

波前像差光路系统检测 IOL 倾斜和偏心对光学成像质量的影响

李承霖¹, 崔红², 李正日¹, 金花¹, 金海燕¹, 汝新宇¹, 邓文庆¹, 吴成哲¹, 李英俊¹

引用:李承霖,崔红,李正日,等.波前像差光路系统检测 IOL 倾斜和偏心对光学成像质量的影响.国际眼科杂志 2019;19(12):2071-2075

基金项目:国家自然科学基金委员会资助项目(No.81560167, 81960182)

作者单位:¹(133000)中国吉林省延吉市,延边大学附属医院眼科;²(124000)中国辽宁省盘锦市中心医院眼科

作者简介:李承霖,延边大学在读硕士研究生,研究方向:角膜屈光手术、白内障。

通讯作者:李英俊,毕业于延边大学医学院,眼科学博士,副主任医师,硕士研究生导师,研究方向:角膜屈光手术、白内障。liyingjun@hanmail.net

收稿日期:2019-07-13 修回日期:2019-11-08

摘要

目的:通过波前像差光路系统探讨人工晶状体(IOL)偏心 and 倾斜对光学成像质量的影响。

方法:在 5.0mm 模拟瞳孔直径下,采用实验室搭建的 Hartmann-Shack IOL 波前像差光路系统检测球面 IOL Sensar AR40e、非球面单焦点 IOL Tecnis ZA9003、非球面多焦点 IOL Tecnis ZM900 分别在偏中心 0、0.2、0.4、0.6、0.8mm,向鼻侧和颞侧倾斜 5°、10°、15°、20°、25°时对光学成像质量的影响,以高阶像差和调制传递函数(MTF)定量成像质量。

结果:倾斜 5°以内时,Tecnis ZA9003 MTF 值高于 AR40e 和 Tecnis ZM900,而倾斜 5°、10°、15°、20°时三种 IOL MTF 值有显著差异。Tecnis ZA9003 IOL 倾斜角度与彗差呈显著正相关($r=0.842, P<0.001$),与球面像差无显著相关性($r=0.229, P=0.241$)。偏心 0.6、0.8mm 时三种 IOL MTF 值有显著差异(均 $P<0.001$),Tecnis ZM900 偏心大于 0.4mm 时成像质量明显下降。

结论:具有 $-0.27\mu\text{m}$ 球差的非球面 IOL 倾斜度小于 5°,偏心小于 0.4mm 时可获得比球面 IOL 更好的光学成像质量。Tecnis ZM900 IOL 偏心大于 0.4mm 时较球面和非球面 IOL 的光学成像质量降低。

关键词:人工晶状体;倾斜;偏心;成像质量;波前相差;光路系统

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2019.12.17

Effect of inclination and eccentricity of intraocular lens on optical imaging quality detected by wavefront aberration system

Cheng-Lin Li¹, Hong Cui², Zheng-Ri Li¹, Hua Jin¹, Hai-Yan Jin¹, Xin-Yu Ru¹, Wen-Qing Deng¹, Cheng-Zhe Wu¹, Ying-Jun Li¹

Foundation items: National Natural Science Foundation of China

(No.81560167, 81960182)

¹Department of Ophthalmology, the Affiliated Hospital of Yanbian University, Yanji 133000, Jilin Province, China; ²Department of Ophthalmology, Panjin Central Hospital, Panjin 124000, Liaoning Province, China

Correspondence to: Ying-Jun Li. Department of Ophthalmology, the Affiliated Hospital of Yanbian University, Yanji 133000, Jilin Province, China. liyingjun@hanmail.net

Received:2019-07-13 Accepted:2019-11-08

Abstract

• AIM: To investigate the effect of inclination and eccentricity of intraocular lens (IOL), on optical imaging quality via wavefront aberration optical path system.

• METHODS: The spherical IOL Sensar AR40e, the aspherical monofocal IOL Tecnis ZA9003, and the aspheric multifocal IOL Tecnis ZM900 were measured at the center of the center using a laboratory-built Hartmann-Shack IOL wavefront aberration path system at 5.0mm simulated pupil diameter. 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8mm, the effect on the optical imaging quality when tilting 5°, 10°, 15°, 20°, 25° to the nasal side and the temporal side, and quantitative imaging quality by high-order aberration and modulation transfer function.

• RESULTS: The Tecnis ZA9003 MTF value was higher than AR40e and Tecnis ZM900 when inclination within 5°, while the three IOL MTF values were significantly different when inclination 5°, 10°, 15°, and 20°. Tecnis ZA9003 The IOL inclination angle was significantly positively correlated with the coma ($r=0.842, P<0.001$), and there was no significant correlation with the spherical aberration ($r=0.229, P=0.241$). The three IOL MTF values were obtained when the eccentricity was 0.6 and 0.8 mm. Significant differences (both $P<0.001$), the imaging quality of the Tecnis ZM900 eccentricity greater than 0.4mm decreased significantly.

• CONCLUSION: When the inclination of aspheric IOL ($-0.27\mu\text{m}$ spherical aberration) is less than 5° and the eccentricity is less than 0.4mm, aspherical IOL has a better imaging quality than that of spherical IOL. Tecnis ZM900 IOL has a lower optical imaging quality than that of spherical and aspheric IOL when the eccentricity of IOL is more than 0.4mm.

• KEYWORDS: intraocular lens; inclination; eccentricity; imaging quality; wavefront aberration; optical path system

Citation:Li CL, Cui H, Li ZR, et al. Effect of inclination and eccentricity of intraocular lens on optical imaging quality detected by wavefront aberration system. *Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci)* 2019; 19(12):2071-2075

0 引言

随着白内障手术技术的不断提高,人工晶状体(intraocular lens, IOL)设计和材料的日趋完善,越来越多的学者已将白内障手术纳入屈光手术的范畴,这也是目前眼科学的研究热点之一^[1]。白内障手术不仅能解决白内障造成的视觉障碍,而且可通过置换功能性 IOL 达到最佳的视觉品质。目前可供选择的 IOL 种类繁多,包括球面、非球面、多焦等多种设计理念的 IOL,使个性化植入成为可能^[2]。从理论上讲, IOL 植入术后可以获得最佳视觉质量,但这些新兴的 IOL 在眼内是否能真正实现其模拟生理晶状体的功能而达到提高视觉质量的目的仍需深入研究。临床观察发现,术中植入的 IOL 在眼内会出现不同程度的倾斜和偏心^[3],可引起术后波前像差改变,视力下降,眩光、单眼复视等现象,故准确测量 IOL 的倾斜和偏心值,观察术后光学成像质量的变化,对于评价手术方案及选择植入功能性 IOL 的类型具有重要的指导意义。近年研究表明,在模型眼光路上对 IOL 的成像质量的测量结果相比于 IOL 在囊袋内的相关体内临床数据更为客观、准确^[4]。本研究旨在通过实验室搭建 Hartmann-Shack IOL 波前像差光路系统,探讨三种不同类型(球面、非球面单焦点、非球面多焦点) IOL 在偏心 and 倾斜情况下对光学成像质量的影响,为完善白内障屈光手术及设计新一代功能性 IOL 提供相关的理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料 本研究选用三种类型 IOL 进行实验,即具有正球差的球面 IOL Sensor AR40e (Abbott Medical Optics, Inc.),具有 $-0.27\mu\text{m}$ 球面像差的非球面单焦点 IOL Tecnis ZA9003 (Abbott Medical Optics, Inc.),具有 $-0.27\mu\text{m}$ 球面像差的非球面多焦点 IOL Tecnis ZM900 (Abbott Medical Optics, Inc.)。三种 IOL 屈光度数均为 $+22.0\text{D}$ 。

1.2 方法

1.2.1 搭建实验平台 实验室搭建 Hartmann-Shack IOL 波前像差光路系统,建立个性化光学人眼模型。在暗室环境中进行,室内温度 25°C ,空气湿度 20%。高强度光纤耦合光源激光器发出单一波长氦氖激光,通过针孔形成点光源,通过透镜后变成平面波,经偏振分光棱镜(polarization beam splitter, PBS)分束后进入测试用 IOL,反射回的光透过分束器 PBS 后,经过 2 个等焦距的 $\emptyset 1/2$ 英寸消色差胶合透镜(SM05 螺纹安装, $f=25\text{mm}$,增透膜 $400\sim 700\text{nm}$)后进入 Hartmann-Shack 波前传感器,可变孔径光阑位于 IOL 前 0.6mm 处,其直径调整为 5.0mm (图 1)。

1.2.2 检测方法 将待测 IOL 固定于 X 轴和 Y 轴线性调节的光学平移装置的 THORLABS LMR05/M 固定架上,采用生理盐水模拟房水和玻璃体液,承载于玻璃制成的水槽内, IOL 前表面距玻璃水槽前表面 8.0mm ,分别使 IOL 偏心 $0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8\text{mm}$,向鼻侧和颞侧倾斜 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$,采用 ZEMAX (ZEMAX[®] Optical Design Program) 光学设计软件实现光线追迹的方法,将模型眼的结构参数和 IOL 各项参数输入其中。选择波长 555nm ,视场角 0° ,在 5.0mm 通光孔径(模拟瞳孔直径)下对待测 IOL 分别进行连续测试。

检测过程中,激光器发出单一波长的氦氖激光,经光束提升器调整使激光处于合适高度和水平位置。孔径光阑位于 IOL 前 0.6mm 处,其直径可调整,以模拟人眼瞳孔的变化。 IOL 固定于三维调节架上,调整前后、左右、上下、俯仰、旋转位置,使 IOL 光学中心部位于光轴上,保证经 IOL 所成像的中心(光斑质心)与校准光屏上的校准点重合,且所成像的大小、形状与 IOL 光学部完全一致(图 2)。调整位置后,使点光源经 IOL 折射后形成平行光,由 Hartmann-Shack 波前传感器接收形成光斑点阵, CCD 相机采集瞬时光斑点阵,将图像信息输入计算机进行数据处理,进而求解出 Zernike 系数,重构波前。本研究以高阶像差、波前点阵模式光斑和调制传递函数(modulation transfer function, MTF)定量成像质量。

统计学分析:采用 SPSS 21.0 统计软件进行数据分析。符合正态分布的计量资料采用均数 \pm 标准差表示,多组间比较采用单因素方差分析,当差异具有统计学意义时,使用 LSD-*t* 检验进行组间两两比较。相关性分析采用 Pearson 相关分析法。 $P<0.05$ 时差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 三种 IOL 在不同倾斜角度下 MTF 值的比较 在 5.0mm 通光孔径下,三种 IOL 倾斜 $0^\circ\sim 25^\circ$ 时, MTF 值均随着倾斜度数的增加而减小,其中倾斜 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 时三种 IOL MTF 值差异有统计学意义(均 $P<0.05$),而倾斜 $0^\circ, 25^\circ$ 时差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。倾斜 5° 时, Tecnis ZA9003 MTF 值大于 Tecnis ZM900 ($P=0.04$);倾斜 10° 时, AR40e MTF 值大于 Tecnis ZA9003 ($P=0.002$)和 Tecnis ZM900 ($P<0.001$);倾斜 15° 时, AR40e MTF 值大于 Tecnis ZA9003 ($P=0.005$)和 Tecnis ZM900 ($P=0.007$);倾斜 20° 时, AR40e MTF 值大于 Tecnis ZA9003 ($P<0.001$)和 Tecnis ZM900 ($P<0.001$),且 Tecnis ZA9003 MTF 值大于 Tecnis ZM900 ($P<0.001$),差异均有统计学意义($P<0.05$)。

2.2 不同模拟瞳孔直径下 IOL MTF 值的变化 Tecnis ZA9003 倾斜 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ 时,模拟瞳孔直径 3.0mm 时测得 MTF 值分别为 $0.59, 0.35, 0.25, 0.19, 0.13$,模拟瞳孔直径 5.0mm 时测得 MTF 值分别为 $0.45, 0.27, 0.21, 0.15, 0.08$,见图 3。Pearson 相关分析结果显示,模拟瞳孔直径 5.0mm 时, Tecnis ZA9003 的倾斜度数与彗差呈显著正相关($r=0.842, P<0.001$),与球面像差无显著相关性($r=0.229, P=0.241$),见图 4。

2.3 三种 IOL 在不同偏心程度下 MTF 值的比较 在 5.0mm 通光孔径下,向鼻侧和颞侧倾斜 3° ,偏心 $0\sim 0.4\text{mm}$ 时,三种 IOL MTF 值差异无统计学意义(均 $P>0.05$),但偏心 $0.6\sim 0.8\text{mm}$ 时,三种 IOL MTF 值差异有统计学意义(均 $P<0.001$),见表 2。偏心 0.6mm 时, AR40e MTF 值大于 Tecnis ZA9003 和 Tecnis ZM900,且 Tecnis ZA9003 MTF 值大于 Tecnis ZM900;偏心 0.8mm 时, AR40e MTF 值大于 Tecnis ZA9003 和 Tecnis ZM900,差异均有统计学意义($P<0.001$)。图 5 所示为 IOL 光学测试系统测量的三种 IOL 1951 USAF 测试靶的成像质量,结果显示,随着偏心值的增加成像质量逐渐下降, Tecnis ZM900 偏心大于 0.4mm 时成像质量明显下降,而偏心值大于 0.6mm 时 AR40e 较 Tecnis ZA9003 成像质量清晰。

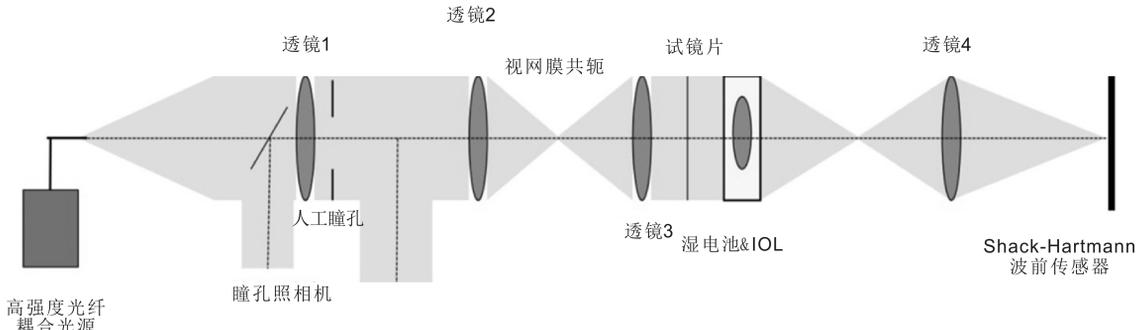


图1 Hartmann-Shack IOL 波前像差光路系统光路图。

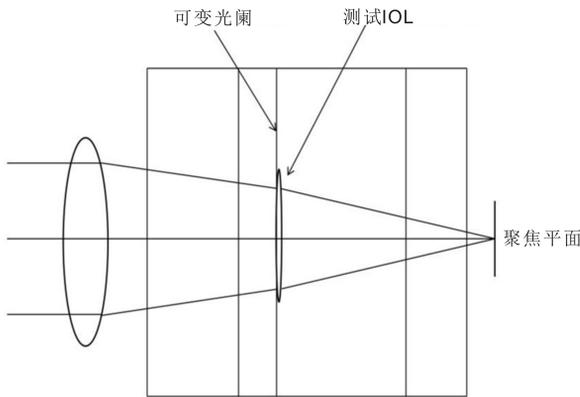


图2 后房型 IOL 的置入示意图。

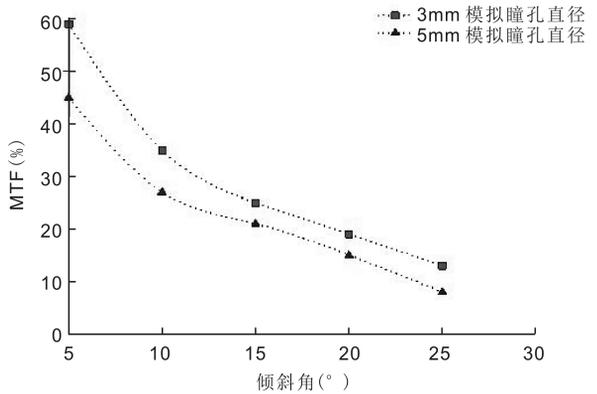


图3 不同瞳孔直径下 Tecnis ZA9003 MTF 值随倾斜角度的变化趋势。

表1 三种 IOL 在不同倾斜角度下 MTF 值的比较

IOL 类型	0°	5°	10°	15°	20°	25°	$\bar{x} \pm s$
AR40e	0.65±0.03	0.54±0.04	0.49±0.02	0.41±0.04	0.35±0.05	0.22±0.01	
Tecnis ZA9003	0.66±0.03	0.55±0.03	0.48±0.01	0.39±0.01	0.25±0.02	0.22±0.02	
Tecnis ZM900	0.65±0.03	0.53±0.02	0.47±0.02	0.39±0.01	0.21±0.01	0.22±0.01	
<i>F</i>	1.548	4.383	8.582	5.357	153.198	0.616	
<i>P</i>	0.219	0.016	<0.001	0.007	<0.001	0.543	

表2 三种 IOL 在不同偏心程度下 MTF 值的比较

IOL 类型	0mm	0.2mm	0.4mm	0.6mm	0.8mm	$\bar{x} \pm s$
AR40e	0.64±0.04	0.52±0.04	0.53±0.02	0.45±0.02	0.29±0.01	
Tecnis ZA9003	0.65±0.03	0.53±0.03	0.53±0.02	0.39±0.02	0.24±0.01	
Tecnis ZM900	0.64±0.03	0.53±0.02	0.52±0.01	0.32±0.01	0.24±0.01	
<i>F</i>	1.038	0.996	1.939	394.168	201.759	
<i>P</i>	0.359	0.374	0.150	<0.001	<0.001	

3 讨论

目前市场上可供选择的非球面 IOL 种类繁多,包括 -0.27、-0.20、-0.18、0 μ m 等多种设计理念的非球面 IOL,使个性化植入成为可能^[5]。从理论上讲,植入非球面 IOL 后,角膜和 IOL 的像差可以得到相互补偿,从而获得最佳视觉质量^[6]。临床观察发现,白内障术后 IOL 的稳定性可发生变化,如术后晶状体囊袋收缩、手术因素、IOL 的不对称植入、后囊破裂等引起的 IOL 倾斜和偏心,均可对 IOL 的稳定性造成不可忽视的影响^[7]。目前测量 IOL 偏心多采用 Scheimpflug 像法^[8]和 Purkinje 像法^[9],但两者的准确性和一致性较差。此外,临床试验中倾斜和偏心值是

相对于视轴,由于 kappa 角等因素的存在,视轴并不一定是从瞳孔中心通过,结果与实际情况存在差异,因此如何客观地评价不同类型 IOL 离体状态下倾斜和偏心引起的光学成像质量也是一个关键问题。

从物理光学的角度出发,实际波前与理想波前的差异即为波前像差(wavefront aberration)^[10],其已成为研究人眼视网膜成像质量诊断和评价的有效手段。波前像差信息的输出有多种方式,如视网膜点扩展函数(point spread function, PSF)、相位传递函数(phase transfer function, PTF)、波前像差图、MTF 和 Zernike 多项式等,其中后两者最为常用^[11-12]。MTF 值描述的是 MTF 曲线在空间频率到

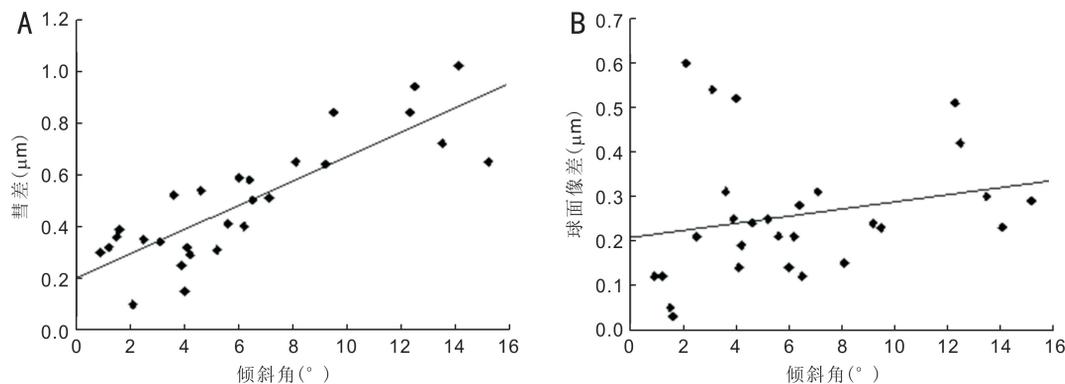


图4 Tecnis ZA9003 IOL 倾斜度数与高阶像差的相关性 A:倾斜度与彗差的相关性;B:倾斜度与球面像差的相关性。

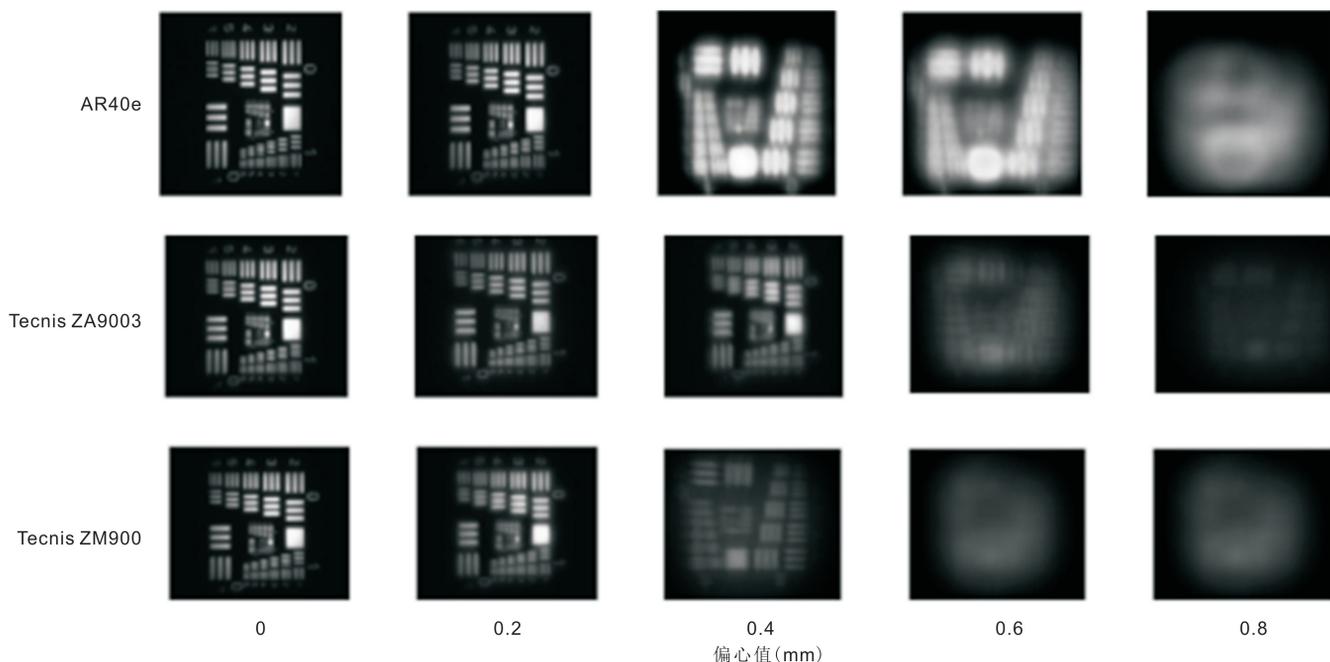


图5 三种 IOL 在不同偏心程度下的成像质量。

达该频率值时,就会到达分辨率极限,是评价光学成像质量的客观指标,不受主观因素(对比敏感度)的干扰。MTF 值越大,成像质量越清晰,视网膜成像质量越好,能够客观地反映 IOL 眼整个屈光系统的光学成像质量^[13]。PSF 反映一个光点投射到视网膜上后发生的光强度和位置的偏差,是通过形成的光斑面积大小和光斑光强度对成像质量进行评估^[14]。本研究采用 MTF 值客观评价光学成像质量,发现 MTF 值随着倾斜度数的增加而减小,倾斜 5° 以内, Tecnis ZA9003 的 MTF 值高于 AR40e,但是倾斜 10°、15°、20° 时 Tecnis ZA9003 的 MTF 值明显低于 AR40e。偏心 0~0.4mm 时三种 IOL 的 MTF 值无统计学差异,而偏心 0.6~0.8mm 时三种 IOL 的 MTF 值有显著差异。IOL 光学测试系统测量的 1951 USAF 测试靶的成像质量结果显示,随着偏心值增加成像质量逐渐下降, Tecnis ZM900 偏心大于 0.4mm 时成像质量明显下降,而偏心大于 0.6mm 时 AR40e 较 Tecnis ZA9003 成像质量清晰。Holladay 等^[15]研究表明,非球面 IOL 的倾斜度需小于 7°,而偏心量小于 0.4mm 状态下可获得比传统球面 IOL 更好的视觉质量。Piers 等^[16]采用接近生理的人眼模型研究发现,倾斜和偏心值分别为 10° 和 0.8mm, Tecnis ZA9003 非球面 IOL 的视觉质量低于球面 IOL。而本研究结果显示,倾斜度需小于 5°,而偏心量应小于 0.4mm 时非球面 IOL 才能获得比球

面 IOL 更好的光学成像质量。

Oshika 等^[17]研究表明, IOL 倾斜程度与彗差呈正相关。Atchison^[18]也指出,非球面 IOL 发生倾斜或偏心,人眼彗差和散光会增大,导致视觉质量下降。本研究结果显示, Tecnis ZA9003 IOL 的倾斜角与彗差之间呈显著正相关,与球面像差无显著相关性,与上述研究结果基本一致。Tecnis ZA9003 具有 $-0.27\mu\text{m}$ 负球差,倾斜后更容易影响视觉质量,可能原因是负球差 IOL 倾斜和偏心可引入新的像差导致眼内总高阶像差增加。本研究选择的三种 IOL 全长、折射率和材料等较为相近。AR40e 是球面 IOL,而 Tecnis ZA9003 和 Tecnis ZM900 是负球差 $-0.27\mu\text{m}$ 非球面单焦点和衍射型多焦点 IOL,可排除倾斜和偏心以外的相关因素。有研究利用光学人眼模型眼研究 IOL 倾斜与偏心对高阶像差的影响,实验表明瞳孔大小为最大的影响因素(54.9%),其次为 IOL 偏心(22.7%)、模型眼自身因素(16.6%)、IOL 倾斜角度(5.7%)^[3]。Pieh 等^[19]体外研究表明,当瞳孔直径较小时(3.0mm), IOL 倾斜和偏心对视觉质量影响不大。因此本研究设定 5.0mm 的人工瞳孔,发现三种 IOL 倾斜和偏心与光学成像质量各指标之间具有一定的相关性,非球面 IOL 一定范围内的倾斜和偏心不会显著降低光学成像质量。

综上所述,本研究表明,具有 $-0.27\mu\text{m}$ 球差的非球面 IOL

倾斜度小于 5° ,偏心小于0.4mm内会获得比球面IOL更好的光学成像质量。Tecnis ZM900 IOL偏心大于0.4mm时较球面和非球面单焦点IOL的光学成像质量降低。本研究首次于实验室搭建Hartmann-Shack IOL波前像差光路系统离体测试和分析不同类型IOL偏心 and 倾斜对光学成像质量的影响,无需受试者主观参与,实验结果客观,具有较高的重复性、稳定性和创新性。但本研究仅初步离体测试和分析不同类型IOL在倾斜和偏心下的光学成像质量,还有待进一步深入研究。在以后的研究中,我们考虑综合手术、个体变异性、后房深度偏差、瞳孔等各种因素以及联合主观问卷调查、波前像差仪、对比敏感度等检查结果,对各种IOL的成像质量和光学特性做出更加精确、客观的研究和整合评价。

参考文献

- 1 杨光耀, 张佳晴, 罗莉霞. 白内障术后前房深度的变化对术后屈光漂移的影响. 国际眼科杂志 2019; 19(10): 1676-1678
- 2 刘彧琦, 王静, 张劲松. 非恒定像差非球面人工晶状体的研究现状与进展. 国际眼科杂志 2019; 19(2): 248-251
- 3 McKelvie J, McArdle B, McGhee C. The influence of tilt, decentration, and pupil size on the higher-order aberration profile of aspheric intraocular lenses. *Ophthalmology* 2011; 118(9): 1724-1731
- 4 Das KK, Werner L, Collins S, et al. In vitro and schematic model eye assessment of glare or positive dysphotopsia-type photic phenomena: Comparison of a new material IOL to other monofocal IOLs. *J Cataract Refract Surg* 2019; 45(2): 219-227
- 5 Lasta M, Miháľtz K, Kovács I, et al. Effect of Spherical Aberration on the Optical Quality after Implantation of Two Different Aspherical Intraocular Lenses. *J Ophthalmol* 2017; 2017: 8039719
- 6 马瑶, 马忠旭, 高原, 等. 高阶像差及散射光对非球面IOL眼视网膜成像质量的影响. 中华实验眼科杂志 2016; 34(3): 254-259
- 7 张绍阳, 李莉. 白内障术后晶状体前囊膜收缩对人工晶状体偏心的影响. 国际眼科杂志 2019; 19(9): 1583-1585

- 8 Kirgiz A, Atalay K, Kaldirim H, et al. Scheimpflug camera combined with placido-disk corneal topography and optical biometry for intraocular lens power calculation. *Int Ophthalmol* 2017; 37(4): 781-786
- 9 Kumar DA, Agarwal A, Madhivanan N, et al. Dynamic tracking of Purkinje images for the comparison of pseudophakodonesis between in-the-bag and secondary fixated intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2018; 44(4): 479-486
- 10 Jiang L, Zhang X, Fang F, et al. Wavefront aberration metrology based on transmitted fringe deflectometry. *Appl Opt* 2017; 56(26): 7396-7403
- 11 Larry N. Calculation of the geometrical point-spread function from wavefront aberrations. *Ophthalmic Physiol Opt* 2019; 39(4): 232-244
- 12 Hart M, Milton NM, Baranec C, et al. A ground-layer adaptive optics system with multiple laser guide stars. *Nature* 2010; 466(7307): 727-729
- 13 Ortiz C, Esteve-Taboada JJ, Belda-Salmerón L, et al. Effect of Decentration on the Optical Quality of Two Intraocular Lenses. *Optom Vis Sci* 2016; 93(12): 1552-1559
- 14 Pérez-Vives C, Ferrer-Blasco T, García-Lázaro S, et al. Optical quality comparison between spherical and aspheric toric intraocular lenses. *Eur J Ophthalmol* 2014; 24(5): 699-706
- 15 Holladay JT, Piers PA, Koranyi G, et al. A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eyes. *J Refract Surg* 2002; 18(6): 683-691
- 16 Piers PA, Weeber HA, Artal P, et al. Theoretical comparison of aberration-correcting customized and aspheric intraocular lenses. *J Refract Surg* 2007; 23(4): 374-384
- 17 Oshika T, Sugita G, Miyata K, et al. Influence of tilt and decentration of scleral-sutured intraocular lens on ocular higher-order wavefront aberration. *Br J Ophthalmol* 2007; 91(2): 185-188
- 18 Atchison DA. Design of aspheric intraocular lenses. *Ophthalmic Physiol Opt* 2010; 11(2): 137-146
- 19 Pieh S, Fiala W, Malz A, et al. In vitro strehl ratios with spherical, aberration-free, average, and customized spherical aberration-correcting intraocular lenses. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2009; 50(3): 1264-1270