

· 实验研究 ·

模型眼中生理囊袋内 Toric IOL 旋转对视觉质量的影响

李雪卉 宋慧

天津医科大学眼科医院 天津医科大学眼视光学院 天津医科大学眼科研究所 国家眼耳鼻喉疾病临床医学研究中心天津市分中心 天津市视网膜功能与疾病重点实验室, 天津 300384
通信作者: 宋慧, Email: songh221@hotmail.com

【摘要】 目的 分析在模型眼中生理囊袋内植入 Toric 人工晶状体 (IOL) 并模拟其在眼内旋转后 Toric IOL 位置改变对视觉质量的影响。**方法** 在光学分析软件 Zemax 中设计 3 和 6 mm 瞳孔直径下, 合并或不合并 κ 角的 4 种 Liou-Brennan 模型眼, 并在模型眼中插入屈光度为 +22.0 D 的 ArcySof Toric T4 IOL, 分别模拟 Toric IOL 在模型眼中生理囊袋内 (向颞侧倾斜 4.90°, 向鼻侧偏心 0.21 mm) 合并旋转 5°、10°、20°、30°, 比较各组模型眼中波前像差、残留柱镜度以及调制传递函数 (MTF) 曲线的改变。**结果** Toric IOL 在生理囊袋中的倾斜和偏心会引起高阶像差和低阶像差的增加以及残留柱镜度增加, MTF 值降低; 而 Toric IOL 在生理囊袋内旋转时, 随着旋转度数增加, 像差和残留柱镜度逐渐增加 (对于 3 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼, IOL 旋转 0~30° 使残留柱镜度从 1.41 D 升高至 7.74 D)。并且 Toric IOL 旋转主要引起低阶像差的改变 (对于 3 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼, IOL 旋转 0~30° 使散光从 0.054 μm 升高至 0.909 μm), 在高阶像差中, 会引起倾斜三叶草像差的增加 (对于 3 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼, 旋转 0~30°, IOL 倾斜三叶草差从 0.000 μm 升高至 -1.481 μm)。而彗差、球差变化不显著; 此外, 随着瞳孔直径和 κ 角增大, 会引入更大的低阶像差和高阶像差, 同时降低 MTF 值。**结论** Toric IOL 在眼内位置居中时具有良好的光学质量, Toric IOL 在生理囊袋中随着旋转度数增加, 其矫正散光的能力逐渐减弱, 成像质量下降, 并且瞳孔直径大小和 κ 角会影响 Toric IOL 植入后的视觉质量。

【关键词】 白内障; 视觉质量; 模型眼; 散光矫正型人工晶状体

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20250227-00056

Effect of toric IOL rotation in capsular bag on visual quality in model eyes

Li Xuehui, Song Hui

Tianjin Key Laboratory of Retinal Functions and Diseases, Tianjin Branch of National Clinical Research Center for Ocular Disease, Eye Institute and School of Optometry, Tianjin Medical University Eye Hospital, Tianjin 300384, China
Corresponding author: Song Hui, Email: songh221@hotmail.com

[Abstract] Objective To determine the impact of the change in the position of the toric intraocular lens (IOL) on visual quality by implanting toric IOL in the physiological capsular bag in a model eye and simulating its rotation. **Methods** Using the optical analysis software Zemax, four Liou-Brennan model eyes with pupil diameters of 3.0 mm and 6.0 mm, with or without the angle κ , were created. A +22.0 D ArcySof toric T4 IOL was inserted into the Liou-Brennan model eye. The toric IOL was then simulated to rotate 5°, 10°, 20°, and 30° in the physiological capsular bag (tilted 4.90° temporally and decentered 0.21 mm nasally). Changes in wavefront aberrations, residual astigmatism, and modulation transfer function (MTF) curves were examined among the different groups. **Results** The tilt and decentration of the toric IOL in the physiological capsular bag caused increases in both higher-order and lower-order aberrations, as well as an increase in residual astigmatism and a reduction in MTF values. Additionally, as the degree of rotation of the toric IOL increased, the aberrations and residual astigmatism increased gradually (for model eyes with 3-mm pupil diameters and no angle κ , rotating the IOL from 0° to 30° increased the residual astigmatism from 1.41 to 7.74 D). The rotation of the toric IOL primarily caused changes in lower-order aberrations (for model eyes with 3-mm pupil diameters and no angle κ , rotating the IOL from 0° to 30° increased astigmatism from 0.054 μm to 0.909 μm), with an increase in oblique trefoil aberration (for model eyes with 3-mm pupil diameters and no angle κ , rotating the IOL from 0° to 30° increased the oblique trefoil aberration difference from 0.000 μm to -1.481 μm), while the changes in coma and spherical aberrations were not significant. Furthermore, as the pupil diameter and

angle κ increased, greater lower-order and higher-order aberrations were introduced, and the MTF values decreased. **Conclusions** When the toric IOL is centered, it provides good optical quality. When the toric IOL rotates in the physiological capsular bag, its ability to correct astigmatism gradually weakens and the imaging quality deteriorates. Additionally, pupil diameter and angle κ also affect the visual quality after toric IOL implantation.

[**Key words**] Cataract; Visual quality; Model eye; Toric intraocular lens

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20250227-00056

白内障超声乳化摘出联合人工晶状体 (intraocular lens, IOL) 植入是目前治疗白内障的主要方法,随着医疗技术的成熟,许多功能性 IOL 已被开发,以满足不同患者的视觉需求并改善患者术后视觉质量^[1]。部分植入功能性 IOL 的患者仍可能出现眩光和光晕等不良视觉现象,既往研究通过像差来解释这些不良光学现象^[2]。像差中的不同部分代表着不同的视觉成像影响因素,像差包括低阶像差和高阶像差,其中散光、离焦等低阶像差以及球差、彗差、三叶草像差等高阶像差对人眼影响非常显著。低阶像差是影响视觉质量的主要因素,随着瞳孔直径的增大,高阶像差对视觉质量的影响愈发显著^[3]。在众多功能性 IOL 中, Toric IOL 主要用于合并角膜散光的白内障患者。研究表明, Toric IOL 能有效矫正散光,改善术后视觉质量,并提高患者术后满意度^[4]。然而, Toric IOL 植入后的视觉质量受到 IOL 在眼内位置等因素的影响^[5],其中, Toric IOL 旋转是一个关键因素。研究发现, Toric IOL 每旋转 1° , 柱面矫正度数降低 3.3%^[6]。因此,目前的研究多聚焦于 Toric IOL 在眼内旋转对视觉质量的影响以及 IOL 旋转的影响因素及控制技巧。

由于人眼是一个不完美的光学系统,晶状体在生理状态下通常存在一定程度的倾斜和偏心。研究表明在非扩瞳条件下,晶状体平均倾斜角度为 $(4.90 \pm 1.81)^\circ$, 平均偏心 (0.21 ± 0.02) mm, 这些生理性倾斜和偏心会影响白内障术后 IOL 在囊袋内的位置,而 IOL 的倾斜和偏心可能会进一步引入高阶像差,从而影响视觉质量^[7-8]。因此, IOL 植入术后在眼内的位置改变及其对视觉成像质量的影响仍是当前研究的重点和难点。本研究旨在通过 Zemax 光学分析软件建立的 Liou-Brennan 模型眼中插入 Toric IOL,并在模型眼中模拟 Toric IOL 在生理囊袋内合并不同程度的旋转,探讨 Toric IOL 植入术后眼内位置改变对视觉质量的影响,并探讨瞳孔直径和 κ 角对白内障术后视觉质量的影响。

1 材料与方法

1.1 Liou-Brennan 模型眼的建立

采用 Zemax 光学分析软件建立 Liou-Brennan 模型

眼^[9],该模型眼是目前应用广泛并且基于解剖数据的模型眼。将角膜顶点作为原点,通过角膜顶点的横轴设置为 x 轴,纵轴设置为 y 轴,通过瞳孔中心的光轴设置为 z 轴,在瞳孔平面设置鼻侧偏心 0.368 mm 模拟合并 κ 角的模型眼, Liou-Brennan 模型眼具体参数见表 1。模型眼中使用 +22.0 D 的 ArcySof Toric T4 IOL,其折射率为 1.55,将梯度折射率的晶状体数据替换为 IOL 参数, Toric IOL 曲率半径为 19.609 mm,中心厚度为 0.694 mm,后表面曲率半径陡峭轴为 -18.174 mm,平坦轴为 -22.472 mm,晶状体平面柱镜度为 2.25 D,角膜平面柱镜度为 1.55 D。将 Toric IOL 后表面 x 轴设置为平坦轴, y 轴设置为陡峭轴。以上述为条件建立不合并 κ 角的 3 mm 瞳孔直径模型眼 (M1)、不合并 κ 角的 6 mm 瞳孔直径模型眼 (M2)、合并 κ 角的 3 mm 瞳孔直径模型眼 (M3) 和合并 κ 角的 6 mm 瞳孔直径模型眼 (M4)。

表 1 Liou-Brennan 模型眼参数
Table 1 Parameters of Liou-Brennan model eye

表面	曲率半径 (mm)	厚度 (mm)	非球面 系数 (Q)	阿贝数
角膜前表面	7.77	0.50	-0.18	61.7
角膜后表面	6.40	3.16	-0.60	55.5
瞳孔	Inf	0.00	-	-
晶状体前表面	12.40	1.59	-0.94	55.5
晶状体厚度	Inf	2.43	-	-
晶状体后表面	-8.10	16.19	+0.96	55.5
视网膜	-12.00	-	0.00	-

注: Inf: 无限; -: 无数据

Note: Inf: infinity; -: no data

1.2 Toric IOL 的优化

为了建立合并散光的模型眼,首先在模型眼中植入 IOL,以 Zernike 系数中离焦等于 0 为目标,优化玻璃腔深度。优化过程完成后,为了模拟角膜散光,在模型眼角膜前插入一面理想薄透镜,并进一步优化薄透镜的前表面曲率半径,以 Zernike 系数中离焦和散光等于 0 为目标进行优化,最终获得植入 Toric IOL 的模型眼,并且散光被完全矫正。

1.3 Toric IOL 在生理囊袋中合并旋转模型的建立

为了在模型眼中模拟 Toric IOL 在生理囊袋中合并旋转的状态,将 Toric IOL 平面沿着 x 轴正向移位代表向颞侧偏心,沿着 x 轴负向移位代表向鼻侧偏心;在 y 轴上的正向倾斜代表颞侧倾斜,即 IOL 的颞侧向角膜方向移位,鼻侧向视网膜方向移位,在 y 轴上的负向倾斜代表鼻侧倾斜,即 Toric IOL 的鼻侧向角膜方向移位,颞侧向视网膜方向移位;IOL 以 z 轴为中心移位代表正向/负向旋转。在 Zemax 光学分析软件中设置 Toric IOL 偏心 0.21 mm 合并倾斜 4.90° 模拟生理囊袋,在上述条件下设置 Toric IOL 旋转 0、5、10、20、30°。

1.4 Toric IOL 位置改变后眼内像差和调制传递函数曲线的比较

在 Toric IOL 不同位置记录散光、球差、三叶草像差、彗差等波前像差数值。Zemax 软件中的 Zernike 系

数表示整个光学系统中的像差,Z5 表示散光,Z6 表示倾斜三叶草像差,Z7 表示垂直彗差,Z8 表示水平彗差,Z9 表示垂直三叶草像差,Z11 表示球差,通过获得的波前像差依据公式 $C = 4\sqrt{6} \sqrt{(C_2^{-2})^2 + (C_2^2)^2} / R^2$ 计算残留柱镜度^[10],其中 C 代表残留柱镜度,R 代表瞳孔直径, C_2^{-2} 和 C_2^2 分别代表 Zernike 系数中径向对称性和非对称性的散光模式。采集 Toric IOL 在倾斜、偏心下合并不同旋转角度的调制传递函数(modulation transfer function,MTF)曲线,人眼的截止空间频率为 0~60 cycles/mm,故收集相关范围内的 MTF 曲线。

2 结果

2.1 Toric IOL 在生理囊袋内视觉质量的改变

Toric IOL 正位时具有良好的视觉质量(图 1,表 2),而在倾斜偏心的生理囊袋中会产生散光等低阶

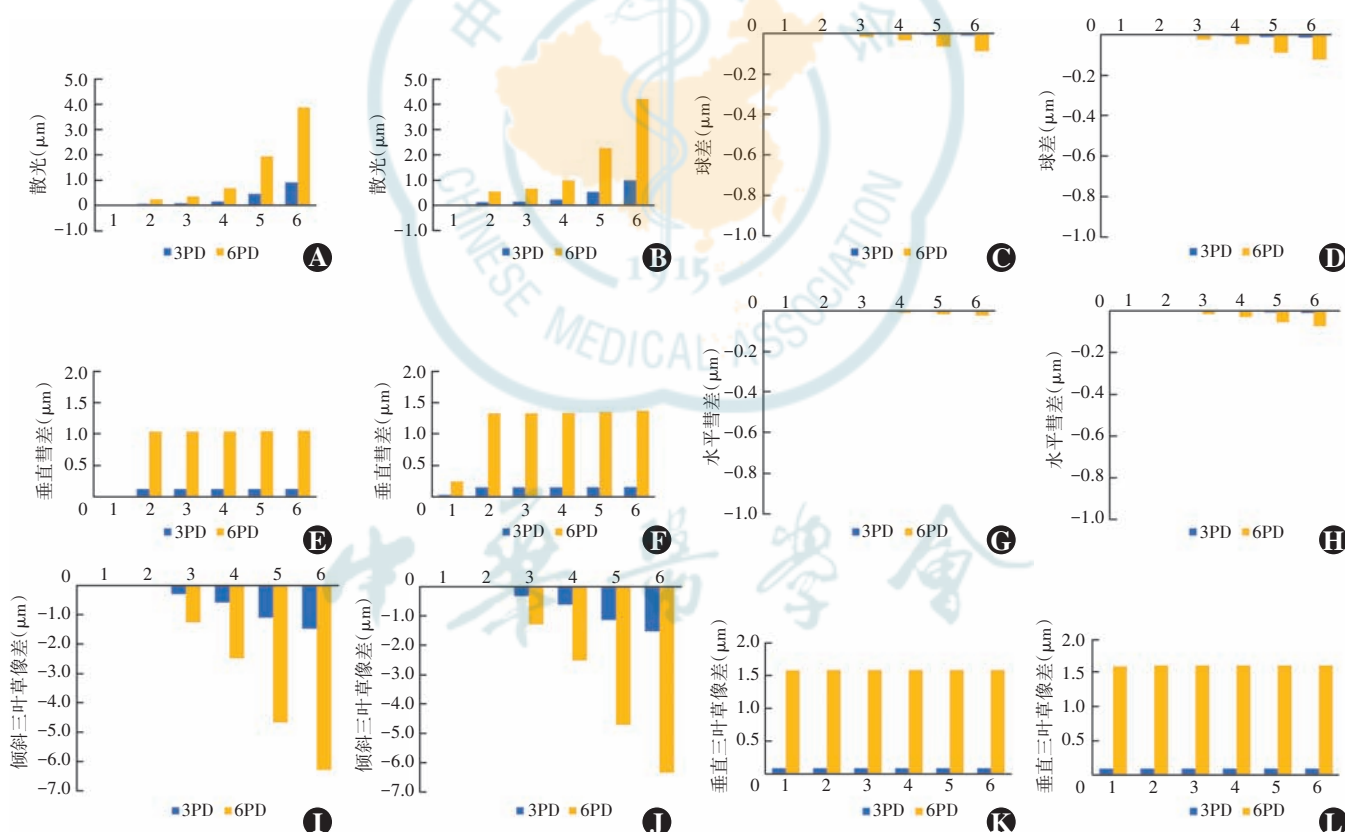


图1 ArcySof Toric T4 IOL 在生理囊袋中旋转后的波前像差 A:不合并κ角模型眼中散光 B:合并κ角模型眼中散光 C:不合并κ角模型眼中球差 D:合并κ角模型眼中球差 E:不合并κ角模型眼中垂直彗差 F:合并κ角模型眼中垂直彗差 G:不合并κ角模型眼中水平彗差 H:合并κ角模型眼中水平彗差 I:不合并κ角模型眼中倾斜三叶草像差 J:合并κ角模型眼中倾斜三叶草像差 K:不合并κ角模型眼中垂直三叶草像差 L:合并κ角模型眼中垂直三叶草像差 IOL:人工晶状体;PD:瞳孔直径;1代表 Toric IOL 无倾斜、偏心、旋转,在眼内居中;2~6 代表 Toric IOL 在生理囊袋内(倾斜 4.90°,偏心 0.21 mm)分别旋转 0、5、10、20、30°

Figure 1 Wavefront aberration of ArcySof toric T4 IOL after rotation in the capsular bag A: Astigmatism of model eye without angle κ B: Astigmatism of model eye with angle κ C: Spherical aberration of model eye without angle κ D: Spherical aberration of model eye with angle κ E: Vertical coma aberration of model eye without angle κ F: Vertical coma aberration of model eye with angle κ G: Horizontal coma aberration of model eye without angle κ H: Horizontal coma aberration of model eye with angle κ I: Oblique trefoil aberration of model eye without angle κ J: Oblique trefoil aberration of model eye with angle κ K: Vertical trefoil aberration of model eye without angle κ L: Vertical trefoil aberration of model eye with angle κ IOL: intraocular lens; PD: pupil diameter; 1 represented the centered toric IOL without tilt, decentration or rotation; 2~6 represented the toric IOL in the capsular bag (tilted 4.90°, decentered 0.21 mm) with rotation of 0, 5, 10, 20, 30°, respectively

像差,在高阶像差中主要引起彗差增大;残留柱镜度的改变与 Toric IOL 正位时相比无显著差异(图 2);MTF 值与 IOL 正位时相比呈下降趋势(图 3)。

模型眼中瞳孔直径由 3 mm 增加到 6 mm 时,模型眼具有更大的高阶和低阶像差(图 1,表 2),残留柱镜度的改变无显著差异(图 2),MTF 值下降更显著(图 3)。

与不合并 κ 角的模型眼相比,合并 κ 角的模型眼

低阶和高阶像差更大(图 1,表 2),残留柱镜度增大(图 2),MTF 值下降更显著(图 3)。

2.2 Toric IOL 在生理囊袋内合并旋转时视觉质量的改变

随着 Toric IOL 旋转度数的增大,离焦和散光等低阶像差逐渐增大,残留柱镜度逐渐增大,旋转至 30° 时散光矫正的能力基本消失。在高阶像差中,球差、彗差均无显著改变,倾斜三叶草像差逐渐增大(图 1,表 2)。

表 2 Liou-Brennan 模型眼中波前像差改变(μm)
Table 2 Comparison of wavefront aberration of the Liou-Brennan model eye (μm)

波前像差	M1					
	居中	旋转 0°	旋转 5°	旋转 10°	旋转 20°	旋转 30°
散光	0.000	0.054	0.080	0.157	0.454	0.909
球差	0.000	0.000	-0.002	-0.004	-0.008	-0.010
垂直彗差	0.000	0.123	0.124	0.124	0.124	0.125
水平彗差	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003
倾斜三叶草像差	0.000	0.000	-0.297	-0.585	-1.099	-1.481
垂直三叶草像差	0.087	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088
波前像差	M2					
	居中	旋转 0°	旋转 5°	旋转 10°	旋转 20°	旋转 30°
散光	-0.000	0.241	0.352	0.680	1.943	3.877
球差	0.000	0.000	-0.018	-0.035	-0.065	-0.088
垂直彗差	0.000	1.034	1.034	1.035	1.040	1.048
水平彗差	0.000	0.000	-0.005	-0.010	-0.018	-0.025
倾斜三叶草像差	0.000	0.000	-1.263	-2.487	-4.673	-6.296
垂直三叶草像差	1.579	1.585	1.585	1.585	1.584	1.584
波前像差	M3					
	居中	旋转 0°	旋转 5°	旋转 10°	旋转 20°	旋转 30°
散光	0.000	0.123	0.150	0.228	0.531	0.994
球差	0.000	0.000	-0.003	-0.005	-0.010	-0.014
垂直彗差	0.029	0.151	0.151	0.152	0.153	0.156
水平彗差	0.000	0.000	-0.002	-0.003	-0.006	-0.008
倾斜三叶草像差	0.000	0.000	-0.302	-0.596	-1.120	-1.509
垂直三叶草像差	0.090	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
波前像差	M4					
	居中	旋转 0°	旋转 5°	旋转 10°	旋转 20°	旋转 30°
散光	-0.000	0.550	0.661	0.992	2.266	4.217
球差	0.000	0.000	-0.024	-0.047	-0.089	-0.123
垂直彗差	0.248	1.326	1.327	1.331	1.346	1.368
水平彗差	0.000	0.000	-0.015	-0.029	-0.054	-0.072
倾斜三叶草像差	0.000	0.000	-1.274	-2.509	-4.716	-6.354
垂直三叶草像差	1.580	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

注: M1~4 分别代表 3 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼、3 mm 瞳孔直径合并 κ 角模型眼、6 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼和 6 mm 瞳孔直径合并 κ 角模型眼;居中代表 Toric IOL 无倾斜、偏心、旋转,在眼内居中;旋转代表 Toric IOL 在生理囊袋内(倾斜 4.90°,偏心 0.21 mm)旋转

Note: M1 to M4 represented model eyes with a pupil diameter of 3 mm without angle κ , 3 mm with angle κ , 6 mm without angle κ , and 6 mm with angle κ , respectively. Center represented the centered Toric IOL without tilt, decentration or rotation. Rotate represented the toric IOL in the capsular bag (tilted 4.90°, decentered 0.21 mm) with rotation



同时,随着旋转度数增大,MTF 值逐渐降低,在低空间频率时,MTF 曲线呈显著下降趋势,并且随着瞳孔直径增大,模型眼具有更大的球差和更小的 MTF 值,MTF 曲线下下降更显著(图 3)。

当模型眼瞳孔直径由 3 mm 增加到 6 mm,模型眼具有更大的高阶和低阶像差(图 1,表 2),残留柱镜度变化无显著差异(图 2),MTF 值下降更显著(图 3)。

与不合并 κ 角的模型眼相比,合并 κ 角的模型眼低阶和高阶像差更大(图 1,表 2),残留柱镜度更大(图 2),MTF 值下降更显著(图 3)。

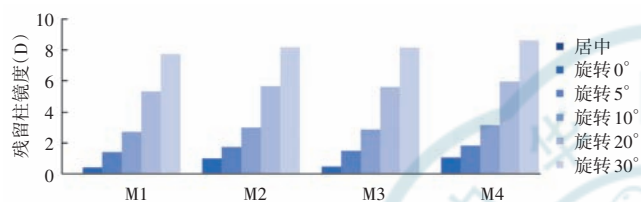


图 2 Liou-Brennan 模型眼残留柱镜度比较 M1~4 分别代表 3 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼、3 mm 瞳孔直径合并 κ 角模型眼、6 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼和 6 mm 瞳孔直径合并 κ 角模型眼;居中代表 Toric IOL 无倾斜、偏心、旋转,在眼内居中;旋转代表 Toric IOL 在生理囊袋内(倾斜 4.90°,偏心 0.21 mm)旋转

Figure 2 Comparison of residual astigmatism in four groups of Liou-Brennan model eyes M1 to M4 represented model eyes with a pupil diameter of 3 mm without angle κ , 3 mm with angle κ , 6 mm without angle κ , and 6 mm with angle κ , respectively. Center represented the centered toric IOL without tilt, decentration or rotation. Rotate represented the toric IOL in the capsular bag (tilted 4.90°, decentered 0.21 mm) with rotation

3 讨论

研究表明,超过 30% 的白内障患者术前合并角膜散光^[11],超过 0.75 D 的角膜散光会引起视物模糊、眩光等症状,显著降低视觉质量并影响患者生活质量。为了改善白内障术后视觉质量,白内障手术散光管理共识建议,术前超过 0.75 D 的规则性散光且伴有远视力脱镜需求的白内障患者可以考虑植入 Toric IOL^[12]。然而,术后 Toric IOL 倾斜、偏心和轴位旋转成为影响视力恢复的重要因素,Toric IOL 在眼内的位置受多种因素影响,包括自然晶状体位置、眼轴长度、IOL 设计、囊袋张力环的植入等^[4,12]。既往研究发现,白内障患者术后囊袋内的 IOL 一般会表现出 0.2~0.3 mm 的偏心和 2~3° 的倾斜,约 10% 的患者会有超过 0.4 mm 的偏心和 7° 的倾斜^[13],因此,术前对患者眼部情况的评估以及术后 IOL 位置的预测至关重要。

本研究探讨了模拟 Toric IOL 植入眼内后在囊袋内的位置变化对视觉质量的影响,既往研究中多探讨 Toric IOL 在模型眼内居中状态下发生旋转的视觉质量改变^[14],但是白内障术后 Toric IOL 在眼内倾斜、偏心和旋转常同时存在。既往研究发现晶状体在生理状态下通常存在一定程度的倾斜偏心,且术前晶状体位置与术后 IOL 位置具有较强相关性^[15]。Kimura 等^[8]研究也发现,晶状体和 IOL 的颞下倾斜为 4.22~5.30°,偏心为 0.03~0.12 mm。Wang 等^[15]发现对于

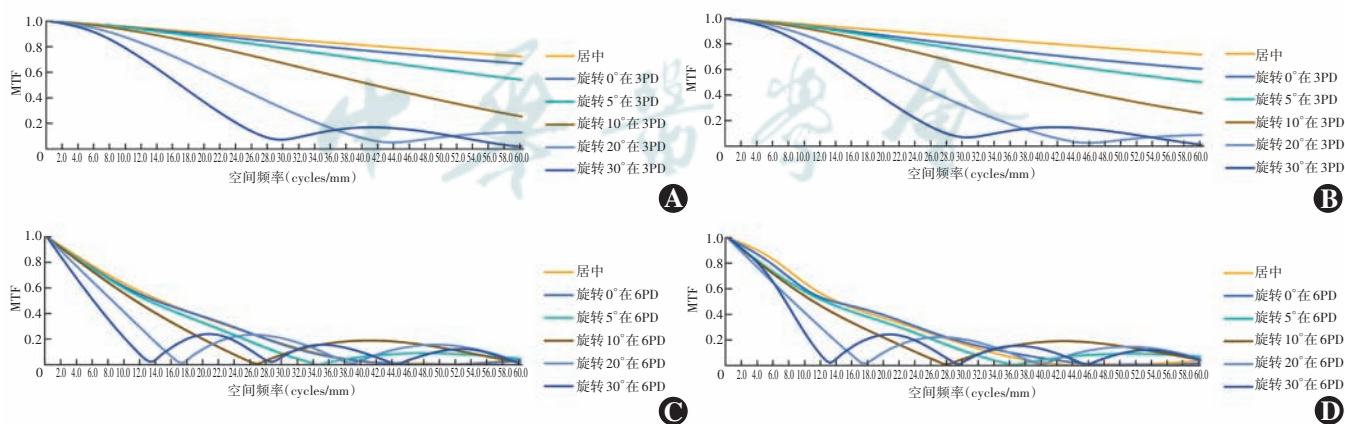


图 3 Liou-Brennan 模型眼中 Toric IOL 倾斜、偏心、旋转下的 MTF 曲线 A:3 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼旋转后的 MTF 曲线 B:3 mm 瞳孔直径合并 κ 角模型眼旋转后的 MTF 曲线 C:6 mm 瞳孔直径不合并 κ 角模型眼旋转后的 MTF 曲线 D:6 mm 瞳孔直径合并 κ 角模型眼旋转后的 MTF 曲线 居中代表 Toric IOL 无倾斜、偏心、旋转,在眼内居中;旋转代表 Toric IOL 在生理囊袋内(倾斜 4.90°,偏心 0.21 mm)旋转 IOL:人工晶状体;MTF:调制传递函数;PD:瞳孔直径

Figure 3 MTF curves of toric IOL after rotation in the capsular bag in the Liou-Brennan model eye A:MTF curves of the model eye for the 3 mm pupil diameter without the angle κ after rotation B:MTF curves of the model eye for the 3 mm pupil diameter with the angle κ after rotation C:MTF curves of the model eye for the 6 mm pupil diameter without the angle κ after rotation D:MTF curves of the model eye for the 6 mm pupil diameter with the angle κ after rotation Center represented the centered toric IOL without tilt, decentration or rotation. Rotate represented the toric IOL in the capsular bag (tilted 4.90°, decentered 0.21 mm) with rotation IOL:intraocular lens;MTF:modulation transfer function;PD:pupil diameter

晶状体,平均倾斜(4.92 ± 1.49)°,平均偏心(0.20 ± 0.10)mm;对于 IOL,平均倾斜(4.84 ± 1.36)°,平均偏心(0.17 ± 0.09)mm。不同的研究结果可能与样本量以及检查时参考轴的选择和检查仪器的差异有关^[16]。根据 Gu 等^[7]的研究,晶状体在非扩瞳条件下平均倾斜角度为(4.90 ± 1.81)°,平均偏心为(0.21 ± 0.02)mm,而 IOL 平均倾斜角度为(4.75 ± 1.66)°,平均偏心为(0.21 ± 0.02)mm。基于上述研究结果,本研究选择将 Toric IOL 植入倾斜 4.90°、偏心 0.21 mm 的生理囊袋内,并模拟其在生理囊袋内(倾斜 4.90°,偏心 0.21 mm)合并旋转 5°、10°、20°、30°条件下光学成像质量的变化,以更真实地反映 Toric IOL 植入术后的视觉质量变化,同时探讨瞳孔直径和 κ 角对视觉质量的影响。

本研究发现,Toric IOL 在生理囊袋中存在倾斜和偏心状态时,主要引起彗差的改变,这一现象可能与 Toric IOL 倾斜导致散光轴位偏移有关,进而降低了模型眼的光学质量。既往临床研究指出,当 IOL 同时存在倾斜和偏心时,IOL 可能改变光线进入眼内的角度,进而影响光线在视网膜上的分布,并可能产生一定的补偿效应,该补偿效应有助于改善对比敏感度,从而提升视觉质量^[17-18]。然而,关于 Toric IOL 倾斜和偏心对视觉的具体影响,仍需要更多的临床数据进行验证。

在模型眼中,当 Toric IOL 在生理囊袋内旋转时,随着旋转度数的增加,主要引起散光、离焦等低阶像差的改变,而对球差、彗差等高阶像差未表现出显著影响。然而,随着旋转度数的增加,倾斜三叶草像差逐渐增大,这与 Hong 等^[19]的研究结果一致,这一现象可能与 Toric IOL 的设计密切相关。为有效矫正散光,Toric IOL 设计中通常包含 1 个或多个平坦区域,这些区域需要与患者的散光轴对齐。而三叶草像差主要源于屈光系统中角膜和晶状体的不对称性,在模型眼中,Toric IOL 倾斜和偏心破坏了模型眼对称性,光线通过不对称的光学区引起了三叶草像差的增加。彗差大小主要受视场和孔径大小的影响,球差则与孔径大小密切相关。因此,在本研究中旋转度数的增加并未显著影响球差和彗差的变化。

瞳孔大小和 κ 角是白内障术后视觉质量的常见影响因素。 κ 角被定义为视轴与瞳孔轴之间的夹角。既往研究发现,当 κ 角超过 0.5 mm 时,会显著影响视觉质量^[20]。在一项回顾性研究中,Neuman 等^[21]发现 κ 角的平均值为(0.368 ± 0.205)mm,大多数分布于颞侧。因此,本研究选择在合并颞侧 0.368 mm κ 角的模型眼中,分析 Toric IOL 旋转时产生的像差和 MTF 曲

线变化,以探讨 κ 角对视觉质量的具体影响。研究表明, κ 角较大的患者(>0.4 mm),虽然植入多焦点 IOL 后视力无显著变化,但眩光和光晕等不良光学现象的发生率较高^[20]。本研究中,与不合并 κ 角的模型眼(M1、M3)相比,合并 κ 角的模型眼(M2、M4)表现出更显著的彗差,这可能是由于较大的 κ 角导致光线不能通过 Toric IOL 光学区的中心,而是穿过其周围的光学区域,从而导致眩光、光晕等不良光学现象。此外,6 mm 瞳孔直径模型眼(M3、M4)较 3 mm 瞳孔直径模型眼(M1、M2)产生更大的波前像差,尤其是球差,因为球差主要与瞳孔直径大小有关,这与既往研究一致^[22]。此外,本研究还观察到 6 mm 瞳孔直径模型眼可以模拟夜视状态下的视觉质量,随着瞳孔直径的增大,进入眼内光线增加,导致高阶像差增大,这与 Bamdad 等^[23]的研究结果一致。因此,较大的 κ 角和瞳孔直径可能通过引起白内障术后不良的光学现象,如色散、眩光、光晕,从而影响视觉质量。

Toric IOL 是治疗合并散光的白内障患者的有效手段,但对于术前发现存在较大 κ 角、晶状体显著倾斜和偏心、暗室下瞳孔直径较大、角膜散光不稳定、术前散光轴向标记困难、术后 Toric IOL 旋转高风险或合并其他眼内疾病的白内障患者,应慎重评估 Toric IOL 植入的可行性和必要性,制定个体化的治疗方案,以避免术后出现残余散光或 IOL 位置改变而引起视觉质量下降。光学设计软件 Zemax 中建立模型眼是目前体外评估 IOL 植入后视觉质量的常见方法,通过构建不同类型的模型眼并模拟光线经过屈光间质成像于视网膜的过程,从而模拟并分析 IOL 倾斜、偏心、旋转对视觉质量的影响,并可针对特殊角膜形态,如圆锥角膜进行模拟,这一体外评估方法有助于理解 IOL 在不同位置或异常屈光间质条件下的成像特性,为术前规划、术后视觉质量预测提供依据^[24]。

本研究的局限性在于,模型眼评估 IOL 稳定性的方法是一种理论性研究,缺乏临床数据支持,如果未来能与临床数据相结合共同论证,结果会更具有说服力。其次,Liou-Brennan 模型眼是基于人眼解剖数据建立的模型眼,虽然已证实是目前应用较精确和广泛的模型眼,但为了提升评估的准确性,未来可以考虑收集相关地区人眼解剖数据,并优化模型眼设计以获得更准确的评估结果。本研究中搭建模型眼应用的是 T4 Toric IOL,未来可进一步研究不同散光度数的 Toric IOL 对视觉质量的影响。IOL 在眼内的稳定性与眼轴、囊袋大小、IOL 设计等多种因素相关^[25-26],未来可借助模型眼进行更深入的 IOL 稳定性相关研究。

综上所述, Toric IOL 在正位时模型眼表现出良好的视觉质量, 在生理囊袋中会引起高阶像差和低阶像差的增加, 当 Toric IOL 在生理囊袋中合并旋转时会明显影响 Toric IOL 的散光矫正能力, 当 Toric IOL 旋转至 30° 时, 其散光矫正能力基本消失。κ 角的存在对模型眼的整体视觉质量无显著影响, 但其可能与术后不良的光学现象, 如眩光和光晕有关。同时, 大瞳孔, 即模拟在夜视状态下的模型眼会更容易出现眩光和光晕, 并且对倾斜、偏心和旋转更敏感。随着双焦点或三焦点 IOL 联合 Toric IOL 的使用, 这些不良光学现象可能更复杂, 因此未来需要进一步探索如何优化 IOL 设计和定位以最大限度减少 Toric IOL 旋转和其他不良因素对视觉质量的影响。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 李雪丹: 参与研究设计、研究实施、数据分析、文章撰写及修改; 宋慧: 参与选题、研究设计、数据分析、文章修改及定稿

参考文献

- [1] Yeo B, Ong R, Ganasekar P, et al. Cataract surgery and cognitive benefits in the older person: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ophthalmology*, 2024, 131(8): 975–984. DOI: 10.1016/j.ophtha.2024.02.003.
- [2] Lawu T, Mukai K, Matsushima H, et al. Effects of decentration and tilt on the optical performance of 6 aspheric intraocular lens designs in a model eye[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2019, 45(5): 662–668. DOI: 10.1016/j.jcrs.2018.10.049.
- [3] Miret JJ, Camps VJ, García C, et al. Analysis of the optical performance of intraocular lenses using profilometric measurements[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2025, 263(2): 451–465. DOI: 10.1007/s00417-024-06628-1.
- [4] Ucar F, Turgut Ozturk B. Effectiveness of toric IOL and capsular tension ring suturing technique for rotational stability in eyes with long axial length[J]. *Int Ophthalmol*, 2023, 43(8): 2917–2924. DOI: 10.1007/s10792-023-02694-2.
- [5] Al-Mohtaseb Z, Steigleman WA, Pantanelli SM, et al. Toric monofocal intraocular lenses for the correction of astigmatism during cataract surgery: a report by the American Academy of Ophthalmology[J]. *Ophthalmology*, 2024, 131(3): 383–392. DOI: 10.1016/j.ophtha.2023.10.010.
- [6] Ale JB. Intraocular lens tilt and decentration: a concern for contemporary IOL designs[J]. *Nepal J Ophthalmol*, 2011, 3(1): 68–77. DOI: 10.3126/nepjoph.v3i1.4281.
- [7] 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. DOI: 10.21037/atm-20-1008.
- [8] Kimura S, Morizane Y, Shiode Y, et al. Assessment of tilt and decentration of crystalline lens and intraocular lens relative to the corneal topographic axis using anterior segment optical coherence tomography[J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0184066[2025-06-20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28863141/>. DOI: 10.1371/journal.pone.0184066.
- [9] 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.
- [10] Thibos LN, Applegate RA, Schwiegerling JT, et al. Standards for reporting the optical aberrations of eyes[J]. *J Refract Surg*, 2002, 18(5): S652–660. DOI: 10.3928/1081-597X-20020901-30.
- [11] Jiang Y, Qin Y, Bu S, et al. Distribution and internal correlations of corneal astigmatism in cataract patients[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 11514. DOI: 10.1038/s41598-021-91028-2.
- [12] 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.
- [13] 钱玖林, 廖莹, 唐玉玲, 等. 非球面人工晶体偏心倾斜以及视觉质量的对比研究[J]. *中华眼科杂志*, 2022, 58(7): 521–528. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20211103-00518.
- [14] Qian JL, Liao X, Tang YL, et al. Comparative study of decentration, tilt and visual quality after implantation of aspherical intraocular lenses[J]. *Chin J Ophthalmol*, 2022, 58(7): 521–528. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20211103-00518.
- [15] Na KS, An D, Kim HS, et al. Relation between change of effective lens position and toric IOL rotation after toric IOL implantation[J]. *Can J Ophthalmol*, 2025, 60(1): 8–14. DOI: 10.1016/j.jcjo.2024.05.011.
- [16] Wang L, Guimaraes de Souza R, Weikert MP, et al. Evaluation of crystalline lens and intraocular lens tilt using a swept-source optical coherence tomography biometer[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2019, 45(1): 35–40. DOI: 10.1016/j.jcrs.2018.08.025.
- [17] 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.
- [18] Eppig T, Scholz K, Löffler A, et al. Effect of decentration and tilt on the image quality of aspheric intraocular lens designs in a model eye[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2009, 35(6): 1091–1100. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.01.034.
- [19] Liu X, Xie L, Huang Y. Effects of decentration and tilt at different orientations on the optical performance of a rotationally asymmetric multifocal intraocular lens[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2019, 45(4): 507–514. DOI: 10.1016/j.jcrs.2018.10.045.
- [20] Hong Y, Sun Y, Liu H, et al. Effect of decentration, rotation, and tilt on objective optical quality of plate haptic toric intraocular lenses in the early postoperative period[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2024, 13(2): 19. DOI: 10.1167/tvst.13.2.19.
- [21] Qi Y, Lin J, Leng L, et al. Role of angle κ in visual quality in patients with a trifocal diffractive intraocular lens[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2018, 44(8): 949–954. DOI: 10.1016/j.jcrs.2018.05.026.
- [22] Neuman G, Abulafia A, Wasser L, et al. Distribution of angle alpha and angle kappa offsets among adult candidates for cataract surgery[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2025, 263(1): 157–170. DOI: 10.1007/s00417-024-06596-6.
- [23] Lin H, Zhang J, Zhang Y, et al. Capsular tension ring implantation for intraocular lens decentration and tilt in highly myopic eyes: a randomized clinical trial[J]. *JAMA Ophthalmol*, 2024, 142(8): 708–715. DOI: 10.1001/jamaophthalmol.2024.2215.
- [24] Bamdad S, Ahmad Razavizadeh S, Farvardin M, et al. Vision-related quality of life after bilateral implantation of monofocal and multifocal intraocular lenses[J]. *J Ophthalmic Vis Res*, 2022, 17(1): 19–26. DOI: 10.18502/jovr.v17i1.10166.
- [25] 潘若琳, 廖莹, 兰长骏. 体外光学质量测试系统对 IOL 光学质量评估应用的研究进展[J]. *中华实验眼科杂志*, 2024, 42(3): 290–296. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20221107-00521.
- [26] Pan RL, Liao X, Lan CJ. Research progress in the application of *in vitro* optical quality test system for the assessment of IOL optical quality[J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2024, 42(3): 290–296. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20221107-00521.
- [27] 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. DOI: 10.1007/s00417-023-06208-9.
- [28] 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: 2025-06-20 修回日期: 2025-11-10)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)

