

轴向球差渐进调制型非球面 IOL 在模型眼中的成像质量及抗偏心性能

张斌 任韬冉 武嘉慧 李旻昊 刘丹岩 刘晓丽 耿玉欣

河北医科大学第二医院眼科, 石家庄 050000

通信作者: 张斌, Email: z1003695459@139.com

【摘要】 **目的** 探讨轴向球差渐进调制型非球面人工晶状体(IOL)在模型眼中的成像质量及抗偏心性能。**方法** 采用基于光学模拟软件的光线追踪法,在模型眼中分别评价轴向球差渐进调制型 PRS60A、球差为 $-0.27\ \mu\text{m}$ 的 Tecnis Z9000、球差为 $0\ \mu\text{m}$ 的 SofPort AO 和球面 SA60AT IOL 4 种 IOL 在居中及偏心情况下的成像质量。设定瞳孔直径分别为 3.0、4.0 和 5.0 mm, IOL 偏心量分别为 0、0.25、0.50、0.75 mm, 计算并绘制各条件下的调制传递函数(MTF)曲线。对每种 IOL 分别进行 1 000 次随机偏心模拟, 偏心量为 0~0.5 mm, 对模拟结果进行蒙特卡洛分析。**结果** 在 3.0、4.0 和 5.0 mm 瞳孔直径条件下, Tecnis Z9000 IOL 居中时 MTF 值最高, 成像质量最佳; 当偏心量 $>0.50\ \text{mm}$ 时, 其 MTF 值明显下降, 成像质量显著降低。PRS60A IOL 在各瞳孔直径条件下居中和偏心时成像质量多数情况下优于 SofPort AO 和 SA60AT IOL。蒙特卡洛分析显示, PRS60A IOL 的术后效果具有较好的可重复性和可预测性, 总体成像质量优于恒定球差型 IOL。**结论** 在模型眼中, 轴向球差渐进调制型非球面 IOL 较恒定球差型 IOL, 具有较好的成像质量及更强的偏心误差耐受性。

【关键词】 白内障; 人工晶状体; 偏心; 调制传递函数; 成像质量; 模型

基金项目: 河北省医学科学研究课题计划 (20230512)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20240531-00139

Imaging quality and anti-eccentricity performance of axial modulation aspherical intraocular lens in model eyes

Zhang Bin, Ren Taoran, Wu Jiahui, Li Minhao, Liu Danyan, Liu Xiaoli, Geng Yuxin

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

Corresponding author: Zhang Bin, Email: z1003695459@139.com

【Abstract】 Objective To investigate the imaging quality and anti-eccentricity performance of axial modulation aspherical intraocular lens (IOL) in model eyes. **Methods** A ray-tracing program of optical simulation software was used to evaluate the imaging quality of four different IOLs, including PRS60A IOL, Tecnis Z9000 with $-0.27\ \mu\text{m}$ spherical aberration aspherical IOL, SofPort AO with $0\ \mu\text{m}$ spherical aberration aspherical IOL and SA60AT spherical IOL under the condition of either centration or decentration. Modulation transfer functions (MTF) under pupil diameters of 3.0, 4.0, and 5.0 mm and IOL decentrations of 0, 0.25, 0.50, and 0.75 mm were calculated and plotted. A Monte Carlo analysis was performed after 1 000 simulations of IOL decentration, ranging from 0 to 0.5 mm, randomly conducted for every IOL. **Results** Under 3.0, 4.0, and 5.0 mm pupil diameters, the centered Tecnis Z9000 IOL had the highest MTF value and the best imaging quality, and when the eccentricity was greater than 0.50 mm, the MTF value decreased significantly, and the imaging quality was significantly reduced. In most cases, the PRS60A IOL was superior to the SofPort AO and SA60AT IOLs when centered and eccentric at various pupil diameters. Monte Carlo analysis showed that the postoperative effects of PRS60A IOL were relatively repeatable and predictable, and the overall imaging quality was better than that of a fixed spherical aberration IOL. **Conclusions** Compared with the fixed spherical aberration IOL, the progressive modulation type aspheric IOL of axial spherical aberration has better imaging quality and tolerance to eccentricity errors in model eyes.

【Key words】 Cataract; Intraocular lens; Decentration; Modulation transfer function; Optical performance; Modelling

Fund program: Hebei Province Medical Science Research Project Plan (20230512)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20240531-00139

随着研究者对白内障术后视觉质量关注的提升,人工晶状体 (intraocular lens, IOL) 在设计和材料方面不断改进,白内障手术已不再是传统意义上的复明手术,而是进入了屈光手术范畴^[1]。非球面 IOL 设计可抵消角膜正球差,提高患者视觉质量,但全矫球差的非球面 IOL 偏心对成像质量影响较大,不同程度保留球差的 IOL 虽能降低 IOL 偏心对成像质量的影响,但残留较多的球差又会在一定程度上影响患者术后视觉质量^[2-4]。患者角膜球差的个体差异、Kappa 角的存在、晶状体囊袋偏大、悬韧带松弛等情况都可能造成 IOL 不同程度的倾斜或偏心^[5-7]。通过进一步优化 IOL 设计,提高成像质量及对偏心误差的耐受性,已成为 IOL 研发的新方向。轴向球差渐进调制型非球面人工晶状体 (axial modulation aspherical intraocular lens, AMasph IOL) 为非恒定球差新型光学设计,旨在抵消角膜球差的同时进一步增强 IOL 的抗偏心性能。本研究拟采用计算机光学模拟技术,在模型眼中评估 AMasph IOL 在居中及偏心状态下的成像质量,并与采用不同恒定球差设计的 IOL 进行比较,以期提升 AMasph IOL 的成像质量提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 模型眼的建立

以 Hwey-Lan Liou 精密模型眼为基础^[8],使用 Zemax 光学设计软件 (美国 ZEMAX Development 公司),在 Hwey-Lan Liou 模型眼角膜顶点后分别插入 22.0 D 的 PRS60A IOL (专利号:CN201811301451.3 [P],无锡蕾明视康科技有限公司)、球差为 $-0.27 \mu\text{m}$ 的 Tecnis Z9000 IOL (美国 Johnson&Johnson 公司)、球差为 $0 \mu\text{m}$ 的 SofPort AO IOL (美国 Bausch&Lomb 公司) 和球面 SA60AT IOL (美国 Alcon 公司) 4 种 IOL 数据 (表 1)^[9],所有 IOL 前表面距离角膜顶点 4.5 mm ^[10-11],光学模拟环境采用复色光多波长设置,波长分别为 470、510、555、610 和 650 nm,各波长权重系数分别为 0.091、0.503、1.000、0.503 和 0.017,在 3.0 mm 瞳孔直径条件下,以 Zernike 多项式离焦项为 0 D 为目标,自动优化并计算 IOL 后表

面顶点至像面的距离,模拟正视眼状态^[12],以获得最佳成像质量,并在此眼轴长度条件下,评价不同瞳孔直径和不同偏心量对 IOL 成像质量的影响。

1.2 成像质量及抗偏心性能评估

在模型眼中分别模拟瞳孔直径为 3.0、4.0、5.0 mm 条件下 PRS60A、Tecnis Z9000、SofPort AO 和球面 SA60AT IOL 居中及偏心 0.25、0.50、0.75 mm 的状态,采用 512×512 条随机光线进行光迹追踪,采用光线追迹方法计算调制传递函数 (modulation transfer function, MTF),进行光学质量评价。其次在模型眼中,分别在瞳孔直径为 3.0、4.0、5.0 mm 条件下模拟各 IOL 沿 X 轴方向随机偏心 0~0.5 mm,每种瞳孔直径条件进行 1 000 次模拟,并通过蒙特卡洛分析计算 MTF 函数变量。

2 结果

2.1 不同瞳孔直径条件下 IOL 居中和不同偏心量 MTF 的比较

在 3.0 mm 瞳孔直径条件下,当 IOL 居中时,PRS60A 和 Tecnis Z9000 IOL 均维持较高的 MTF 值。当偏心 $>0.50 \text{ mm}$ 时,Tecnis Z9000 IOL 的 MTF 值低于 PRS60A IOL,但高于 SofPort AO 和 SA60AT IOL。不同偏心状态下,PRS60A 的 MTF 值始终优于 SofPort AO 和 SA60AT IOL (图 1)。

在 4.0 mm 瞳孔直径时,4 种 IOL 的 MTF 值较 3 mm 瞳孔直径均有所降低。瞳孔居中时,Tecnis Z9000 IOL 具有最佳的 MTF;PRS60A 的 MTF 曲线在低空间频率下与 SofPort AO IOL 非常接近,在高空间频率下略优于 SofPort AO IOL。3 种非球面 IOL 的 MTF 均优于球面 IOL。当 IOL 偏心 0.50 和 0.75 mm 时,Tecnis Z9000 IOL 成像质量显著降低,MTF 值低于

表 1 球面和非球面 IOL 的光学结构
Table 1 Optical structure of spherical and aspherical IOLs

IOL 类型	屈光度 (D)	光学材料	折射率	前表面顶点半径 (mm)	前表面非球面系数	4 阶非球面系数	6 阶非球面系数	后表面顶点半径 (mm)
SA60AT IOL	+22.0	丙烯酸	1.550	19.220				-19.22
PRS60A IOL	+22.0	丙烯酸	1.489	9.540	$Q_n = 5.227 \times y_n^3 - 20.16 \times y_n^2 - 18.01 \times y_n + 54.64$			-25
Tecnis Z9000 IOL	+22.0	硅酮	1.458	11.043	-1.036 13	-9.44×10^{-4}	-1.37×10^{-5}	-11.043
SofPort AO IOL	+22.0	硅酮	1.427	7.285	-1.086			-9.47

注: Q_n 表示在径向位置 y_n 处的非球面系数, y_n 表示以 IOL 光学中心光轴到前表面某点的径向距离 IOL: 人工晶状体

Note: Q_n represented the aspheric coefficient at the radial position, and y_n represented the radial distance from the optical axis of the IOL optical center to a certain point on the anterior surface IOL: intraocular lens

其他3种IOL。在各种偏心条件下,PRS60A和SofPort AO IOL均保持相对稳定的成像质量,且PRS60A的MTF值始终优于SofPort AO IOL(图1)。

瞳孔直径增大至5.0 mm时,居中状态下Tecnis Z9000 IOL的MTF曲线略高于其他IOL;当偏心量为0.25 mm时,高空间频率下的MTF低于其他IOL;当偏心量增至0.50 mm时,其MTF值明显降低;当偏心量达到0.75 mm时,其在所有空间频率下的MTF值均低于其他IOL。在居中和不同程度偏心条件下,PRS60A IOL的MTF在多数情况下均优于SofPort AO和SA60AT IOL,但在偏心量为0.75 mm时,其高空间频率下的MTF值略低于SofPort AO IOL(图1)。

2.2 不同瞳孔直径条件下的蒙特卡洛分析

在3.0 mm瞳孔直径条件下,Tecnis Z9000 IOL最佳10%的成像质量较好,但最差10%的成像质量显著下降,二者成像质量差异较大;PRS60A和SofPort AO IOL的成像质量均较稳定,最佳10%和最差10%的成像质量接近;3种非球面IOL最差10%的成像质量均优于球面IOL最佳10%的成像质量。在4.0和5.0 mm瞳孔直径条件下,PRS60A IOL最佳10%的成像质量总体优于SofPort AO和SA60AT IOL,PRS60A

和SofPort AO IOL最差10%的成像质量优于SA60AT IOL最佳10%的成像质量。PRS60A和SofPort AO IOL的成像质量均较稳定。Tecnis Z9000 IOL最佳10%的成像质量保持了最优水平,但最差10%的成像质量低于SA60AT IOL,成像质量差异较大(图2)。

3 讨论

人眼是一个复杂的光学系统,在不同亮度光线照射下,瞳孔直径会发生变化,以调节进入眼内的光线量,从而获得清晰的图像。瞳孔大小的变化不仅起到调节亮度的作用,同时还会因暴露的光学区大小不同,导致全眼像差的变化。Holladay等^[13]研究指出,正常人角膜6.0 mm直径区域存在的球差为(0.27 ± 0.02) μm,此时瞳孔直径约为5.0 mm,相当于暗光环境的瞳孔大小。IOL植入引起的球差变化会影响全眼像差,最终因高阶像差增大导致成像质量下降。植入全矫球差型IOL可有效抵消角膜全部球差,降低全眼高阶像差,提高患者术后视觉质量。但由于患者存在个体差异,角膜球差存在明显不同^[14],采用恒定球差设计的IOL可能导致一定量的球差残留。IOL偏心也是影响最终成像质量的重要因素。引起IOL偏心的原

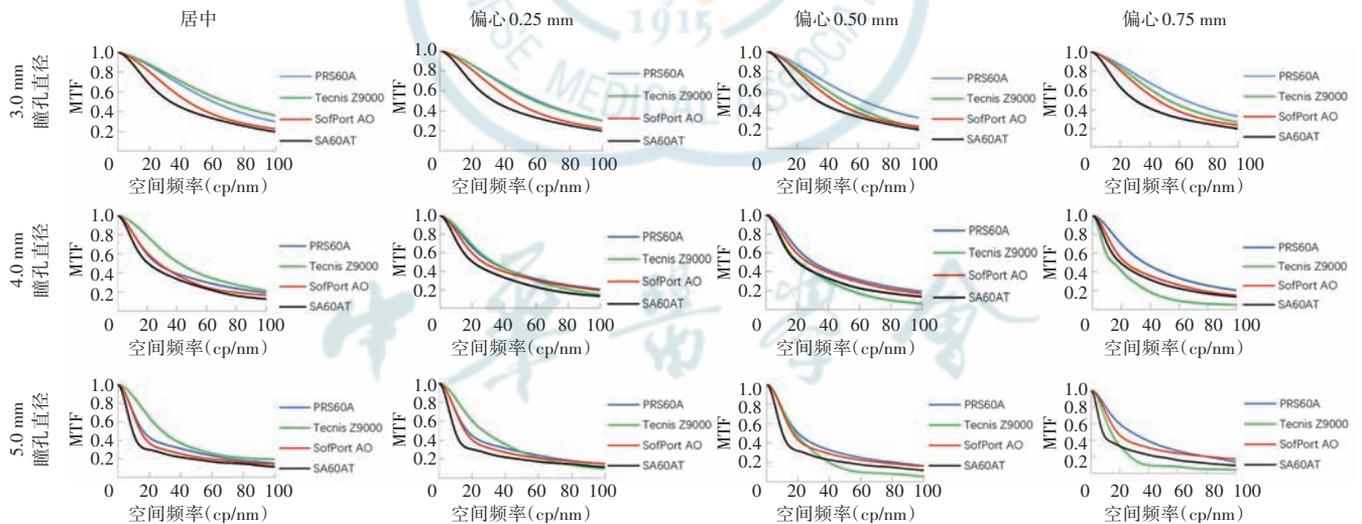


图1 不同瞳孔直径条件下4种IOL居中和不同程度偏心的MTF曲线 MTF:调制传递函数;IOL:人工晶状体

Figure 1 MTF curves for 4 IOLs under centration and different degrees of decentration at different pupil diameters MTF: modulation transfer function; IOL: intraocular lens

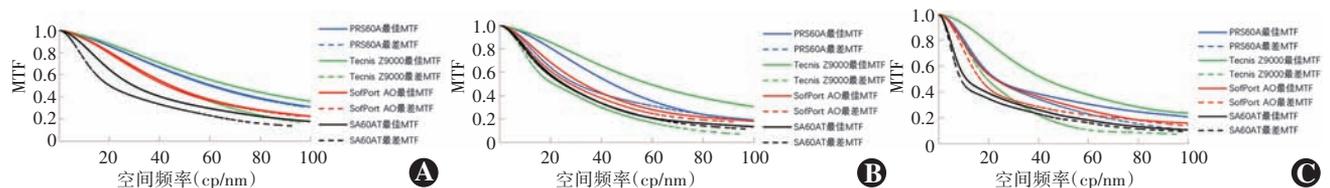


图2 在3.0、4.0、5.0 mm瞳孔直径条件下蒙特卡洛分析MTF曲线最佳10%和最差10%的成像质量 A:3.0 mm瞳孔直径 B:4.0 mm瞳孔直径 C:5.0 mm瞳孔直径 MTF:调制传递函数

Figure 2 Monte Carlo analysis for the imaging quality of best 10% and worst 10% MTF curves for at 3.0, 4.0 and 5.0 mm pupil diameters A: 3.0 mm pupil diameter B: 4.0 mm pupil diameter C: 5.0 mm pupil diameter MTF: modulation transfer function

因包括囊袋直径与 IOL 襻长度不匹配、撕囊口过大、前囊覆盖不对称、囊袋纤维化、囊袋收缩和放射状囊袋撕裂^[15-17], 这些因素致使 IOL 植入后, 由于囊袋张力不对称造成不同程度的偏心和倾斜, 偏心程度平均为 0.1~0.3 mm, 倾斜角度平均为 2.6°~3.4°^[18-20]。IOL 襻在囊袋内外不对称放置可能造成更严重的偏心和倾斜。IOL 偏心和倾斜可造成离焦、散光和彗差的增加, 对成像质量产生不同程度影响^[21-22]。Langenbacher 等^[21]通过光学模拟研究发现, IOL 偏心和倾斜除导致高阶像差增加外, 还会产生离焦和散光, 这可解释部分白内障患者术后出现的异常离焦和散光现象。对于 IOL 偏心带来的影响, Holladay 等^[13]的研究指出, 植入全矫球差型 IOL 后, 若偏心量大于 0.5 mm, 其成像质量会受到明显影响, 甚至低于球面型 IOL。本研究结果也表明, 在 IOL 居中条件下, 全矫球差型 IOL 可有效抵消角膜球差, 获得更优的成像质量; 但在偏心逐渐增大及不同瞳孔直径条件下, 其成像质量明显下降, 且低于其他球差设计类型的 IOL。

零球差 IOL 的设计特点是其自身无球差, 植入眼内后不引入新的球差, 且不增加全眼球差, 进而减少球面 IOL 植入术后全眼高阶像差的增大, 在一定程度上提高成像质量, 同时可减少偏心产生的彗差及散光, 提高 IOL 对偏心的耐受性^[23]。但在暗光环境下瞳孔较大时, 球差残留会对 IOL 眼的成像质量产生影响^[24]。

为改善固定球差 IOL 在光学特性方面的不足, 非恒定球差光学设计 IOL 逐渐发展。非恒定球差 IOL 是指球差值从晶状体中心到周边部逐渐变化(不恒定), 同时结合了负球差和零球差 IOL 的优点, 使其既可以提高暗光环境下的对比敏感度, 改善视觉质量, 又可以减少全眼高阶像差中的彗差^[25]。体外光学质量测量结果也表明, 高次非球面 A1-UV IOL 的抗偏心和抗倾斜性能在一定程度上优于 SN60WF^[26]。

非恒定像差型 CT LUCIA 601P IOL 从晶状体中心到周边部的球差值不断变化, 其中心部采用接近零球差的设计, 距中心 1.5 mm 以外区域负球差逐渐增大, 非恒定球差设计使该 IOL 对偏心和倾斜具有更优的耐受性; 当瞳孔直径增大时, 可通过周边光学区产生适量的负球差抵消角膜球差, 从而提高成像质量, 其光学中央区的零球差设计可提高 IOL 对偏心的耐受性^[27]。Stepanov 等^[28]研究发现, 年龄相关性白内障患者植入非恒定像差 IOL, 可使患者术后视力显著提高。Borkenstein 等^[29]对白内障术中植入非恒定像差 IOL 后随访 1 年的患者进行临床效果观察, 也得到了类似结论, 结果显示, 患者最佳矫正视力由术前平均 0.48

提高至术后的 0.02。对植入非恒定球差 CT LUCIA 601P IOL 患者开展的临床调查显示, 患者术后满意度较高, 所有患者均未出现晕眩或眩光^[30]。本研究采用 AMasph IOL, 其光学设计特点是光学面沿光轴方向构建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, 预留极少量残余球差, 瞳孔直径为 3.0、4.0、5.0 mm 时剩余球差分别为 0、+0.035、+0.07 μm 。有研究表明, 全眼保留少量球差可提高患者术后视觉质量。Beiko 等^[31]研究发现, 术后保留 +0.1 μm 球差可明显提高白内障患者术后对比敏感度。Morales 等^[32]的研究也得到了相似结论, 并认为保留较小的正球差可以提供较好的景深。在本研究中, 居中状态下, 随着瞳孔直径增大, 角膜暴露的球差逐渐增大。AMasph IOL 渐进增加的负球差可抵消角膜的大部分正球差^[33], 其成像质量优于零球差和球面 IOL。同时, AMasph IOL 中央区球差较小, 既保留了零球差 IOL 的抗偏心能力, 又在瞳孔直径增大时可抵消部分角膜球差, 故在偏心时仍能保持较好的成像质量。

目前, 国内外关于 AMasph IOL 的基础研究较少, 本研究通过蒙特卡洛分析, 模拟临床偏心量随机出现的情况, 结果显示, -0.27 μm 球差 IOL 在各瞳孔直径下均有 10% 的情况可保持最佳成像质量, 但最差 10% 的成像质量均显著低于其他类型 IOL, 表明其成像质量稳定性较差; 而 AMasph IOL 在大部分情况下最差 10% 的成像质量均优于零球差和球面 IOL 最好 10% 的成像质量, 表明其成像质量较好, 且在偏心条件下成像质量较为稳定。AMasph IOL 在实验条件下, 无论居中还是偏心状态, 均能保持较好的成像质量, 且对偏心具有良好的耐受性。对于白内障术后易发生或可能发生 IOL 偏心的患者, 应选择抗偏心性能较高的 IOL, 以提高患者术后的视觉质量。

本研究仍存在一定局限性: 首先, 本研究仅模拟了理想条件下模型眼内 IOL 的成像情况, 而个体眼部条件差异及神经系统的感知能力也会影响最终的成像质量; 其次, 本研究未考虑 Kappa 角的影响以及其他影响 IOL 眼光学性能的因素, 如术后残余屈光不正、角膜散光、IOL 倾斜及纵向色差等。AMasph IOL 仍需开展进一步研究, 以验证其在白内障术后改善视觉质量和提升抗误差性能的可靠性。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 张斌: 参与选题、设计实验、收集数据、分析和解释数据、撰写及修改文章; 任楠冉、武嘉慧、刘丹岩: 参与选题、设计实验、修改文章; 李旻昊、刘晓丽、耿玉欣: 参与选题、设计实验、分析数据

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[J]. 国际眼科杂志, 2019, 19(10): 1676-1678. DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2019.10.09.
- Yang GY, Zhang JQ, Luo LX. Effect of anterior chamber depth on refractive shift after cataract surgery[J]. Int Eye Sci, 2019, 19(10): 1676-1678. DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2019.10.09.
- [2] Singh B, Sharma S, Bharti N, et al. Visual and refractive outcomes of new intraocular lens implantation after cataract surgery[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 14100. DOI: 10.1038/s41598-022-14315-6.
- [3] Duan L, Dang G, Ge J, et al. Visual function assessment of Chinese cataract patients after individual aspheric intraocular lens implantation according to preoperative cornea spherical aberration[J]. Technol Health Care, 2023, 31(3): 831-839. DOI: 10.3233/THC-220154.
- [4] Deshpande R, Satijia A, Dole K, et al. Effects on ocular aberration and contrast sensitivity after implantation of spherical and aspherical monofocal intraocular lens - a comparative study[J]. Indian J Ophthalmol, 2022, 70(8): 2862-2865. DOI: 10.4103/ijo.IJO_19_22.
- [5] Kemraz D, Cheng XY, Shao X, et al. Age-related changes in corneal spherical aberration[J]. J Refract Surg, 2018, 34(11): 760-767. DOI: 10.3928/1081597X-20181011-01.
- [6] Gharieb Ibrahim HM, Gharieb HM, Othman IS. Angle κ measurement and its correlation with other ocular parameters in normal population by a new imaging modality[J]. Optom Vis Sci, 2022, 99(7): 580-588. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001910.
- [7] Chen XY, Wang YC, Zhao TY, et al. Tilt and decentration with various intraocular lenses: a narrative review[J]. World J Clin Cases, 2022, 10(12): 3639-3646. DOI: 10.12998/wjcc.v10.i12.3639.
- [8] Liou HL, Brennan NA. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 1997, 14(8): 1684-1695. DOI: 10.1364/josaa.14.001684.
- [9] Altmann GE, Nichamin LD, Lane SS, et al. Optical performance of 3 intraocular lens designs in the presence of decentration[J]. J Cataract Refract Surg, 2005, 31(3): 574-585. DOI: 10.1016/j.jcrs.2004.09.024.
- [10] 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. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.03.011.
- Zhang B, Ma JX, Liu DY, et al. Optical performance of Toric intraocular lens rotation in Hwey-Lan Liou model eye[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2017, 35(3): 239-242. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.03.011.
- [11] 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. DOI: 10.3980/j.issn.2222-3959.2015.04.16.
- [12] 张斌, 刘丹岩, 柴茜楠, 等. 偏心 and 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. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2018.01.004.
- Zhang B, Liu DY, Chai QN, et al. The optical performance parameters for rotation and decentration of the aspherical biconvex toric intraocular lens[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2018, 20(1): 19-25. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2018.01.004.
- [13] Holladay JT, Piers PA, Koranyi G, et al. A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eyes[J]. J Refract Surg, 2002, 18(6): 683-691. DOI: 10.3928/1081-597X-20021101-04.
- [14] Baur ID, Auffarth GU, Khorammia R, et al. Spherical aberration of astigmatic corneas in a cataract population[J]. J Refract Surg, 2023, 39(8): 532-538. DOI: 10.3928/1081597X-20230717-01.
- [15] Jiang H, Zhang W, Chu YH. Technique of using Cianni-modified capsular tension ring in the management of severely traumatic lens subluxation[J]. Int J Ophthalmol, 2023, 16(7): 1078-1083. DOI: 10.18240/ijo.2023.07.12.
- [16] Jacob S. Intracocular IOL fixation[J]. Asia Pac J Ophthalmol (Phila), 2017, 6(4): 381-387. DOI: 10.22608/APO.2017158.
- [17] Garg A, Lau T, Popovic MM, et al. Sutured scleral-fixated versus anterior chamber intraocular lens implantation: a meta-analysis[J]. Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina, 2022, 53(1): 12-21. DOI: 10.3928/23258160-20211213-01.
- [18] Xu J, Zheng T, Lu Y. Effect of decentration on the optical quality of monofocal, extended depth of focus, and bifocal intraocular lenses[J]. J Refract Surg, 2019, 35(8): 484-492. DOI: 10.3928/1081597X-20190708-02.
- [19] Nishi Y, Hirmschall N, Crnej A, et al. Reproducibility of intraocular lens decentration and tilt measurement using a clinical Purkinje meter[J]. J Cataract Refract Surg, 2010, 36(9): 1529-1535. DOI: 10.1016/j.jcrs.2010.03.043.
- [20] Kránitz K, Miháltz K, Sándor GL, et al. Intraocular lens tilt and decentration measured by Scheimpflug camera following manual or femtosecond laser-created continuous circular capsulotomy[J]. J Refract Surg, 2012, 28(4): 259-263. DOI: 10.3928/1081597X-20120309-01.
- [21] Langenbacher A, Omid P, Eppig T, et al. Combination of lens decentration and tilt in phakic and pseudophakic eyes-optical simulation of defocus, astigmatism and coma[J]. Ophthalmologie, 2021, 118(8): 828-837. DOI: 10.1007/s00347-020-01235-x.
- [22] Can E, Senel EC, Holmström S, et al. Comparison of the optical behaviour of five different multifocal diffractive intraocular lenses in a model eye[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 19646. DOI: 10.1038/s41598-023-47102-y.
- [23] Ashena Z, Maqsood S, Ahmed SN, et al. Effect of intraocular lens tilt and decentration on visual acuity, dysphotopsia and wavefront aberrations[J]. Vision (Basel), 2020, 4(3): 41. DOI: 10.3390/vision4030041.
- [24] Oltrup T, Bende T, Al-Mohamed H, et al. Comparison of spherical and aspherical intraocular lenses with decentration and tilt error using a physical model of human contrast vision and an image quality metric[J]. Z Med Phys, 2021, 31(3): 316-326. DOI: 10.1016/j.zemedi.2021.01.004.
- [25] Liu Y, Zhao J, Hu Y, et al. Comparison of the visual performance after implantation of three aberration-correcting aspherical intraocular lens[J]. Curr Eye Res, 2021, 46(3): 333-340. DOI: 10.1080/02713683.2020.1798467.
- [26] 谢丽暄, 廖莹, 兰长骏, 等. 基于体外光学质量测试设备的非球面人工晶状体光学性能评价[J]. 中华实验眼科杂志, 2024, 42(3): 240-247. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20230821-00075.
- Xie LX, Liao X, Lan CJ, et al. Evaluation of optical performance of aspherical intraocular lens *in vitro* by optical bench[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2024, 42(3): 240-247. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20230821-00075.
- [27] Portney V. New bi-sign aspheric IOL and its application[J]. Optom Vis Sci, 2012, 89(1): 80-89. DOI: 10.1097/OPX.0b013e3182376ba8.
- [28] Stepanov A, Jirásková N, Rozsival P. Evaluation of the clinical results of implantation the hydrophobic intraocular lens CT LUCIA 601P[J]. Cesk Slov Oftalmol, 2015, 71(4): 196-198.
- [29] 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. DOI: 10.2147/OPHT.S167895.
- [30] Borkenstein AF, Borkenstein EM. Patient and surgeon satisfaction levels after using an acrylic, hydrophobic, monofocal IOL and the Malyugin ring in pseudoexfoliation syndrome patients [J]. J Ophthalmol, 2018, 2018: 3843098. DOI: 10.1155/2018/3843098.
- [31] Beiko GH. Personalized correction of spherical aberration in cataract surgery[J]. J Cataract Refract Surg, 2007, 33(8): 1455-1460. DOI: 10.1016/j.jcrs.2007.04.019.
- [32] Morales EL, Rocha KM, Chalita MR, et al. Comparison of optical aberrations and contrast sensitivity between aspheric and spherical intraocular lenses[J]. J Refract Surg, 2011, 27(10): 723-728. DOI: 10.3928/1081597X-20110708-02.
- [33] 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[J]. Ophthalmic Res, 2022, 65(4): 425-436. DOI: 10.1159/000522510.

(收稿日期:2025-09-10 修回日期:2026-01-04)

(本文编辑:施晓萌)