

· 实验研究 ·

Hwey-Lan Liou 模型眼复曲面人工晶状体偏心及旋转对成像质量的影响

柴茜楠 张斌 耿玉欣 杜颖华 刘丹岩 马菲妍 魏玉华

050000 石家庄,河北医科大学第二医院眼科

通信作者:张斌,Email:1003695459@qq.com

DOI:10.3710/cma.j.issn.2095-0160.2017.11.010

【摘要】 背景 研究证实白内障囊外摘出联合 Toric 人工晶状体(IOL)植入术能够有效矫正角膜散光,改善患者的裸眼视力,但 Toric IOL 植入后可能因偏心及旋转造成 IOL 的位移误差,其对成像质量的影响与球面 IOL 有何不同值得关注和研究。**目的** 评价 Toric IOL 的旋转和偏心对成像质量和波前像差的影响。**方法** 将放在 Hwey-Lan Liou 模型眼中的 SN60AT 球面 IOL 和 Toric IOL 沿各自的子午线和不同轴位偏移,子午线间隔为 5°,轴位偏离自中心沿 0°~90°方向,偏心量分别是 0.25、0.50 和 0.75 mm,Toric IOL 在模型眼中模拟旋转 5°和 10°,评价和比较不同 IOL 偏心量和旋转度对成像质量及波前像差的影响。**结果** 球面 IOL 与 Toric IOL 居中时各瞳孔直径下调制传递函数(MTF)曲线在各空间频率时都非常接近 4 mm 瞳孔直径条件下,偏心 0.25 mm 时 SN60AT IOL 6 c/d 和 12 c/d 的 MTF 值分别为 0.581 087 和 0.411 960,T3 IOL 分别为 0.454 259 和 0.382 313,T4 IOL 分别为 0.426 020 和 0.360 490,T5 IOL 分别为 0.425 606 和 0.359 877。偏心 0.50 mm 时 SN60AT IOL 6 c/d 和 12 c/d 的 MTF 值分别为 0.573 073 和 0.412 787,T3 IOL 分别为 0.450 943 和 0.379 481,T4 IOL 分别为 0.423 153 和 0.356 664,T5 IOL 分别为 0.422 881 和 0.356 230。偏心 0.75 mm 时 SN60AT IOL 6 c/d 和 12 c/d 的 MTF 值分别为 0.560 038 和 0.413 624,T3 IOL 分别为 0.445 597 和 0.374 322,T4 IOL 分别为 0.418 522 和 0.350 087,T5 IOL 分别为 0.418 468 和 0.349 976。分别沿 0°、5°、10°、90°子午线偏心时 MTF 值非常接近。球面 IOL 与 Toric IOL 的均方根值(RMS)随着偏心量的增加而递增,其中彗差的增加较为显著,T4 IOL 偏心 0.75 mm 时慧差由居中时的 0 增加到 C(3,-1)-0.049 79 μm 、C(3,1)-0.037 59 μm ;三叶草像差增加到 C(3,3)0.005 72 μm 、C(3,-3)0.004 64 μm ,散光有少许增加。Toric IOL 旋转角度由 5°增大至 10°时,高空间频率下的成像质量显著下降,Toric IOL 旋转时的 RMS 的变化主要由散光引起,且高阶像差没有任何改变。**结论** Toric IOL 对偏心的耐受性与球面 IOL 非常接近,Toric IOL 偏心时的成像质量只受偏心量的影响。Toric IOL 偏心主要带来彗差增加,而散光和三叶草像差增加较少;Toric IOL 旋转主要引起散光增加,高阶像差并未发生改变。

【关键词】 人工晶状体; 眼部屈光/生理性; 散光/生理病理性; 人工晶状体植入; 偏心; 成像质量; 视力/生理性; 高阶像差

Optical performance of rotation and decentration of Toric intraocular lens implant in Hwey-Lan Liou model eye Chai Qiannan, Zhang Bin, Geng Yuxin, Du Yinghua, Liu Danyan, Ma Feiyan, Wei Yuhua

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

Corresponding author: Zhang Bin, Email: 1003695459@qq.com

[Abstract] Background Cornea astigmatism can be effectively corrected by implanting Toric intraocular lens (IOL) during cataract surgery and therefore improve visual acuity of patients. However, the decentration and rotation position errors were inevitable sometime. What's the difference of effect of position errors on quality of image between spherical IOL and Toric IOL needs further research. **Objective** This study was to evaluate the optical performance and wavefront with rotation and decentration of Toric IOL. **Methods** Different decentration for SN60AT IOL (spherical IOL) and Toric IOL in Hwey-Lan Liou model eyes was set with the role as follows:

decentration 0.25 mm to 0.75 mm in a 5°-interval from 0° to 90°. Furthermore, Toric IOL was rotated at 5° and 10°, respectively. Then the image performances of SN60AT IOL and Toric IOL at different decentration distances and rotated degrees were evaluated with modulation transfer function (MTF) and value of wavefront aberration under all conditions. **Results** At the centration, the MTF curves of spherical IOL and Toric IOL were similar under 3, 4 and 5 mm pupil diameter at each spatial frequency. Under the condition of 4 mm pupil diameter, when the decentration was 0.25 mm, the MTF values of SN60AT IOL at 6 c/d and 12 c/d were 0.581 087 and 0.411 960, respectively. T3 IOL were 0.454 259 and 0.382 313, T4 IOL were 0.426 020 and 0.360 490, T5 IOL were 0.425 606 and 0.359 877. When the decentration was 0.50 mm, the MTF values of SN60AT at 6 c/d and 12 c/d were 0.573 073 and 0.412 787, respectively. T3 IOL were 0.450 943 and 0.379 481, T4 IOL were 0.423 153 and 0.356 664, T5 IOL were 0.422 881 and 0.356 230. When the decentration was 0.75 mm, the MTF values of SN60AT at 6 c/d and 12 c/d were 0.560 038 and 0.413 624, respectively. T3 IOL were 0.445 597 and 0.374 322, T4 IOL were 0.418 522 and 0.350 087, T5 IOL were 0.418 468 and 0.349 976. When the IOL decentralized along 0°, 5°, 10°, 90° meridian line, the MTF values were almostly same. The root mean square (RMS) of spherical IOL and Toric IOL was increased when the IOL decentralized from 0 mm to 0.75 mm, with the most increasing level in coma aberration and slight increase in trefoil aberration. When the T4 IOL decentralized from centre to 0.75 mm, the coma increased from 0 to C(3, -1) -0.049 79 μm , C(3, 1) -0.037 59 μm and the trefoil aberration increased from 0 to C(3, 3) 0.005 72 μm , C(3, -3) 0.004 64 μm . With the increase of rotation degrees (from 5° to 10°) of Toric IOL, the MTF was worse at high spatial frequency. Toric IOL rotation caused the increase of astigmatism and residual astigmatism and spherical error, but not high order aberration. **Conclusions** The tolerance of Toric IOL to decentration is very close to the spherical IOL, and optical performance is only associated with the amount of decentration but not direction. The aberration caused by Toric IOL decentration is mainly coma. The rotation of Toric IOL causes astigmatism error but not high order aberrations.

[Key words] Lenses, intraocular; Refraction, ocular/physiology; Astigmatism/physiopathology; Lens implantation, intraocular; Decentration; Optical performance; Visual acuity/physiology; High order aberrations

白内障超声乳化联合人工晶状体 (intraocular lens, IOL) 植入术后 Toric IOL 的旋转稳定性一直是研究的热点, Toric IOL 偏心后对成像质量的影响也不容小觑。即使 IOL 囊袋内植入也仍有不同程度偏心和倾斜^[1], 偏心量为 0.00 ~ 1.09 mm, 平均 (0.30 ± 0.16) mm^[2-3]。球面 IOL 偏心时可以造成散光和慧差的增加, 而光学结构更为复杂的非球面 IOL 偏心时会带来更多的慧差及其他高阶像差的增加^[4]。由于球差的不同, 非球面 IOL 偏心后光学质量可能比球面 IOL 更差^[5]。与球面 IOL 相比, Toric IOL 复曲面为非旋转对称结构, 在扁平轴和陡峭轴上每条子午线上的屈光度都不等, 因此可矫正白内障患者伴随的角膜散光。Toric IOL 旋转与其引起散光残留的相关性已得到证实^[6], 但旋转对波前相差改变的影响尚不清楚, 同时 Toric IOL 偏心及偏心方向造成的影响更为复杂。本研究利用模型眼分析 Toric IOL 和球面 IOL 发生偏心和旋转时对成像质量产生的影响, 为临床研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 模型眼的建立

参照文献[7-8]的方法, 在 Hwey-Lan Liou 精密模型眼角膜顶点后 4.5 mm 处植入 SN60AT、Toric

T3、T4 和 T5 IOL, 使 IOL 的中心位于光轴上, 设定 Y 轴为模型眼中 Toric IOL 后表面的陡峭轴, X 轴为平坦轴。角膜顶点前插入理想薄透镜柱镜抵消 Toric IOL 的屈光度以自动优化眼的轴长, 使平行光线汇聚于视网膜平面。

1.2 方法

1.2.1 Toric IOL 偏心对调制传递函数和波前像差的影响 模拟 550 nm 波长单色光条件, 将 SN60AT IOL、Toric T3、T4 和 T5 IOL 分别沿 0°、5°、10° 和 90° 子午线中心偏离, 分别偏心 0.25、0.50 和 0.75 mm, 分别测定 IOL 在 3、4 和 5 mm 瞳孔直径下各空间频率调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 值和波前像差变化趋势, 计算不同瞳孔直径下各 IOL 沿 X 轴偏心量的 MTF 值与居中 MTF 值的比值 ($\text{MTF}_{\text{偏心}}/\text{MTF}_{\text{居中}}$)。采用 Originpro 7.5 制图软件 (美国 Origin Lab 公司) 绘图。

1.2.2 不同 Toric IOL 旋转度 MTF 和波前像差的测定 设定瞳孔直径为 4 mm, 将 3 种 Toric IOL 在模型眼中分别旋转 5° 和 10°, 分别测定 MTF 和波前像差值。采用 Originpro 7.5 制图软件绘图。

2 结果

2.1 不同 IOL 偏心度 MTF 值的变化

IOL 居中时,球面 IOL 与 Toric IOL 在 3、4 和 5 mm 瞳孔直径下 6 c/d 和 12 c/d 的 MTF 曲线非常接近,并且 MTF 曲线随着模型眼瞳孔直径的增大而降低(图 1)。在瞳孔直径为 3 mm 且 IOL 居中时,球面 IOL 与 Toric IOL 的光学成像质量在 6 c/d 和 12 c/d 空间频率都非常接近,IOL 的 MTF 值随着偏心量的

增大均下降,但偏心后球面 IOL 的 MTF 值稍高于 Toric IOL(表 1)。沿 X 轴偏心方向分布的高低空间频率 MTF 值为直线型降低。瞳孔直径为 4 mm 且 IOL 居中时,4 种 IOL MTF 曲线较 3 mm 瞳孔直径时均降低,IOL 的 MTF 值均随着偏心量的增大而小幅度下降,MTF 值低于 3 mm 瞳孔下相应的数值。瞳孔直径为 5 mm 时,4 种 IOL 的光学质量较 3 mm 瞳孔直径时均显著下降,并且所有偏心 IOL 均比居中 IOL 的 MTF 值下降明显(图 2)。

表 1 不同瞳孔直径下 SN60AT、T3、T4 和 T5 IOL 在 6 c/d 和 12 c/d 空间频率的 MTF 值

		SN60AT		T3		T4		T5	
		6 c/d	12 c/d	6 c/d	12 c/d	6 c/d	12 c/d	6 c/d	12 c/d
3 mm 瞳孔直径	偏心	0.903 867	0.785 968	0.869 492	0.718 001	0.852 761	0.690 001	0.852 201	0.688 764
	0.25 mm								
	偏心	0.901 291	0.780 967	0.866 069	0.711 680	0.848 584	0.682 069	0.848 255	0.681 298
	0.50 mm								
4 mm 瞳孔直径	偏心	0.896 633	0.771 693	0.860 043	0.700 600	0.841 353	0.668 530	0.841 434	0.668 556
	0.25 mm								
	偏心	0.581 087	0.411 960	0.454 259	0.382 313	0.426 020	0.360 490	0.425 606	0.359 877
	0.25 mm								
5 mm 瞳孔直径	偏心	0.573 073	0.412 787	0.450 943	0.379 481	0.423 153	0.356 664	0.422 881	0.356 230
	0.50 mm								
	偏心	0.560 038	0.413 624	0.445 597	0.374 322	0.418 522	0.350 087	0.418 468	0.349 976
	0.75 mm								
5 mm 瞳孔直径	偏心	0.383 407	0.286 954	0.305 871	0.245 740	0.289 649	0.233 066	0.289 506	0.232 746
	0.25 mm								
	偏心	0.380 274	0.283 929	0.303 950	0.244 347	0.287 891	0.231 110	0.287 845	0.230 847
	0.50 mm								
5 mm 瞳孔直径	偏心	0.374 794	0.278 624	0.300 849	0.241 718	0.285 045	0.227 640	0.285 148	0.227 502
	0.75 mm								

注:IOL:人工晶状体;MTF:调制传递函数

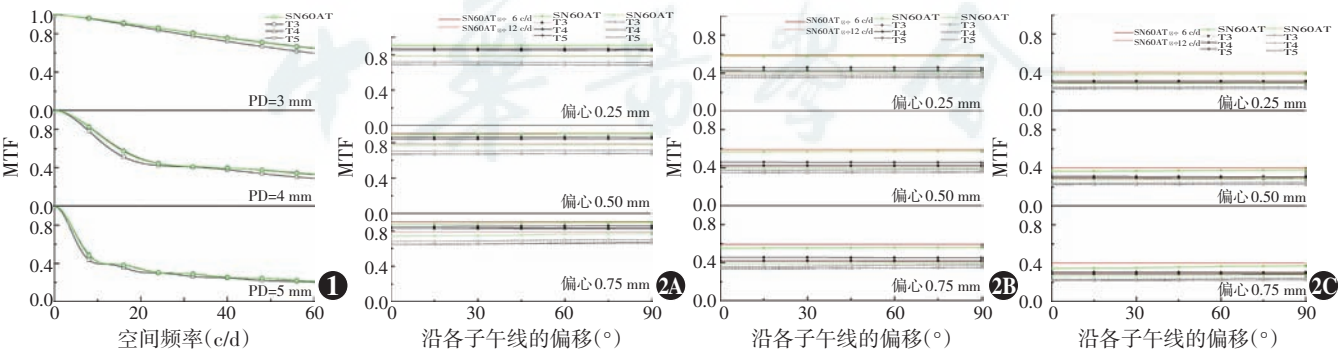


图 1 不同瞳孔直径下 MTF 曲线 3、4 和 5 mm 瞳孔直径下 SN60AT、T3、T4 和 T5 IOL 的 MTF 曲线非常接近 PD:瞳孔直径;MTF:调制传递函数
图 2 不同瞳孔直径下各种 IOL 在不同空间频率的 MTF 值 Toric IOL 的 MTF 值略低于球面 IOL A:3 mm 瞳孔直径下 SN60AT、T3、T4 和 T5 IOL 在 6 c/d 和 12 c/d 空间频率的 MTF 值 B:4 mm 瞳孔直径下 SN60AT、T3、T4 和 T5 IOL 在 6 c/d 和 12 c/d 空间频率的 MTF 值较 3 mm 瞳孔时降低 C:5 mm 瞳孔直径下 SN60AT、T3、T4 和 T5 IOL 在 6 c/d 和 12 c/d 空间频率的 MTF 值较 3 mm 瞳孔时进一步降低 MTF:调制传递函数 实线:空间频率 6 c/d 时;虚线:空间频率 12 c/d 时

瞳孔直径为 3、4 和 5 mm 状态下,Toric IOL 偏心时 MTF 值比居中时降低,3 种瞳孔直径下降的程度基

本相同。随着偏心量增大,MTF_{偏心}/MTF_{居中}比值有所下降,但下降幅度与球面 IOL 均十分接近,瞳孔直径为

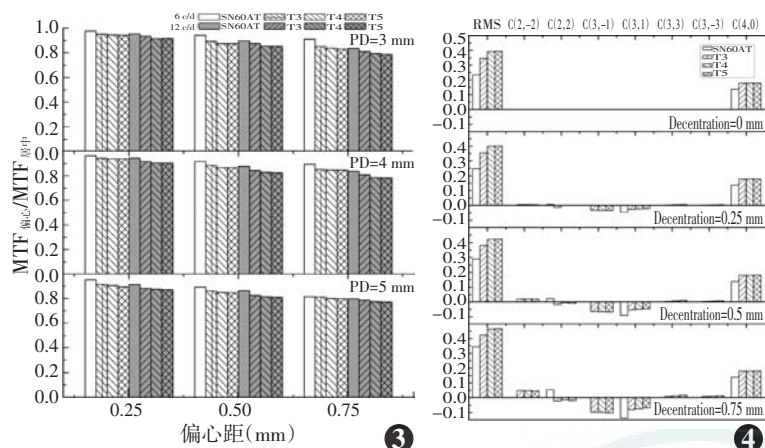


图3 SN60AT、T3、T4 和 T5 IOL 在 6 c/d 和 12 c/d 空间频率时 $MTF_{偏中}/MTF_{居中}$ 值 3、4 和 5 mm 瞳孔下 Toric IOL 偏心时 MTF 值降低,不同瞳孔直径下 MTF 值降低程度接近.随着 IOL 偏心量增大, $MTF_{偏中}/MTF_{居中}$ 值下降,SN60AT、T3、T4 和 T5 IOL 下降幅度均接近 PD:瞳孔直径;MTF:调制传递函数 图4 4 mm 瞳孔直径下各 IOL 不同偏心量波前像差的变化 IOL 偏心量增加,RMS 增加,球差无变化.偏心 0.25 mm 时 4 种 IOL 均产生了少量的慧差;偏心 0.50 mm 时慧差增加更明显,伴随产生少量散光,并且出现三叶草像差;偏心 0.75 mm 时散光和三叶草像差均增加,慧差的增加更为明显 RMS:均方根值

5 mm 时偏心 0.50 mm SN60AT 球面 IOL 的 $MTF_{偏中}/MTF_{居中}$ 为 0.893, T5 IOL 的比值为 0.846;偏心 0.75 mm 时球面 IOL 的比值为 0.814, T5 IOL 的比值为 0.799;Toric IOL 与球面 IOL $MTF_{偏中}/MTF_{居中}$ 的最大差距为 4.7% (图 3)。

2.2 不同 IOL 各偏心量下的波前像差变化

当瞳孔直径相同时 C(4,0)项球差值并不随 IOL 偏心量改变,偏心后各 IOL 产生的慧差、三叶草像差、散光及均方根值 (root mean square, RMS) 均有不同程度增加。瞳孔直径为 4 mm、IOL 偏心 0.25 mm 时 4 种 IOL C(3,1)项产生少量慧差;偏心 0.50 mm 时 4 种 IOL 慧差增加更明显,而且 C(2,2)项产生少量散光,同时 C(3,3)项出现三叶草像差;偏心 0.75 mm 时所有 IOL 的散光和三叶草像差均增加,慧差增加更为显著(图 4,表 2)。

表 2 4 mm 瞳孔直径下 4 种 IOL 不同偏心量的波前像差变化 (μm)

IOL 型号		RMS	C(2,-2)	C(2,2)	C(3,-1)	C(3,1)	C(3,3)	C(3,-3)	C(4,0)
SN60AT	居中	0.234 85	0	0	0	0	0	0	0.137 50
	偏心 0.25 mm	0.247 50	0	0.002 92	0	-0.022 83	0	0	0.137 50
	偏心 0.50 mm	0.290 40	0	0.011 80	0	-0.045 77	0	0	0.137 50
	偏心 0.75 mm	0.344 69	0	0.026 62	0	-0.068 84	0	0	0.138 33
T3	居中	0.345 95	0	0	0	0	0	0	0.178 91
	偏心 0.25 mm	0.355 07	0.002 66	-0.007 17	-0.016 41	-0.013 45	0.001 24	0.001 07	0.178 91
	偏心 0.50 mm	0.380 84	0.010 40	-0.009 07	-0.032 49	-0.026 64	0.002 45	0.002 13	0.179 08
	偏心 0.75 mm	0.423 33	0.023 91	-0.012 42	-0.049 32	-0.040 44	0.003 69	0.003 28	0.179 31
T4	居中	0.391 44	0	0	0	0	0	0	0.178 49
	偏心 0.25 mm	0.399 93	0.002 58	-0.000 45	-0.016 90	-0.012 50	0.001 91	0.001 52	0.178 54
	偏心 0.50 mm	0.424 07	0.010 10	-0.003 26	-0.033 46	-0.024 76	0.003 78	0.003 03	0.178 67
	偏心 0.75 mm	0.463 95	0.023 22	-0.008 17	-0.049 79	-0.037 59	0.005 72	0.004 64	0.178 89
T5	居中	0.393 96	0	0	0	0	0	0	0.178 49
	偏心 0.25 mm	0.402 24	0.002 47	-0.000 44	-0.017 31	-0.011 54	0.002 59	0.001 90	0.178 53
	偏心 0.50 mm	0.425 81	0.009 66	-0.004 12	-0.034 27	-0.022 85	0.005 13	0.003 77	0.179 98
	偏心 0.75 mm	0.465 17	0.022 20	-0.010 50	-0.052 02	-0.034 69	0.007 77	0.005 77	0.180 19

注:IOL:人工晶状体;RMS:均方根值

2.3 不同程度 Toric IOL 旋转下 MTF 曲线的变化

随着 Toric IOL 旋转度由 5° 增大至 10° , 12 c/d 空间频率下 T3、T4、T5 IOL 的 MTF 曲线明显下降, 6 c/d 空间频率下 MTF 曲线降低较为缓慢, 散光度较大的 T5 IOL 较 T3 IOL 的 MTF 曲线下降更为明显(图 5)。

2.4 不同程度 Toric IOL 旋转下波前像差的变化

随着 Toric IOL 旋转度增加, RMS 有不同程度增加, 但与偏心引起的波前像差变化明显不同的是 RMS 的变化是由散光引起的, 并且慧差和三叶草像差始终为 0, Toric IOL 旋转时球面像差也没有改变(图 6)。

因为 Toric IOL 旋转既没有引起球面像差的改变, 也没有引入新的慧差和三叶草像差, 故在本研究中我们仅采用 3 mm 瞳孔直径来观察。

3 讨论

研究证实, 对于存在角膜散光的患者在白内障手术中准确植入 Toric IOL 可以有效矫正散光, 使患者获得良好的裸眼视力^[9-12], 确定其是否有效抵消角膜散光的主要因素有其柱镜大小和轴位是否准确^[9-10, 13-14]。植入 Toric IOL 后其在眼内的旋转使角膜散光轴和

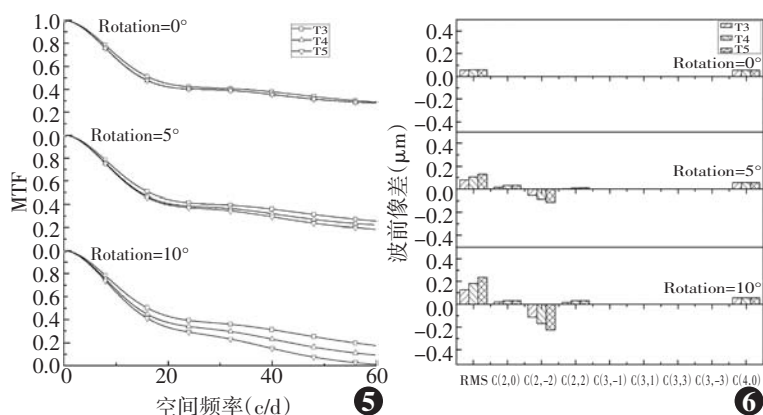


图5 4 mm瞳孔直径下T3、T4和T5 IOL旋转5°和10°的MTF曲线 随着Toric IOL旋转度增加,12 c/d空间频率下MTF曲线明显下降,6 c/d空间频率下MTF曲线降低较为缓慢.T5 IOL比T3 IOL的MTF曲线下降低明显 MTF:调制传递函数

图6 3 mm瞳孔直径下T3、T4和T5 IOL旋转5°和10°波前相差的改变 Toric IOL旋转时球差未发生变化,慧差和三叶草像差为0 RMS:均方根值

IOL柱镜形成2个交叉的柱镜,二者的屈光混合后形成新的散光度和轴位,从而导致术后与术前目标屈光度不一致^[15-16],因此散光IOL植入的轴位及其旋转稳定性一直受到研究者的关注。目前已经证实,Toric IOL植入后在眼内具有良好的旋转稳定性,但仍有15%的患者术后存在3°~5°的轴位偏差^[17-19]。患者晶状体囊袋直径过大、囊袋放射状撕裂和囊袋松弛或纤维化、囊膜覆盖不对称等原因不但可以造成IOL的旋转,还可以引起不同程度的偏心^[16,20-21],且已证实各种类型IOL都存在不同程度的偏心和倾斜^[16,20,22],但关于Toric IOL的旋转和偏心除了带来散光残留还会造成哪些影响尚不完全清楚。

目前,关于不同球面结构和球差的IOL发生偏心、倾斜及其对成像质量的影响已有较多研究,一些非球面结构的IOL居中时因其能够抵消角膜球差,故可获得较高的成像质量^[23-27],但是这类-0.27 μm球差的IOL偏心大于0.50 mm时成像质量甚至低于球面IOL^[26-28],而眼内植入的Toric IOL为复杂的复曲面结构,即陡峭轴与平坦轴之间的各条子午线屈光度均不同。关于Toric IOL发生偏心时对成像质量的影响及其对偏心是否耐受等问题目前尚鲜见报道,因此本研究选择Acrysof Toric SN60T3、SN60T4、SN60T5和Acrysof SN60AT球面IOL,对比其在模型眼中发生偏心和旋转时对成像质量的影响。

实验中模拟角膜的散光完全被相应的Toric IOL矫正,当瞳孔直径由3 mm增加至5 mm时,IOL的总像差RMS增加,其中以球差增加最为显著。理想的规则角膜每条径线的屈光力均相等,但实际情况是角膜本身呈Toric面型,从平坦轴到陡峭轴上各条子午线的屈

光度并非相同,而是不断变化的,用于矫正散光的Toric IOL也是如此。对于轴位正确但存在一定偏心度的Toric IOL来说,这种特点的影响是我们关注的问题。本研究显示,在轴位准确的情况下,Toric IOL在不同方向的偏心对成像质量的影响基本相同,Toric IOL偏心时仍然能准确地矫正角膜散光,波前像差的结果显示球面和Toric IOL偏心时都会带来散光的少量增加,并且其散光量接近,但方向不同。偏心所带来的散光、慧差和三叶草像差是由IOL球面结构偏心所致^[26],而受IOL的Toric结构影响不大。

研究表明,Toric IOL的成像质量比球面IOL略低,偏心后的MTF值较球面IOL也有所降低,但不能就此推断Toric IOL的MTF值降低更多。所以本研究采用 $MTF_{\text{偏心}}/MTF_{\text{居中}}$ 值来评价不同IOL偏心后成像质量下降的程度。Toric IOL偏心后 $MTF_{\text{偏心}}/MTF_{\text{居中}}$ 值降低的程度与球面IOL非常接近,Toric IOL与球面IOL的最大相差仅为4.7%,所以本研究认为Toric IOL在轴位准确的条件下与球面IOL对偏心的耐受性接近。

Toric IOL轴位每偏差1°,最终散光矫正效果就可以降低3.3%^[29-30]。本研究中发现,当Toric IOL旋转角度从5°增加到10°时,12 c/d空间频率下的MTF值明显降低,而6 c/d空间频率下的MTF值变化不大,且散光度大的IOL MTF值降低更明显。因为散光度大的Toric IOL旋转同样的角度,残留的散光度更大,故散光大的Toric IOL旋转对成像质量的影响更大,但在临床实践中给患者造成影响的不仅仅是Toric IOL偏心所带来的散光和球镜屈光度的变化,还有斜轴散光的影响,患者对斜轴散光不耐受,从而影响了患者的视觉质量^[31],散光度越大的Toric IOL越应充分注意散光轴位的标记及其旋转稳定性。

Toric IOL旋转引起的波前像差的改变与偏心引起的改变有较大差别,IOL旋转主要是散光的增加,而不引起慧差和三叶草像差,故在本研究中我们仅采用4 mm瞳孔直径来观察。本研究模拟的是位于光轴无限远的点光源的成像,当Toric IOL散光轴发生偏转时,依据轴上成像规律,只要角膜和IOL的光学中心处于光轴上就不会形成轴外像差,但当IOL发生偏心时,其光学中心已经偏离了物点所在的光轴,向光学系统发出的单色圆锥形光束经该光学系统折射后若在理想平面处不能形成像点,而是彗星形光斑,则此光学系统的成像误差称为彗差^[32]。此时的物点变成轴外物

点,于是 IOL 偏心时产生了慧差。

本研究表明,在散光轴位准确的情况下 Toric IOL 偏心时的成像质量不受方向的影响,并且与球面 IOL 对偏心的耐受性比较接近。Toric IOL 偏心对波前像差的影响主要是增加了慧差,同时有少量散光和三叶草像差的出现;而旋转对波前像差的影响主要是散光的增加,但不伴有高阶像差的出现,球差仅受到瞳孔直径的影响,不受偏心 and 旋转量的影响。我们推测非球面 Toric IOL 居中时即使存在一定程度的旋转仍然能有效地矫正角膜球差,提高成像质量,但当偏心 and 旋转误差同时存在时对非球面 Toric IOL 的成像质量的影响值得进一步探讨。

作者声明 本研究与文章中涉及的人工晶状体生产、销售厂商之间不存在任何利益关系

参考文献

- [1] Kránitz K, Miháitz 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.
- [2] 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.
- [3] Changv PY, Lian CY, Wang JK, et al. Surgical approach affects intraocular lens decentration [J]. J Formos Med Assoc, 2017, 116(3): 177–184. DOI: 10.1016/j.jfma.2016.04.003.
- [4] Bonaque-González S, Bernal-Molina P, Marcos-Robles M, et al. Optical characterization method for tilted or decentered intraocular lenses [J]. Optom Vis Sci, 2016, 93(7): 705–713. DOI: 10.1097/OPX.0000000000000851.
- [5] Fujikado T, Saika M. Evaluation of actual retinal images produced by misaligned aspheric intraocular lenses in a model eye [J]. Clin Ophthalmol, 2014, 8: 2415–2423. DOI: 10.2147/OPHT. S72053.
- [6] Kramer BA, Berdahl JP, Hardten DR, et al. Residual astigmatism after toric intraocular lens implantation: Analysis of data from an online toric intraocular lens back-calculator [J]. J Cataract Refract Surg, 2016, 42(11): 1595–1601. DOI: 10.1016/j.jcrs.2016.09.017.
- [7] 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.
- [8] 杨欣, 张斌, 刘丹岩, 等. 利用 Hwey-Lan Liou 模型眼研究的复曲面人工晶状体焦深的变化 [J]. 中华实验眼科杂志, 2015, 33(4): 347–350. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.04.012.
- [9] Yang X, Zhang B, Liu DY, et al. Change of the focused depth of biconvex Toric intraocular lens in Hwey-Lan Liou schematic eye [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2015, 33(4): 347–350. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.04.012.
- [9] Kessel L, Andresen J, Tendal B, et al. Toric intraocular lenses in the correction of astigmatism during cataract surgery: A systematic review and meta-analysis [J]. Ophthalmology, 2015, S0161-6420(15)01148-3. DOI: 10.1016/j.ophtha.2015.10.002.
- [10] Zhang L, Sy ME, Mai H, et al. Effect of posterior corneal astigmatism on refractive outcomes after toric intraocular lens implantation [J]. J Cataract Refract Surg, 2015, 41(1): 84–89. DOI: 10.1016/j.jcrs.2014.04.033.
- [11] Ale JB, Power J, Zohs K, et al. Refractive and visual outcome of toric intraocular lens implantation following cataract surgery [J]. Nepal J Ophthalmol, 2012, 4(1): 37–44. DOI: 10.3126/nepjoph.v4i1.5848.
- [12] Visser N, Beckers HJ, Bauer NJ, et al. Toric vs aspherical control intraocular lenses in patients with cataract and corneal astigmatism: a randomized clinical trial [J]. JAMA Ophthalmol, 2014, 132(12): 1462–1468. DOI: 10.1001/jama.ophthalmol.2014.3602.
- [13] Hasegawa Y, Okamoto F, Nakano S, et al. Effect of preoperative corneal astigmatism orientation on results with a toric intraocular lens [J]. J Cataract Refract Surg, 2013, 39(12): 1846–1851. DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.06.019.
- [14] Bachernegg A, Rückl T, Strohmaier C, et al. Vector analysis, rotational stability, and visual outcome after implantation of a new aspheric Toric IOL [J]. J Refract Surg, 2015, 31(8): 513–520. DOI: 10.3928/1081597X-20150727-01.
- [15] Jin H, Limberger IJ, Borkenstein AF, et al. Pseudophakic eye with obliquely crossed piggyback toric intraocular lenses [J]. J Cataract Refract Surg, 2010, 36(3): 497–502. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.07.054.
- [16] Abulafia A, Hill WE, Franchina M, et al. Comparison of methods to predict residual astigmatism after intraocular lens implantation [J]. J Refract Surg, 2015, 31(10): 699–707. DOI: 10.3928/1081597X-20150928-03.
- [17] Debois A, Nochez Y, Bezo C, et al. Refractive precision and objective quality of vision after toric lens implantation in cataract surgery [J]. J Fr Ophthalmol, 2012, 35(8): 580–586. DOI: 10.1016/j.jfo.2011.10.012.
- [18] Kim MH, Chung TY, Chung ES. Long-term efficacy and rotational stability of AcrySof toric intraocular lens implantation in cataract surgery [J]. Korean J Ophthalmol, 2010, 24(4): 207–212. DOI: 10.3341/kjo.2010.24.4.207.
- [19] Gyöngyössi B, Jirak P, Schönherr U. Rotational stability and patient satisfaction after implantation of a new toric IOL [J]. Eur J Ophthalmol, 2016, 26(4): 321–327. DOI: 10.5301/ejo.5000696.
- [20] Zinkernagel M, Papazoglou A, Patel CK. Bimanual anterior segment revision surgery for anterior capsule contraction syndrome associated with anterior flexion of intraocular lens haptics [J]. Eye (Lond), 2013, 27(12): 1388–1390. DOI: 10.1038/eye.2013.206.
- [21] Sauer T, Mester U. Tilt and decentration of an intraocular lens implanted in the ciliary sulcus after capsular bag defect during cataract surgery [J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2013, 251(1): 89–93. DOI: 10.1007/s00417-012-2141-2.
- [22] Ma S, Zheng D, Lin L, et al. Comparison of visual quality after implantation of big bag and akreos adapt intraocular lenses in patients with high myopia [J]. Eye Sci, 2015, 30(1): 18–22.
- [23] Tabernero J, Piers P, Benito A, et al. Predicting the optical performance of eyes implanted with IOLs to correct spherical aberration [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2006, 47(10): 4651–4658. DOI: 10.1167/iiov.06-0444.
- [24] Raina UK, Gupta A, Bhambhani V, et al. The optical performance of spherical and aspheric intraocular lenses in pediatric eyes: a comparative study [J]. J Pediatr Ophthalmol Strabismus, 2015, 52(4): 232–238. DOI: 10.3928/01913913-20150520-03.
- [25] Schuster AK, Tesarz J, Vossmerbaeumer U. Ocular wavefront analysis of aspheric compared with spherical monofocal intraocular lenses in cataract surgery: Systematic review with meta analysis [J]. J Cataract Refract Surg, 2015, 41(5): 1088–1097. DOI: 10.1016/j.jcrs.2015.04.005.
- [26] 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.
- [27] Peh S, Fiala W, Malz A, et al. In vitro strehl ratios with spherical, aberration-free, average, and customized spherical aberration-correcting intraocular lenses [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2009, 50(3): 1264–1270. DOI: 10.1167/iiov.08-2187.
- [28] Barbero S, Marcos S, Jiménez-Alfaro I. Optical aberrations of intraocular lenses measured in vivo and in vitro [J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2003, 20(10): 1841–1851. DOI: 10.1364/JOSAA.20.001841.
- [29] Ma JJ, Tseng SS. Simple method for accurate alignment in toric phakic and aphakic intraocular lens implantation [J]. J Cataract Refract Surg, 2008, 34(10): 1631–1636. DOI: 10.1016/j.jcrs.2008.04.041.
- [30] Ale JB. Intraocular lens tilt and decentration: A concern for contemporary IOL designs [J]. Nepal J Ophthalmol, 2011, 3(5): 68–77. DOI: 10.3126/nepjoph.v3i1.4281.
- [31] Novis C. Astigmatism and toric intraocular lenses [J]. Curr Opin Ophthalmol, 2000, 11(1): 47–50. DOI: 10.1097/00055735-200002000-00007.
- [32] 张以谟. 应用光学 [M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 176.

(收稿日期: 2016–10–23 修回日期: 2017–10–10)

(本文编辑: 尹卫靖)