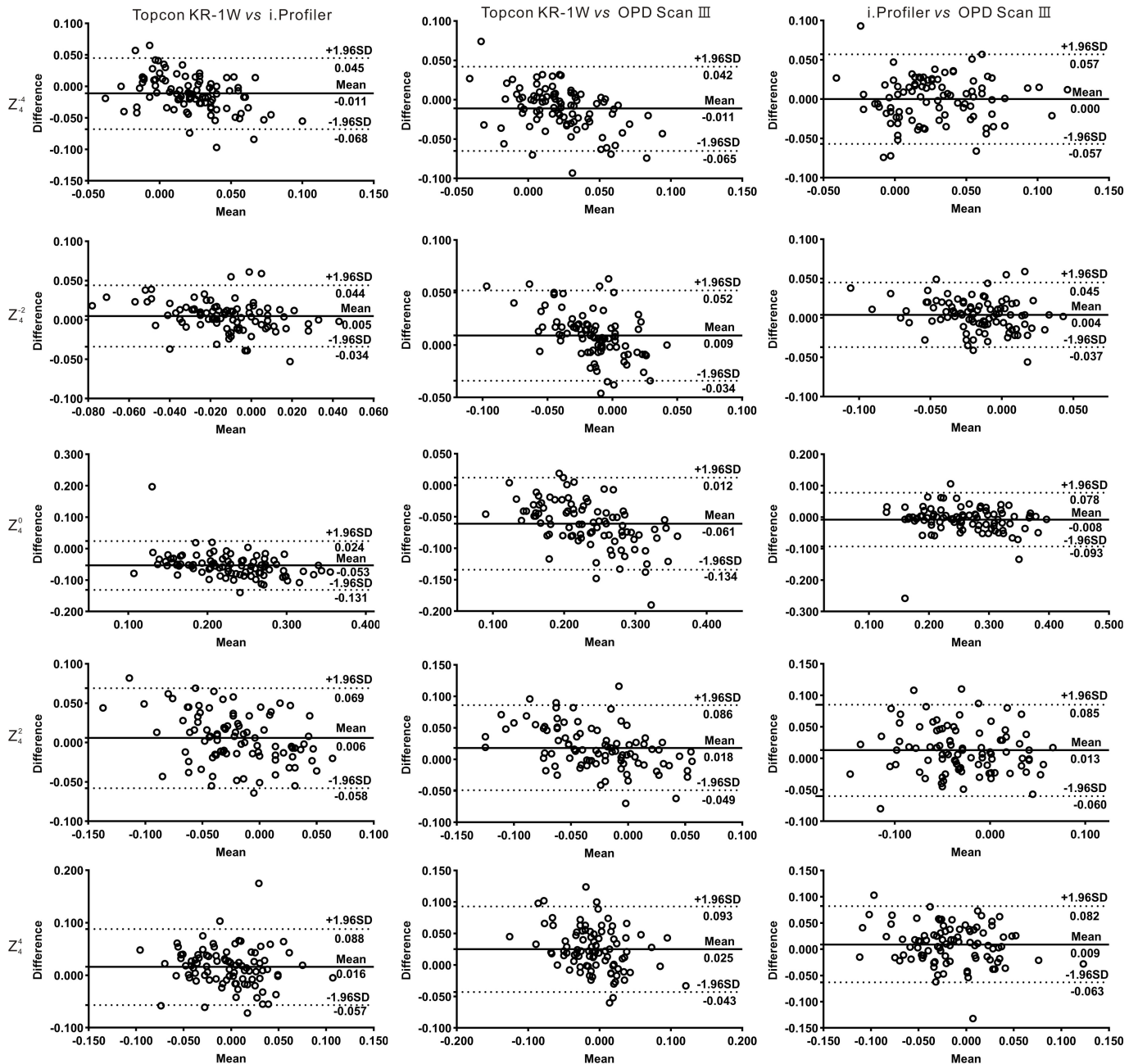


图4 三种像差仪6mm瞳孔直径下角膜四阶像差测量值的Bland-Altman分析图 Z_4^{-4} :斜向四叶草差; Z_4^{-2} :斜向二级散光; Z_4^0 :球差; Z_4^2 :水平二级散光; Z_4^4 :水平四叶草差。

参考文献

- Liao X, Huang X, Lan CJ, et al. Comprehensive evaluation of retinal image quality in comparing different aspheric to spherical intraocular lens implants. *Curr Eye Res* 2019;44(10):1098-1103
- Lombardo M, Lombardo G. Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance. *J Cataract Refract Surg* 2010;36(2):313-331
- Wu Y, Huang Y, Wang SH, et al. Comparative study of objective visual quality between FS-LASIK and SMART in myopia. *Int J Ophthalmol* 2022;15(3):502-509
- 郑燕, 周跃华, 张晶, 等. FS-LASIK、WF-LASIK与SMILE术后视觉质量比较的研究. *中华眼科杂志* 2020;56(2):118-125
- Velasco-Barona C, Corredor-Ortega C, Mendez-Leon A, et al. Influence of angle κ and higher-order aberrations on visual quality employing two diffractive trifocal IOLs. *J Ophthalmol* 2019; 2019;7018937

- Huang YY, Li X, Ding CL, et al. Comparison of peripheral refraction and higher-order aberrations between orthokeratology and multifocal soft contact lens designed with highly addition. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2022;260(5):1755-1762
- 赵武校, 甘露, 蓝方方, 等. 已治愈与未治愈屈光参差性弱视患者双眼间的波前像差特点. *眼科新进展* 2019;39(2):153-157
- Gao Y, Liu R, Liu Y, et al. Optical quality in patients with dry eye before and after treatment. *Clin Exp Optom* 2021;104(1):101-106
- Rozema JJ, Van Dyck DEM, Tassignon MJ. Clinical comparison of 6 aberrometers Part 2: statistical comparison in a test group. *J Cataract Refract Surg* 2006;32(1):33-44
- 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
- Thibos LN. Principles of Hartmann-Shack aberrometry. *J Refract Surg* 2000;16(5):S563-565

- 12 Putnam NM, Vasudevan B, Juarez A, et al. Comparing habitual and i. scription refractions. *BMC Ophthalmol* 2019;19(1):49
- 13 Akoglu H. User's guide to correlation coefficients. *Turk J Emerg Med* 2018;18(3):91-93
- 14 Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986;1(8476):307-310
- 15 Bohac M, Koncarevic M, Dukic A, et al. Unwanted astigmatism and high-order aberrations one year after excimer and femtosecond corneal surgery. *Optom Vis Sci* 2018;95(11):1064-1076
- 16 Zhao PF, Hu YB, Wang Y, et al. Comparison of correcting myopia and astigmatism with SMILE or FS-LASIK and postoperative higher-order aberrations. *Int J Ophthalmol* 2021;14(4):523-528
- 17 Chiang B, Valerio GS, Manche EE. Prospective, randomized contralateral eye comparison of wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis and small incision lenticule extraction refractive surgeries. *Am J Ophthalmol* 2022;237:211-220
- 18 康盈, 王华, 陈蛟. 角膜地形图引导的 FS-LASIK 治疗近视及散光的视觉质量评估. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2019;21(6):414-419
- 19 黄学海, 周艳峰. Q 值引导与标准 FS-LASIK 术后角膜形态及对比敏感度比较. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2019;21(7):514-520
- 20 王梅洁, 廖莹, 谭青青, 等. i. Profiler 和 iTrace 波前像差仪测量健康人眼波前像差的一致性. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2021;23(1):19-26
- 21 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
- 22 Heidari Z, Mohammadpour M, Hashemi H, et al. Early diagnosis of subclinical keratoconus by wavefront parameters using Scheimpflug, Placido and Hartmann-Shack based devices. *Int Ophthalmol* 2020;40(7):1659-1671
- 23 Kim DS, Narváez J, Krassin J, et al. Comparison of the VISX wavescan and NIDEK OPD-scan aberrometers. *J Refract Surg* 2009;25(5):429-434
- 24 陈旭, 卢奕, 戴锦晖, 等. 光路追踪型、动态视网膜镜型与 Hartmann-Shack 型像差仪的临床比较研究. *中华眼科杂志* 2009(4):332-337
- 25 Visser N, Berendschot TT, Verbakel F, et al. Evaluation of the comparability and repeatability of four wavefront aberrometers. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2011;52(3):1302-1311
- 26 Cook WH, McKelvie J, Wallace HB, et al. Comparison of higher order wavefront aberrations with four aberrometers. *Indian J Ophthalmol* 2019;67(7):1030-1035
- 27 谭琦, 刘陇黔, 陈浩, 等. Zywave II 和 OPD-scan II 对人眼高阶像差测量结果的比较. *四川大学学报(医学版)* 2014;45(6):1033-1035
- 28 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
- 29 Koh S, Inoue R, Iwamoto Y, et al. Comparison of ocular wavefront aberration measurements obtained using two hartmann-shack wavefront aberrometers. *Eye Contact Lens* 2023;49(3):98-103
- 30 Lou W, Du W, Jin HY, et al. Comparison of anterior corneal aberrations measured by Scheimpflug and Placido Disc System for myopes. *BMC Ophthalmol* 2022;22(1):512
- 31 Cheng X, Himebaugh NL, Kollbaum PS, et al. Test-retest reliability of clinical Shack-Hartmann measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2004;45(1):351-360
- 32 Kundu G, Shetty R, Khamar P, et al. Impact of tear optics on the repeatability of Pentacam AXL wave and iTrace in measuring anterior segment parameters and aberrations. *Indian J Ophthalmol* 2022;70(4):1150-1157
- 33 Cade F, Cruzat A, Paschalis EI, et al. Analysis of four aberrometers for evaluating lower and higher order aberrations. *PLoS One* 2013;8(1):e54990