·论 著·

非球面人工晶状体成像质量的蒙特卡洛分析

田 琨，张 斌*，刘丹岩，刘晓丽，任韬冉
（河北医科大学第二医院眼科，河北 石家庄 050000）

[摘要] **目的** 模型眼中植入球面人工晶状体（intraocular lens，IOL），0 μm 非球面 IOL、－0.1 μm 非球面 IOL、－0.26 μm 非球面 IOL，四种不同球差的 IOL，通过蒙特卡洛分析的方法比较每种 IOL 分别在瞳孔直径 3 mm、4 mm 和 5 mm 时较好 10%和较差 10%的调制传递函数（modulation transfer function，MTF）值，比较 4 种 IOL 成像质量及抗偏心性能的研究。**方法** 实验研究中，分别在瞳孔直径 3 mm、4 mm、5 mm 条件下，在模型眼中插入 4 种不同球差的 IOL。在计算机光学模拟系统中，通过蒙特卡洛分析的方法设计 4 种 IOL 随机 0～0.5 mm 偏心，分别进行 1 000 次随机模拟。比较四种 IOL 最好 10%和最差 10%成像质量的实验研究。**结果** 随机偏心的情况下，在 3 mm 瞳孔直径条件下，最好 10%时－0.1 μm 非球面 IOL 与－0.26 μm 非球面 IOL、0 μm 非球面 IOL 的 MTF 值均较高，且明显优于球面 IOL，最差 10%时－0.1 μm 非球面 IOL 的 MTF 值较－0.26 μm 非球面 IOL 和球面 IOL 高。在 4 mm 瞳孔直径条件下，最好 10%时－0.1 μm 非球面 IOL 与－0.26 μm 非球面的 MTF 值较－0 μm 非球面 IOL 和球面 IOL 高，最差 10%时－0.1 μm 的非球面 IOL 的 MTF 值较－0.26 μm 非球面 IOL 和球面 IOL 高。在 5 mm 瞳孔直径条件下，最好 10%时－0.1 μm 非球面 IOL 的 MTF 值较 0 μm 非球面 IOL 和球面 IOL 高，最差 10%时－0.1 μm 非球面 IOL 的 MTF 较其他三种 IOL 高。**结论** －0.1 μm 非球面 IOL 对偏心有较好的耐受性，成像质量的稳定性较高。

[关键词] 白内障；晶体，人工；蒙特卡洛分析 doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2024.11.013
[中图分类号] R776.1 [文献标志码] A [文章编号] 1007-3205(2024)11-1317-05

Monte Carlo analysis of imaging quality of aspherical intraocular lens

TIAN Kun, ZHANG Bin*, LIU Dan-yan, LIU Xiao-li, REN Tao-ran
(*Department of Ophthalmology, the Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang* 050000, *China*)

[**Abstract**] **Objective** The model eyes were implanted with four kinds of intraocular lens (IOL) with different spherical aberration, including spherical IOL, 0 μm aspheric IOL, －0.1 μm aspheric IOL, －0.26 μm aspheric IOL. The 10% better and 10% worse Modulation transfer function (MTF) values of each IOL at 3 mm, 4 mm and 5 mm pupil diameters were compared using Monte Carlo analysis, and the imaging quality and anti-decentration performance were compared. **Methods** For experimental study, four kinds of IOL with different spherical aberration were inserted into the model eye under the condition of pupil diameter of 3 mm, 4 mm and 5 mm, respectively. In the computer optical simulation system, the Monte Carlo analysis method was used to design four kinds of IOL with random 0－0.5 mm decentration, and 1 000 random simulations were performed respectively. The experimental studies with the 10% better and 10% worse image quality of the four IOL were compared. **Results** In the case of random

[收稿日期]2024－03－10
[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

decentration, under the 3 mm pupil diameter, the MTF values of −0.1 μm aspherical IOL, −0.26 μm aspherical IOL and 0 μm aspherical IOL were higher than spherical IOL at the best 10%, and the MTF value of −0.1 μm aspherical IOL was higher than −0.26 μm aspherical IOL and spherical IOL at the worst 10%. Under the 4 mm pupil diameter, the MTF values of −0.1 μm aspherical IOL and −0.26 μm aspherical IOL 10% were higher than -0 μm aspherical IOL and spherical IOL at the best 10%, and the MTF values of −0.1 μm aspherical IOL were higher than those of −0.26 μm aspherical IOL and spherical IOL at the worst 10%. Under the 5 mm pupil diameter, the MTF value of −0.1 μm aspherical IOL was higher than 0 μm aspherical IOL and spherical IOL at the best 10%, and the MTF value of −0.1 μm aspherical IOL was higher than that of the other three IOL at the worst 10%. **Conclusion** −0.1 μm aspherical IOL has good tolerance to decentration and high stability of image quality.

[**Key words**] cataract; lenses, artificial; Monte Carlo analysis

随着白内障手术技术的成熟和人工晶状体(intraocular lens,IOL)的发展,IOL已可以完全矫正白内障患者术后屈光度,但仍有部分患者术后视觉与预期仍有一定差距。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[1-2],球面IOL同样具有正球差,植入球面IOL会使患者的正球差增加,影响成像质量。通过非球面的设计可使IOL具有特定球差,特定的球差量矫正角膜的正球差,获得比球面IOL更好的视觉质量[3-4]。但非球面IOL抗偏心性有待研究。本研究通过优化具有正球差的球面IOL,设计3种不同球差的非球面IOL,并且对不同球差非球面IOL通过蒙特卡罗分析方法随机0～0.5 mm偏心,研究其成像质量及对偏心耐受性。

1 材料与方法

1.1 建立模型眼 以Hwey-Lan Liou模型为基础建立模型眼。各IOL光学面垂直于光轴且中心位于光轴。模型眼参数:角膜前表面和后表面曲率半径分别为7.77 mm、6.40 mm厚度为0.5 mm,前后表面非球面系数分别为−0.18和−0.50。角膜顶点至IOL前表面的距离为4.5 mm(z)[5]。人工晶状体以+22.0 D球面IOL为基础前后表面曲率半径为19.22 mm,厚度为0.6 mm,$n=1.55$,瞳孔直径分别为3 mm、4 mm、5 mm。

1.2 人工晶状体球差的优化 对球面人工晶状体前表面进行优化。根据公式:

$$z=\frac{cr^2}{1+[1-(1+Q)c^2r^2]^{\frac{1}{2}}}+a_1r^2+a_2r^4$$

a1:二阶非球面系数;a2:四阶非球面系数。

优化目标设计为:−0.26 μm、−0.1 μm和0 μm球差的非球面IOL。优化函数设定分别以C_4^0为0 μm、0.16 μm、0.26 μm为目标,对IOL前表面Q值和二、四阶非球面系数进行优化。获得3种球差设计的非球面IOL分别为−0.26 μm非球面IOL($C_4^0=-0.26$ μm)、−0.1 μm非球面IOL($C_4^0=-0.1$ μm)和0 μm非球面IOL($C_4^0=0$ μm)。

1.3 非球面IOL偏心的蒙特卡洛分析 非球面IOL在模型眼中分别在3 mm、4 mm、5 mm瞳孔直径条件下模拟IOL随机偏心0～0.5 mm,对512×512条光线进行追踪,光线追迹方法计算调制传递函数(modulation transfer functio, MTF),进行1 000次模拟,结果进行蒙特卡洛分析[6]。结果见表1。

表1 球面IOL和非球面IOL在模型眼中MTF的平均值

Table 1 Mean MTF values of spherical IOL and aspherical IOL in the model eye

瞳孔直径	球面IOL10%最好	球面IOL 10%最差	0 μm非球面IOL10%最好	0 μm非球面IOL10%最差	−0.1 μm非球面IOL10%最好	−0.1 μm非球面IOL10%最差	−0.26 μm非球面IOL10%最好	−0.26 μm非球面IOL10%最差
3 mm瞳孔直径	1.000	0.326	0.920	0.491	0.913	0.698	0.901	0.780
4 mm瞳孔直径	0.498	0.467	0.670	0.655	0.803	0.558	0.834	0.433
5 mm瞳孔直径	0.354	0.326	0.477	0.477	0.567	0.491	0.746	0.261

2 结果

分别在3 mm、4 mm、5 mm瞳孔直径时,模型眼中1种球面IOL和3种不同球差的非球面IOL随机偏心0～0.5 mm分别行蒙特卡洛分析,比较最好10%和最差10%随着空间频率增加视觉质量评估的MTF曲线。

2.1 3 mm瞳孔直径时 3种不同球差的非球面

IOL最好10%的MTF相差不大且都明显优于球面IOL最好10%的MTF值，表明非球面IOL成像质量较好。四种IOL在最差10%时MTF值随着空间频率增加均降低，其中0 μm非球面IOL和−0.1 μm非球面IOL最差10%MTF在所有空间频率均高于另外2种IOL，其中球面IOL和−0.26 μm非球面IOL最差10%MTF在高空间频率MTF都较低，且相差不大。球面IOL和−0.26 μm非球面IOL最好10%和最差10%的MTF值相差较大，成像质量变化差异较大(图1)。

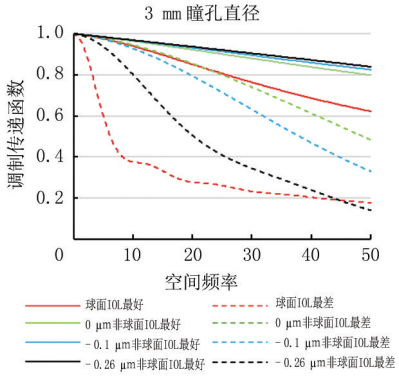

图1　在3 mm瞳孔直径条件下，四种人工晶体随机偏心的MTF值

Figure 1　MTF values of four intraocular lenses with random decentration at a 3 mm pupil diameter condition

2.2　4 mm瞳孔直径时　模型眼中−0.1 μm非球面IOL和−0.26 μm非球面IOL在最好10%MTF较稳定，具有较好的成像质量，但−0.26 μm非球面IOL在最差10%时MTF值较−0.1 μm非球面IOL低，表明−0.26 μm非球面IOL抗偏心与−0.1 μm非球面IOL相比稳定性较差。其中值得一提的是，0 μm非球面IOL在最好10%和最差10%MTF曲线随着空间频率的增加几乎重叠，虽然在最好10%时MTF值没有−0.1 μm非球面IOL高，但0 μm非球面IOL抗偏心稳定性更强，成像质量的稳定性更好(图2)。

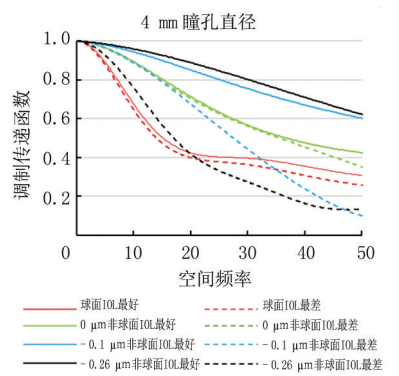

图2　在4 mm瞳孔直径条件下，四种人工晶体随机偏心的MTF值

Figure 2　MTF values of four intraocular lenses with random decentration at a 4 mm pupil diameter

2.3　5 mm瞳孔直径时　模型眼中−0.26 μm非球面IOL最好10%和最差10%MTF值差距最大。0 μm非球面IOL和球面IOL最好10%和最差10%MTF值虽然几乎无差别，但随着空间频率的增加MTF值明显下降。−0.1 μm非球面IOL最好10%和最差10%MTF值较0 μm非球面IOL和球面IOL高，且在较高空间频率时最差10%MTF值也高于0 μm非球面IOL和球面IOL(图3)。

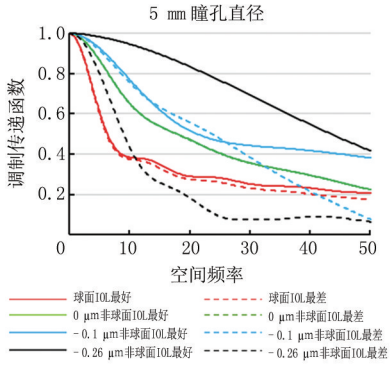

图3　在5 mm瞳孔直径条件下，四种人工晶体随机偏心的MTF值

Figure 3　MTF values of four intraocular lenses with random decentration at a 5 mm pupil diameter

3　讨　论

3.1　角膜球差　角膜是最主要的屈光介质，晶状体同样也是屈光介质的重要组成部分，是产生眼球总像差的主要结构。随着微切口白内障超生乳化手术的开展，角膜切口对角膜像差的影响越来越小，白内障手术后眼球总像差的改变主要是由于IOL的像差引入的[7]。非球面IOL设计光学区表面的各点曲率不相同，非球面IOL和球面IOL相比能使周边光线更好的聚集在视网膜上，减少了视觉干扰，减少眼的术后球差[8]。球差的大小与瞳孔大小有关，瞳孔增大时，球差也会增大[9−10]。

角膜球差数据存在差异与个体差异和不同检查设备的精度和方法不同有关。例如应用Pentacam分析测得角膜球面像差(SphA)的差值的平均值为(0.224 ± 0.091) μm [11]。Georgiev等[12]应用SS-OCT和Placido角膜地形图测量103例老年患者球差分别为(0.17±0.07) μm、(0.15±0.07) μm。

3.2　球面IOL优化　对IOL的球面结构等使IOL正球差减少的结构进行了优化，研究其对偏心的耐受性，但并未对其他不减少球差的结构例如IOL厚度等优化。

白内障术后植入非球面IOL相比植入球面IOL，视觉质量有明显提高，因为球面IOL优化后球面像差为主的全眼高阶像差明显改善[13-14]。Singh等[15]对50例患者61眼个体化球差优化选择对照研究，比较最佳矫正视力，非球面IOL明显优于球面IOL。Diao等[16]研究表明，倾斜和偏心使非球面IOL的垂直彗差明显增加。

3.3 非球面IOL和球面IOL偏心分析 球面IOL非球面IOL植入术后患者视觉质量受到偏心量和IOL球差的影响[17-19]，且瞳孔增大时，偏心对IOL的影响增加[19]。当IOL偏心度越大，术后患者视觉功能也就越差[20]。非球面IOL设计的理想状态是晶状体的光学中心与视轴对齐，球面IOL设计的光学中心并不是与视轴对齐的，而是与囊袋的几何中心对齐，同时不同球差的非球面IOL能有效抵消角膜球差，提高人眼视觉质量[14]。但现实是白内障患者大多年龄较大，会由于悬韧带松弛、晶状体囊袋大等原因出现IOL不同程度的偏心。白内障IOL植入术后，IOL偏心现象比较普遍[21]。研究表明，白内障术后IOL平均有0.2～0.3 mm的偏心[22-23]。使用眼前节扫频光相干断层扫描仪CASIA2测量散瞳后IOL的偏心量为(0.250±0.145)mm，倾斜度为(5.437±1.646)°。研究表明，非球面IOL偏心0.4 mm、倾斜7°时其光学质量才会优于传统球面IOL，否则IOL的偏心和倾斜可能会限制、抵消或改变非球面IOL的优点，使得其光学质量下降，低于球面IOL。不同球差的IOL偏心主要引起离焦、散光、慧差的变化，并且依据球差大小不同而变化[19,24-27]。

本研究采用的蒙特卡罗分析方法，又称随机抽样或统计试验方法，通过设定IOL偏心范围0～0.5 mm，在此范围内随机产生误差条件，四种IOL，分别为－0.26 μm非球面IOL、－0.1 μm非球面IOL、0 μm非球面IOL和球面IOL进行1 000次模拟获得MTF数据。

在IOL居中时，－0.26 μm非球面IOL最好10%时MTF值相对稳定，瞳孔直径变化无明显变化。在偏心时，最差10%时，瞳孔较大的－0.26 μm非球面IOL成像质量不及球面IOL。－0.1 μm非球面IOL和0 μm非球面IOL成像质量在3 mm瞳孔直径时相差不大，但随着瞳孔直径的增加，0 μm非球面IOL成像质量降低，甚至在5 mm瞳孔直径时0 μm非球面IOL的最好10%的成像质量在低空间频率时较－0.1 μm非球面IOL最差10%的成像质量差。偏心主要造成IOL各空间频率MTF降低，成像质量下降。同时偏心会引起例如慧差和三叶草像差之类的高阶像差[28]。

在各瞳孔直径条件下－0.1 μm非球面IOL的平均MTF都优于其他三种。但不同球差的IOL表现差异较大，－0.1 μm非球面IOL所有最好情况的MTF处于较高位置，最差情况MTF相对其他2种非球面IOL高。－0.26 μm非球面IOL较差情况的MTF降低非常显著，尤其是随着瞳孔直径的增大，中高空间频率甚至低于球面IOL的MTF。0 μm非球面IOL在最好10%时MTF值均低于－0.1 μm非球面IOL，并且在5 mm瞳孔直径时最差10%的MTF较－0.1 μm非球面IOL低。说明－0.1 μm非球面IOL在瞳孔直径较大时有较好的成像质量，抗偏心性较好。

综上所述，对模型眼球面IOL结构的优化，可以增加对偏心的耐受性，提高MTF值，使模型眼获得较好的视觉质量。居中时－0.1 μm非球面IOL，在3 mm、4 mm、5 mm瞳孔直径时，最好10%的MTF值较高，成像越清晰，视网膜成像质量越好；偏心时，在最差10%时，尤其是5 mm瞳孔直径时，－0.1 μm非球面IOL具有较好的稳定性。由此可见，－0.1 μm非球面IOL的成像质量稳定性较高好，尤其是瞳孔较大时有较好的抗偏心稳定性。

[参考文献]

[1] 张守宽，彭庆生，张磊.球差和彗差在角膜塑形镜控制近视中的作用[J/CD].国际眼科杂志(电子版)，2024，24(1)：88-92.

[2] Salman A，Kailani O，Ghabra M，et al.Corneal higher order aberrations by Sirius topography and their relation to different refractive errors[J].BMC Ophthalmol，2023，23(1)：104.

[3] 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.

[4] Yeu E，Cuozzo S. Matching the patient to the intraocular lens：preoperative considerations to optimize surgical outcomes[J]. Ophthalmology，2021，128(11)：e132-e141.

[5] 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.

[6] Yan W，Auffarth GU，Khoramnia R，et al. Blue-light filtering monofocal intraocular lenses：a study on optical function and tolerance to misalignment[J]. J Refract Surg，2024，40(2)：e79-e88.

[7] 刘璐，边立娟，石海英，等.人工晶状体远期闪辉现象对视觉质量的影响[J].临床眼科杂志，2021，29(1)：81-85.

[8] 柴华，苏兰萍.植入非球面与球面人工晶体手术治疗白内障的

临床效果[J].中国当代医药,2022,29(29):109-111.
[9] Al-Somali A, Abouollo HM, Al-Jindan M, et al. Corneal asphericity and its related factors[J]. Med Hypothesis Discov Innov Ophthalmol,2023,12(3):142-149.
[10] 叶宏权,韩宇,汤静,等.A1-UV 型非球面人工晶状体植入眼的主客观视觉质量评价[J].实用防盲技术,2023,18(1):19-22,36.
[11] Zhang X,Ma JH,Xi X,et al. Characteristics of corneal high-order aberrations in adolescents with mild to moderate myopia[J].BMC Ophthalmol,2020,20(1):465.
[12] Georgiev S, Ruiss M, Dana-Fisus A, et al. Comparison of corneal aberrations from anterior segment swept source OCT versus Placido-topography combined spectral domain OCT in cataract patients[J].Eye Vis (Lond), 2023,10(1):30.
[13] Salgado-Borges J, Borges A, Ferreira I, et al. Optical characterization and through-focus performance of two advanced monofocal intraocular lenses[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol,2024,262(5):1539-1544.
[14] Steinmüller LN, Greve D, Rua Amaro D, et al. Analysis of higher-orderaberrations in relation to the clinical outcome of an enhanced monofocal IOL[J]. Eur J Ophthalmol,2023,33(6):2096-2105.
[15] 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.
[16] Diao C,Lan Q,Liao J,et al. Influence of decentration of plate-haptic toric intraocular lens on postoperative visual quality [J].BMC Ophthalmol,2023,23(1):332.
[17] Danzinger V, Schartmüller D, Lisy M, et al. Intraindividual comparison of an enhanced monofocal and an aspheric monofocal intraocular lens of the same platform[J]. Am J Ophthalmol,2023,261:95-102.
[18] 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.
[19] Diao C,Lan Q,Liao J,et al Influence of decentration of plate-haptic toric intraocular lens on postoperative visual quality [J].BMC Ophthalmol,2023,23(1):332.
[20] Cerviño A, Esteve-Taboada JJ, Chiu YF, et al. Tolerance to decentration of biaspheric intraocular lenses with refractive phase-ring extended depth of focus and diffractive trifocal designs[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2024, 262(8):2541-2550.
[21] Liu X, Wu W, Huang Y, et al. Repeatability of pentacam-derived intraocular lens decentration measurements and the level of agreement with OPD-Scan Ⅲ: A prospective observational case series[J]. PLoS One, 2024, 19(3): e0299064.
[22] Langenbucher A,Szentmáry N,Cayless A,et al. Prediction of IOL decentration, tilt and axial position using anterior segment OCT data[J].Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2024,262(3):835-846.
[23] Gu X,Chen X,Yang G,et al. Determinants of intraocular lens tilt and decentration after cataract surgery[J]. Ann Transl Med,2020,8(15):921.
[24] 唐玉玲,廖萱,谭青青,等.CASIA2 对扩瞳前后晶状体和人工晶状体偏心和倾斜测量的重复性[J].中华实验眼科杂志,2022,40(5):440-447.
[25] Altmann GE, Nichamin LD, Lane SS et al. Opticalperformance of 3 intraocular lens designs in the presence of decentration[J]. J Cataract Refract Surg,2005,31(3):574-585.
[26] 黄子彦,段国平.不同类型人工晶状体植入术后倾斜和偏心影响视觉质量的研究现状[J].山东大学耳鼻喉眼学报,2022,36(6):26-31,44.
[27] 兰长骏,唐玉玲,廖萱.人工晶状体的偏心和倾斜[J].中华眼科杂志,2021,57(7):552-556.
[28] 钱玖林,廖萱,兰长骏.偏心和倾斜对不同类型功能性 IOL 视觉质量的影响[J].国际眼科纵览,2022,46(6):512-516.

(本文编辑:赵丽洁)