

轴向球差渐进调制型非球面人工晶状体 成像质量实验研究

田 琨, 张 斌*, 刘丹岩, 刘晓丽, 任韬冉, 梁 爽

(河北医科大学第二医院眼科, 河北 石家庄 050000)

[摘要] 目的 通过对轴向球差渐进调制型非球面人工晶状体(intraocular lens, IOL)、负球差非球面 IOL、零球差非球面 IOL、球面 IOL 4 种不同球差的 IOL 植入模型眼中, 研究其对偏心的耐受性及成像规律。方法 分别在瞳孔直径 3 mm 和 5 mm 条件下, 模型眼中植入 4 种类型、不同球差的 IOL, 评估计算机光学模拟系统中, 4 种 IOL 分别居中及偏心 0.25 mm、0.5 mm、0.75 mm 其调制传递函数(modulation transfer function, MTF)值及成像质量的实验研究。结果 在 3 mm 瞳孔直径和 5 mm 瞳孔直径时, 居中及随着偏心增加时, 轴向球差渐进调制型非球面 IOL MTF 值较其他 3 种 IOL 高。结论 轴向球差渐进调制型非球面 IOL 对偏心有较好的耐受性, 同时具有较好的成像质量。

[关键词] 白内障; 人工晶状体; 角膜 doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2025.09.011

[中图分类号] R776.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1007-3205(2025)09-1059-05

Experimental study on imaging quality of the axial spherical aberration gradient-modulated aspheric intraocular lens

TIAN Kun, ZHANG Bin*, LIU Dan-yan, LIU Xiao-li, REN Tao-ran, LIANG Shuang

(Department of Ophthalmology, the Second Hospital of Hebei Medical University,
Shijiazhuang 050000, China)

[Abstract] **Objective** To explore the tolerance and imaging rule in decentration of axial spherical aberration gradient-modulated aspheric intraocular lens (IOL), negative spherical aberration aspheric IOL, zero spherical aberration aspheric IOL and spheric IOL in the model eyes. **Methods** Under the condition of 3 mm and 5 mm pupil diameter, four types of IOL with different spherical aberrations—when centered and decentered by 0.25 mm, 0.5 mm and 0.75 mm respectively—were implanted in the model eyes, respectively. The four types of IOLs were evaluated at the influence of the modulation transfer function (MTF) and the image quality in the computer optical simulation system. **Results** At 3 mm and 5 mm pupil diameters, in the centered position and with the increase of decentration, the MTF value of axial spherical aberration gradient-modulated aspheric IOL was higher than that of the other three types of IOLs. **Conclusion** Axial spherical aberration gradient-modulated aspheric IOL has good tolerance to decentration, and good imaging quality.

[Key words] cataract; intraocular lens; cornea

[收稿日期] 2024-05-04

[基金项目] 河北省自然科学基金京津冀基础研究合作专项项目 (H2023206907)

[作者简介] 田琨(1989-), 女, 河北石家庄人, 河北医科大学第二医院主治医师, 医学硕士, 从事眼科疾病诊治研究。

* 通信作者。E-mail: 1003695459@qq.com

随着患者对白内障术后视觉质量关注的增加, 人工晶状体(intraocular lens, IOL)在设计和材料的方面精进, 白内障手术已不再是以往的复明手术, 白内障手术纳入屈光手术范畴^[1]。白内障术后患者角膜和 IOL 是眼睛的主要屈光介质, 其中角膜具有正球差, 球面 IOL 同样具有正球差, 非球面 IOL 具有负球差, 可以抵消角膜正球差。同时, 非球面 IOL

的设计可以完全抵消角膜正球差^[2],提高患者视觉质量^[3],但全矫球差的非球面 IOL 偏心对成像质量影响较大^[4],不同程度保留球差的 IOL 能减小 IOL 偏心对成像质量的影响,但残留较多的球差又在一定程度影响患者术后的视觉质量。患者个体差异的存在,晶状体囊袋大、悬韧带松弛等情况都可能造成 IOL 不同程度的倾斜或偏心,通过进一步优化球差设计提高成像质量以及对偏心误差的耐受性成为 IOL 研制及广泛应用新的方向^[7],因此,本研究旨在研究偏心的耐受性的影响因素及成像规律。

1 资料与方法

1.1 模型眼的建立 采用 Hwey-Lan Liou 模型眼^[5-6] 使用 Zemax 光学设计软件(ZEMAX Development Corporation, Bellevue, USA)在模型眼角膜顶点后 4.5 mm^[8-10] 后分别插入 22.0D PRS60A { 蕾明视康公司, 中国, 专利号为 CN201811301451.3[P] } 轴向球差渐进调制型非球面 IOL, IOL 光学特征为前后表明曲率半径分别为 9.54 mm 和 -25 mm, 非球面系数 $Q_n = 5.227 \times y_n^3 - 20.16 \times y_n^2 - 18.01 \times y_n + 54.64$; TECNIS Z9000 (-0.27 μm) 非球面 IOL (Johnson & Johnson) 公司, 美国), IOL 光学特征为前后表明曲率半径分别为 11.043 mm 和 -11.043 mm, 非球面系数 -1.03613, 4 阶非球面系数 -9.44E-4, 6 阶非球面系数 -1.37E-5; Soffort AO (Bausch & Lomb 公司) 0 μm 非球面 IOL, IOL 光学特征为前后表明曲率半径分别为 7.285 mm 和 -9.47 mm, 非球面系数 -1.086; Acrysof SA60AT 球面 IOL, IOL 光学特征为前后表明曲率半径分别为 19.22 mm 和 -19.22 mm。

各 IOL 模型都在 550 nm 波长^[11] 以及 3 mm 瞳孔直径条件下, 波前像差离焦项为 0, 自动优化计算 IOL 后表面顶点到视网膜像面的距离, 使模型眼外平行于光轴的光线准确汇聚于视网膜像面^[12]。在此条件下评价不同瞳孔直径和偏心时 IOL 的成像质量。

1.2 方法 在光学模拟系统中分析轴向球差渐进调制型非球面 IOL, -0.27 μm 非球面 IOL, 0 μm 非球面 IOL 和球面 IOL 分别在瞳孔直径 3 mm, 5 mm 条件下居中以及偏心 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 并计算各条件下计算模型眼调制传递函数(modulation transfer function, MTF)的变化。

2 结果

2.1 3 mm 瞳孔直径 3 mm 瞳孔直径条件下, IOL 居中时, 轴向球差渐进调制型非球面 IOL, TECNIS Z9000 IOL, Soffort AO IOL, Acrysof SA60AT IOL 4 种 IOL 在各空间频率 MTF 值都非常接近且与低空间频率时 MTF 值相差不大。当偏心 0.25 mm 时, 随着空间频率的增高, 4 种 IOL 均降低且与居中时相差不大, 都保持了较好的成像质量, 只有 TECNIS Z9000 IOL 在较高空间频率时较其他 3 种 IOL MTF 值略低。当偏心 0.5 mm 时, 轴向球差渐进调制型非球面 IOL, Soffort AO IOL, Acrysof SA60AT IOL 3 种 IOL 的 MTF 值随空间频率的增加较居中时略有下降, TECNIS Z9000 IOL 随着空间频率的增加 MTF 值下降较其他 3 种 IOL 明显。当偏心 0.75 mm 时, 4 种 IOL MTF 值随着空间频率增加均有所下降, 其中 TECNIS Z9000 IOL 的 MTF 明显低于其他 3 种 IOL, 并且 4 种 IOL MTF 值下降较偏心 0.5 mm 时稍多(图 1)。

2.2 5 mm 瞳孔直径 5 mm 瞳孔直径条件下, IOL 居中时, 4 种 IOL 的 MTF 值均降低, 且较 3 mm 瞳孔直径时也有下降, 在高空间频率时尤为明显, 其中 PRS60A IOL 和 TECNIS Z9000 IOL 下降较另外 2 种 IOL 下降平缓, TECNIS Z9000 IOL 在各空间频率中 MTF 值均较其他 3 种 IOL 高, PRS60A IOL 的 MTF 高于另外 2 种 IOL。当偏心 0.25 mm 时, 4 种 IOL 的 MTF 值随着空间频率增加逐渐降低, 趋势大致相同, PRS60A IOL 和 TECNIS Z9000 IOL 2 种 IOL 较另外 2 种 IOL Soffort AO IOL 和 Acrysof SA60AT IOL 在不同空间频率的 MTF 值较高。当偏心 0.5 mm 时, 虽然四种 IOL MTF 值随着空间频率增高而降低, 但是 TECNIS Z9000 IOL 的 MTF 值随着空间频率的增加出现明显降低, 在中高空间频率低于其他 3 种 IOL, 其中 PRS60A IOL 的 MTF 值较另外 2 种 IOL 高且保持了较为稳定的 MTF 值。当偏心 0.75 mm 时, 随着空间频率的增高, 虽然 4 种 IOL 的 MTF 值随着空间频率的增加降低, 但是 PRS60A IOL, Soffort AO 非球面 IOL, 这 2 种 IOL 在 4 种 IOL 中 MTF 值较高, 与偏心 0.5 mm 时在高空间频率时持平, 此时 TECNIS Z9000 IOL 随着空间频率的增加 MTF 值明显降低, 同时较偏心 0.5 mm 时更加明显(图 2)。

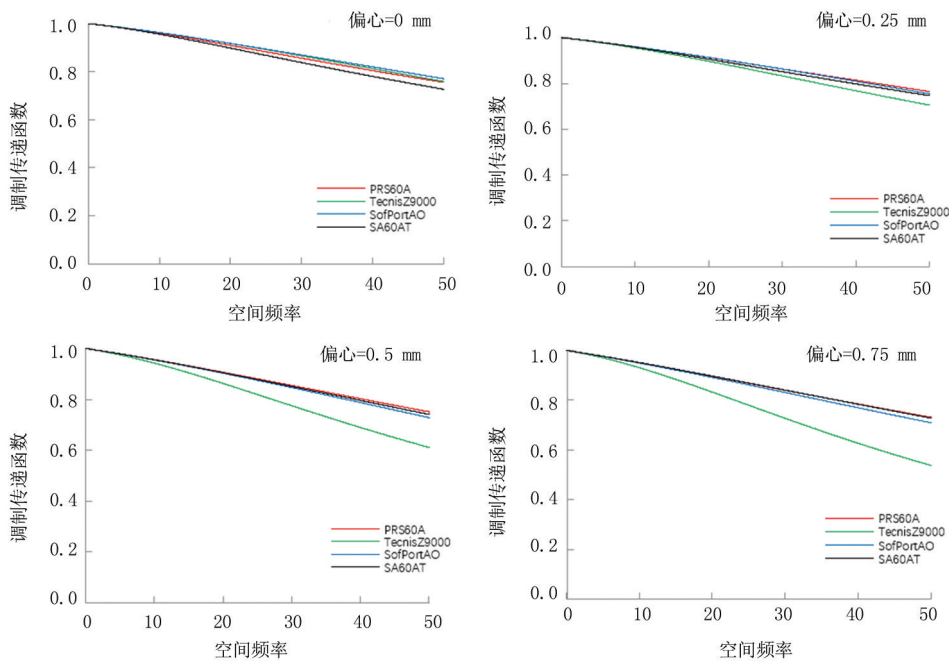


图1 4种IOL在3mm瞳孔条件下居中及偏心时MTF值比较

Figure 1 Comparison of MTF values of four types of IOLs in centered and decentered positions under 3 mm pupil condition

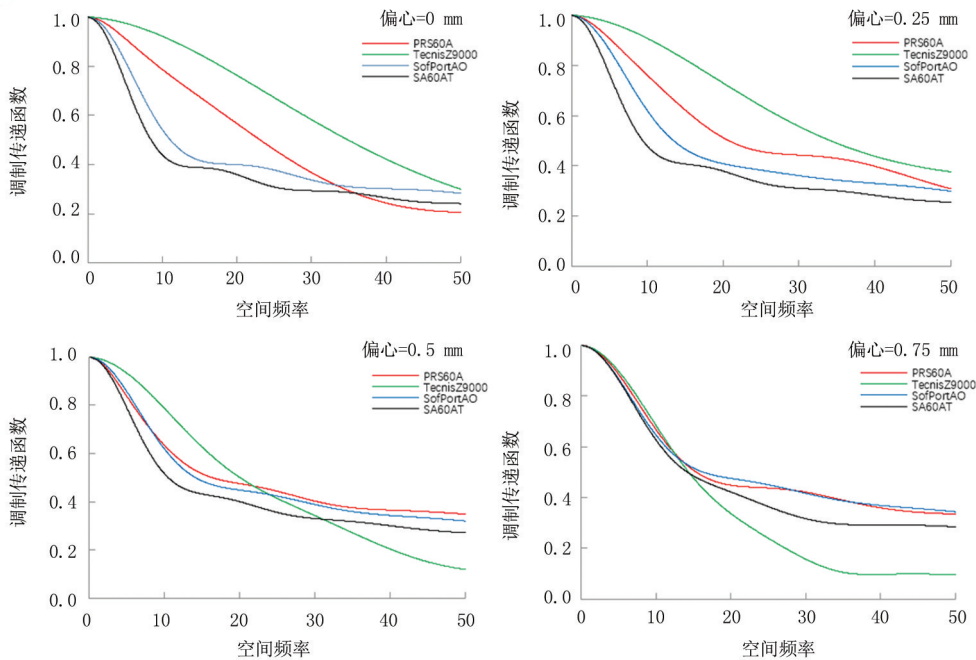


图2 4种IOL在5mm瞳孔条件下居中及偏心时MTF值比较

Figure 2 Comparison of MTF values of four types of IOLs in centered and decentered positions under 5 mm pupil condition

3 讨论

应用全矫球差的IOL可以提高视觉质量,但同时提出如果偏心 >0.5 mm其成像质量低于球面IOL。球面IOL由于带来正球差所导致的全眼像差增加,成像质量低于非球面IOL,但其表现出对偏心误差较好的耐受性。不同球差的非球面IOL能有效抵消角膜球差,提高人眼视觉质量,但球差的残

留在暗光瞳孔较大的条件下降低IOL眼的成像质量,其中零球差的IOL设计能提高IOL成像质量对偏心的耐受性^[13]。不同球差设计的IOL在抵消角膜球差的同时也在努力提高IOL在复杂条件下的抗误差性能^[14-15]。

国内外多项研究表明,个体角膜因使用测量设备的不同和角膜本身存在的个体差异,球差相差较大。Şahin等^[11]测量角膜球差 $0.155\ \mu\text{m}$ 和 $0.176\ \mu\text{m}$;Zou等^[16]测量高阶角膜相差分别为

(0.40 ± 0.08) μm 和 (0.41 ± 0.09) μm ; 潘雪珂等^[17] 测量青少年角膜球差低度近视组, 中度近视组和重度近视平均球差分别为 (0.43 ± 0.02) μm 、(0.40 ± 0.01) μm 、(0.39 ± 0.0) μm ; 潘苏琦等^[18] 测量角膜高阶像差中, 球差中值为 $0.248 \mu\text{m}$ (范围为 $0.006 \sim 1.081 \mu\text{m}$)。李婧等^[19] 使用 iTrace 测量 2 308 例 3 mm 初级球差 (0.21 ± 0.011) μm ($0.005 \sim 0.038 \mu\text{m}$)。由于瞳孔直径大小变化, 所对应的角膜光学区直径不同, 球面像差既与光学面的球面状态有关, 也受光阑通光孔径的影响。瞳孔直径较小时, 对应角膜区域较小, 带来的球差也很小, 在暗光条件下, 瞳孔直径增大, 角膜通光区域增大, 才带来较多的球差^[12-22]。非恒定像差非球面 IOL 是指从晶状体的中心到周边部球差值不断变化, 晶状体中心部接近零球差设计, 距中心 1.5 mm 以外负球差逐渐增大^[23]。非恒定球差的设计使 IOL 具有更好的对偏心和倾斜的耐受性, 瞳孔增大时周边光学区产生适量的负球差抵消角膜球差提高成像质量, 同时对倾斜和偏心有较好的耐受性。

本研究采用轴向球差渐进调制型非球面 IOL, 是光学面沿光轴方向建立了渐进调制的球差分布。根据人眼角膜球差在不同瞳孔直径下的差异, 预留极少量的残余球差, 在 3 mm 瞳孔直径, 剩余球差为 $0 \mu\text{m}$ 。MTF 曲线数值较高, 成像质量很好, 由于角膜和 IOL 3 mm 区域的自身球差都很小, 因此虽各 IOL 均有较好的成像质量, 但成像质量低于 PRS60A, 轴向球差渐进调制型非球面 IOL, 其在 1.5~3 mm 内曲率变化比较平缓, 3 mm 区域内晶状体自身球差极小, 外部区域变化较陡, 5 mm 瞳孔直径下, 剩余球差均为 $+0.07 \mu\text{m}$ 。3 mm 区域内晶状体自身球差极小, 5 mm 区域则提供了较大的负球差, 在瞳孔直径增大时可以有效抵消角膜球差, 中央区的低球差设计, 在居中时比零球差和球面晶体更好的成像质量, MTF 低于全矫球差的 IOL, 存在不同程度偏心时同时较大面积中央区接近零球差的结构可以提供较好的抗偏心性, 保持成像质量的稳定。但全矫球差的 IOL 在偏心时残余球差较大。白内障患者的眼部个体差异较大, kappa 角 (κ) 的存在使 IOL 处于光轴偏离的状态, 瞳孔偏心使 IOL 光学区暴露不对称、晶状体囊袋大或松弛、悬韧带松弛部分断裂等情况都可能造成 IOL 不同程度的倾斜或偏心。研究表明晶状体囊带也是白内障术后 IOL 居中或者偏心的重要因素之一, 白内障术后囊带纤维化影响 IOL 的稳定性^[24]。Fu 等^[25] 收集 29 例患者 (57 眼) 行白内障手术, 术后表明 Kappa 角较

大会影响患者术后的视觉质量^[26]。当瞳孔中心发生明显移位 κ 也会发生变化, IOL 偏心, 此时视网膜上光分布会更加不平衡, 从而影响患者夜间视觉质量^[27], 表明瞳孔偏心影响 IOL 植入后患者的视觉质量, 可能造成 IOL 偏心的因素。改进 IOL 光学设计使其更好的抵消角膜球差, 同时提高对误差的耐受性有利于使白内障患者术后获得更好的视功能。

轴向球差渐进调制型非球面 IOL 是目前国内外的临床研究较少, 轴向球差渐进调制型非球面 IOL 植入术后抗偏心效果尚待进一步研究和观察。

[参考文献]

- [1] 王君慧, 管怀进, 季敏. 多焦点人工晶状体研究进展[J]. 眼科新进展, 2023, 43(8): 651-655.
- [2] Thakur A, Adiga S, Malhotra C, et al. Effect of decentration on the quality of vision in two aspheric posterior chamber intraocular lenses: A contralateral eye study[J]. Indian J Ophthalmol, 2024, 72(4): 558-564.
- [3] Alarcon A, Canovas C, Koopman B, et al. Optical bench evaluation of the effect of pupil size in new generation monofocal intraocular lenses[J]. BMC Ophthalmol, 2023, 23(1): 112.
- [4] Ren Z, Liu X, Zhang Y, et al. Laboratory evaluation of optical performance of aspheric monofocal intraocular lenses with various anti-misalignment designs under the influence of decentration and tilt[J]. J Refract Surg, 2023, 39(7): 446-455.
- [5] 张斌, 马景学, 刘丹岩, 等. Hwey-Lan Liou 模型眼中 Toric 人工晶状体旋转对成像质量的影响[J]. 中华实验眼科杂志, 2017, 35(3): 239-242.
- [6] 张斌, 刘丹岩, 杜颖华, 等. 复曲面人工晶状体个性化模型眼成像质量的优化[J]. 中华实验眼科杂志, 2016, 34(4): 352-356.
- [7] Wang Q, Stoakes IM, Moshirfar M, et al. Assessment of pupil size and angle kappa in refractive surgery: A population-based epidemiological study in predominantly american caucasians[J]. Cureus, 2023, 15(8): e43998.
- [8] Zhang B, Ma JX, Liu DY, et al. Optical performance of toric intraocular lenses in the presence of decentration[J]. Int J Ophthalmol, 2015, 8(4): 730-735.
- [9] Tong L, Li T, Zhang Q, et al. LiViT-Net: A U-Net-like, lightweight Transformer network for retinal vessel segmentation[J]. Comput Struct Biotechnol J, 2024, 24: 213-224.
- [10] Kurosaka D, Hashizume K, Oshima H, et al. Disappearance of lens epithelial cells detected at the treatment of intraocular lens dislocation 12 months after cataract surgery: A case report[J]. Am J Ophthalmol Case Rep, 2024, 36: 102164.
- [11] Şahin R, Aslan MG. Corneal aberrations are associated with low-energy meniscus injuries[J]. BMC Ophthalmol, 2024, 24(1): 328.
- [12] 张斌, 刘丹岩, 柴茜楠, 等. 偏心和旋转对非球面 Toric 人工晶

- 状体成像质量影响的实验研究[J].中华眼视光学与视觉科学杂志,2018,20(1):19-25.
- [13] Lacort M, Pérez-Gracia J, Ares J, et al. Optical quality variation of different intraocular lens designs in a model eye: Lens placed correctly and in an upside-down position [J]. *Ophthalmic Res*,2023,66(1):757-766.
- [14] McCabe CM, Peterson R, Hull J, et al. Impact of aspheric monofocal intraocular lens implantation on uncorrected intermediate visual acuity: A combined analysis [J]. *Clin Ophthalmol*,2024,18:1491-1501.
- [15] 刘建东,刘航宇,朱方兴,等.两种单焦点人工晶状体经睫状体平坦部巩膜缝线固定术后视觉质量的比较[J].中华眼视光学与视觉科学杂志,2022,24(10):773-778.
- [16] Zou H, Wei X, Li L, et al. Comparison of objective visual quality between SMILE and FS-LASIK in moderate-to-high myopia[J]. *Front Med (Lausanne)*,2024,11:1408516.
- [17] 潘雪珂,陆强.不同程度近视患者行 SMILE 术后的有效光学区及角膜高阶像差比较[J].国际眼科杂志,2024,24(7):1157-1161.
- [18] 潘苏琦,姚红艳,袁建树,等.应用 iTrace 视功能分析仪测量白内障人群高阶像差的研究[J].现代实用医学,2024,36(6):800-803.
- [19] 李婧,熊瑛,曹凯,等.正常人眼角膜高阶像差的分布及其与年龄的相关性;邯郸眼病研究[J].眼科,2022,31(4):292-296.
- [20] Fang X, Xue W, Yu C, et al. Correlation between pupillary size and depth of focus after the implantation of extended depth of focus intraocular lenses[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*,2024,262(12):3897-3903.
- [21] Ladi JS, Gaikwad A, Shah NA. Comparative study of small incision refractive lenticule extraction with 5 mm versus 6.5 mm optic zone for myopia[J]. *Indian J Ophthalmol*,2023,71(7):2717-2721.
- [22] Ashena Z, Gallagher S, Naveed H, et al. Comparison of anterior corneal aberrometry, keratometry and pupil size with scheinpflug tomography and ray tracing aberrometer [J]. *Vision (Basel)*,2022,6(1):18.
- [23] Borkenstein AF, Borkenstein EM. Long-term clinical results and scanning electron microscopic analysis of the aspheric, hydrophobic, acrylic intraocular lens CT LUCIA 611P(Y)[J]. *Clin Ophthalmol*,2018,12:1219-1227.
- [24] 张帆,张健.人工晶状体囊袋复合体对白内障术后人工晶状体位置的影响[J].临床眼科杂志,2024,32(1):41-45.
- [25] Fu Y, Kou J, Chen D, et al. Influence of angle kappa and angle alpha on visual quality after implantation of multifocal intraocular lenses[J]. *J Cataract Refract Surg*,2019,45(9):1258-1264.
- [26] Chandra KK, Malhotra C, Jain AK, et al. Effect of decentration on the quality of vision; comparison between aspheric balance curve design and posterior aspheric design intraocular lenses[J]. *J Cataract Refract Surg*,2022,48(5):576-583.
- [27] 李彦青,李立,伍先慧.Kappa角在眼科手术中的临床应用及研究进展[J].国际眼科杂志,2023,23(5):778-782.

(本文编辑:何祯)