

# Hwey-Lan Liou 模型眼中 Toric 人工晶状体旋转对成像质量的影响

张斌 马景学 刘丹岩 崔月先 杜颖华 杨欣

050000 石家庄,河北医科大学第二医院眼科

通信作者:马景学,Email:15803210925@163.com

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.03.011

**【摘要】** 背景 目前关于 Toric 人工晶状体(IOL)旋转造成散光残留的研究较多,但其对成像质量和波前像差带来的影响尚不清楚。目的 评价 Toric IOL 旋转对成像质量、波前像差及球镜和柱镜度残留的影响。方法 将+22.0 D T3、T4、T5 型 Toric IOL 分别植入 Hwey-Lan Liou 精密模型眼,IOL 后表面平坦轴置于 X 轴,陡峭轴置于 Y 轴,在波长为 550 nm 的单色光和瞳孔直径 4 mm 条件下采用 Zemax 光学设计软件模拟带有 Toric IOL 的角膜散光模型眼。将 Toric IOL 分别旋转 5° 和 10°,分别测定 Toric IOL 在居中位及旋转位的调制传递函数(MTF)及离焦、散光、彗差、三叶草像差和球差,计算该条件下模型眼出现的球镜和柱镜的屈光误差。结果 Toric IOL 居中时角膜散光可完全矫正,T3、T4、T5 型 Toric IOL 的 MTF 非常接近,随着 Toric IOL 旋转度变大,40~60 c/d 高空间频率下成像质量明显下降,3 种晶状体 MTF 曲线均逐渐下降,以散光度大的 T5 型 Toric IOL 下降最为明显。Toric IOL 旋转后彗差、三叶草像差和球差无明显变化,但散光度和离焦均增加。Toric IOL 旋转后残留散光度增加,同时球镜度增大。结论 Toric IOL 植入后位置的旋转导致眼的成像质量下降,散光度较大的 Toric IOL 旋转引起的 MTF 曲线降低更为明显。Toric IOL 的旋转主要造成散光和球镜度的增加,但高阶像差不受影响。

**【关键词】** 人工晶状体; 散光; 波前像差; 调制传递函数; 模型眼; 计算机模拟

**Optical performance of Toric intraocular lens rotation in Hwey-Lan Liou model eye** Zhang Bin, Ma Jingxue, Liu Danyan, Cui Yuexian, Du Yinghua, Yang Xin

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

Corresponding author: Ma Jingxue, Email: 15803210925@163.com

**【Abstract】** **Background** The residual astigmatism following Toric intraocular lens (IOL) rotation have received much attention. However, the variation of the optical performance and the wavefront aberration with Toric IOL rotation are unclear. **Objective** The aim of this study was to evaluate the optical performance, wavefront aberration and residual diopter spherical and cylinder lens with Toric IOL rotation. **Methods** T3, T4 and T5 Toric IOLs of +22.0 D were placed in Hwey-Lan Liou model eye respectively, with the posterior surface flat on the X axis and steep on the Y axis. Corneal astigmatism model was established by mimicing the model eye with Toric IOL using Zemax optical software. Then the Toric IOLs were rotated 5° to 10° individually under the 4 mm pupil diameter and 550 nm monochromatic light, and the image performance and wavefront aberration were recorded with all conditions, including modulation transfer function (MTF), out-of-focus aberration, astigmatism aberration, coma, trefoil aberration and spherical aberration. The refractive error of spherical power and cylinder power were calculated. **Results** Corneal astigmatism was fully corrected when Toric IOLs in the middle, and the MTF curves were near in T3, T4, T5 Toric IOLs. The image performance was worse under the high spatial frequency with the increase of rotation degrees of Toric IOLs, showing the gradually low of MTF curves, especially T5 Toric IOL. No obvious changes was seen in coma, trefoil aberration and spherical aberration after rotation of Toric IOLs, while out-of-focus aberration, astigmatism aberration were obviously increased. In addition, residual astigmatism and spherical error increase with the rotation of Toric IOLs. **Conclusions** Toric IOL rotation leads to increase of astigmatism and spherical refractive error but not high order aberration.

**[Key words]** Lens, artificial; Astigmatism; Wavefront aberrations; Modulation transfer function; Model eye; Computer simulation

各种类型的人工晶状体 (intraocular lens, IOL) 植入眼内后都不可避免地存在不同程度的偏心和倾斜, 对称结构的球面或非球面 IOL 偏心对成像质量的影响一直是相关领域的研究热点。不同球差和面型组合的球面和非球面 IOL 对偏心的耐受性差距较大。确保 Toric IOL 植入眼内后散光轴位的准确才能有效中和术眼的角膜散光状态<sup>[1-2]</sup>。Toric IOL 轴位的旋转偏位可造成角膜散光和 IOL 散光, 形成两个交叉轴向的柱镜度, 从而形成新的散光度和散光轴向, 与术前的目标屈光度产生误差<sup>[3-4]</sup>, 每 1° 的旋转可使散光屈光度残留增加 3.3%<sup>[5-6]</sup>, 因此 Toric IOL 的旋转稳定性至关重要。临床研究表明, Arcysof Toric IOL 植入后具有良好的旋转稳定性, 术后平均旋转幅度为 2.7° ~ 4.1°<sup>[7-9]</sup>。Toric IOL 旋转除了对散光矫正有影响外, 是否会像球面或非球面 IOL 偏心时引入的高阶像差一样造成视觉质量的下降鲜见报道。本研究拟用模型眼研究 Arcysof Toric IOL 旋转对成像质量及波前像差的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 Arcysof Toric IOL 模型眼的建立

表 2 +22.0 D Toric IOL 的参数

Toric IOL 类型	屈光度 (D)	折射率	曲率半径 (mm)	中央厚度 (mm)	后表面曲率半径 (mm)		光学部直径 (mm)	晶状体平面柱镜度 (D)	角膜平面柱镜度 (D)	Abbe 数
					陡峭轴	平坦轴				
T3	+22.0	1.55	19.609	0.688	-18.613	-21.400	6.0	1.50	1.03	37
T4	+22.0	1.55	19.609	0.694	-18.174	-22.472	6.0	2.25	1.55	37
T5	+22.0	1.55	19.607	0.699	-17.836	-23.782	6.0	3.00	2.06	37

注: IOL: 人工晶状体

### 1.2 角膜散光的模拟

在波长为 550 nm、瞳孔直径为 4 mm 的条件下, Zemax 光学设计软件模拟带有 Toric IOL 模型眼, 在其角膜顶点前插入一片理想薄透镜 (折射率为 1.376, Abbe 数为 55.5), 并且以 Zernike 多项式散光项等于 0 为目标, 分别自动优化薄透镜前表面 X 轴和 Y 轴上的曲率半径, Zernike 多项式离焦项等于 0, 自动优化模型眼 IOL 后表面到视网膜的距离, 使平行于光轴的光线通过理想薄透镜和 Toric IOL 聚焦于视网膜。建立模型眼的角膜散光度, 并且可用相应的 Toric IOL 完全矫正。

### 1.3 Toric IOL 旋转后成像质量的评估

在波长为 550 nm 条件下, 设置 Toric T3、T4 和 T5

应用 Hwey-Lan Liou 精密模型眼<sup>[10]</sup>, 参数见表 1。参照文献 [11-15] 的方法使用 Arcysof Toric IOL T3、T4、T5 3 种型号的 Toric IOL, 参数见表 2, 材料均为丙烯酸, 前表面为球面, 置于模型眼角膜顶点后 4.5 mm。模型眼角膜、房水以及玻璃体的 Abbe 数分别为 55.5、50.4 和 51.3<sup>[16]</sup>。使用 Zemax 光学设计软件 (ZEMAX Development Corporation, Bellevue, WA, USA) 建立 Hwey-Lan Liou 模型眼, 在模型眼中 +22.0 D 的 T3、T4、T5 Toric IOL 后表面平坦轴置于 X 轴, 陡峭轴置于 Y 轴。

表 1 Hwey-Lan Liou 精密模型眼的参数

部位	半径 (mm)	非球面系数 (Q)	厚度 (mm)	折射率
角膜前表面	7.77	-0.18	0.50	1.376
角膜后表面	6.40	-0.60	3.16	1.336
晶状体前表面	12.40	-0.94	1.59	1.368-1.407
晶状体厚度	∞	-	2.43	1.407-1.368
晶状体后表面	-8.10	+0.96	16.70	1.336
视网膜	-12.30	0		

注: -: 未测

型 IOL 在模型眼中居中或分别旋转 5°、10°, 采集其在瞳孔直径 4 mm 条件下 Toric IOL 的调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 及离焦、散光、彗差、三叶草像差和球差的波前像差数据, 并根据获得的波前像差离焦项 C(2,0) 和散光项 C(2,-2)、C(2,2) 的数据由公式 1~4 计算该条件下模型眼出现的球镜和柱镜的屈光误差<sup>[16-18]</sup>。根据公式 (1)~(4) 计算得到该状态下模型眼残留球镜和柱镜度并转换成为瞳孔平面的数据, 用 Origin pro 7.5 制图软件绘图。

$$S = \frac{4\sqrt{3}C_2^0}{R^2} - \frac{2\sqrt{6}\sqrt{(C_2^{-2})^2 + (C_2^2)^2}}{R^2} \quad (1)$$

$$C = \frac{4\sqrt{6}\sqrt{(C_2^{-2})^2 + (C_2^2)^2}}{R^2} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{C_2^{-2}}{C_2^2} \right) \quad (3)$$

$$F2 = \frac{F}{1 - \frac{d}{1000 \times n} \times F} \quad (4)$$

## 2 结果

### 2.1 各种 Toric IOL 不同程度旋转后 MTF 值的改变

Toric IOL 居中时角膜散光可完全矫正,因此 T3、T4、T5 Toric IOL 的 MTF 值非常接近。Toric IOL 旋转 5° 和 10° 时, T3、T4、T5 IOL 的 MTF 曲线变化趋势一致, 0~20 c/d 低空间频率时 MTF 曲线降低分离不明显, 表现为迅速降低, 但曲线分离不明显, 即对旋转成像质量影响相对较小, 但在 40~60 c/d 高空间频率和 20~40 c/d 中空间频率时, 随着旋转角度的增加 MTF 曲线下降低明显, 表现为明显降低但曲线平坦, 散光度较大的 T5 IOL 的 MTF 曲线降低较 T3 更为明显(图 1)。

### 2.2 各种 Toric IOL 不同程度旋转后波前像差的变化

随着 Toric IOL 散光轴旋转偏心度增大, Toric IOL 波前像差均方根 (root mean square, RMS) 逐渐增加, 但是 3 种 Toric IOL 旋转后 C(4, 0) 项球差、C(3, 1)、C(3, -1) 彗差和 C(3, 3)、C(3, -3) 三叶草像差均未发生变化, 而散光 C(2, -2)、C(2, 2) 和离焦 C(2, 0) 像差增加, 均随着旋转角度的增大而增大(图 2)。

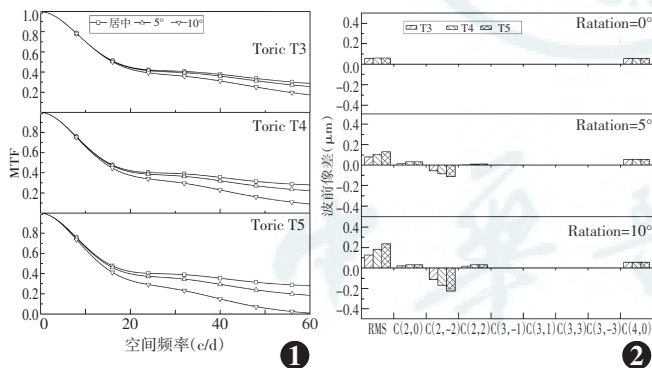


图 1 T3、T4、T5 Toric IOL 旋转 5° 和 10° 后 MTF 曲线变化 各种类型的 Toric IOL 随着旋转度增加, MTF 曲线均不同程度下降, 其中 T5 Toric IOL MTF 曲线下降低最为明显 MTF: 调制传递函数 图 2 Toric IOL 不同程度旋转后波前像差的变化 RMS: 均方根; C(2, 0): 离焦像差; C(2, -2)、C(2, 2): 散光像差; C(3, 1)、C(3, -1): 彗差; C(3, 3)、C(3, -3): 三叶草像差; C(4, 0): 球差

### 2.3 Toric IOL 不同程度旋转后残留散光和正球镜度的变化

随着 Toric IOL 旋转角度的增大, 模型眼角膜平面残留的散光度逐渐增大, 散光度大的 Toric IOL 其残留的柱镜度更大, 此外球镜残留屈光度增加。Toric IOL

柱镜度越大, 旋转引起的正球镜残留度数越大(表 3)。

旋转度	不同 IOL 残留柱镜度			不同 IOL 残留正球镜度		
	T3	T4	T5	T3	T4	T5
5°	0.16	0.26	0.33	0.08	0.13	0.17
10°	0.33	0.52	0.67	0.17	0.26	0.34

注: IOL: 人工晶状体

## 3 讨论

临床研究证实, 角膜散光度较大的白内障患者手术中植入 Toric IOL 时若放置的位置准确则可以有效矫正角膜散光, 使患者获得较好的视力<sup>[19-22]</sup>。白内障摘除术后眼呈无晶状体眼状态, 其散光、球面像差等光学缺陷主要来自角膜。IOL 面型结构的修正可以抵消角膜的光学缺陷, 有些表面特殊的 IOL 面型结构, 如 -0.27 μm 球差的非球面 IOL 居中时可有效抵消角膜的球面像差, 获得非常好的成像质量<sup>[23-27]</sup>; 但 IOL 偏心 > 0.5 mm 时则产生散光, 且多项高阶像差显著增大, 成像质量严重下降<sup>[25-27]</sup>。本研究中使用计算机光学模拟技术对球镜度均为 +22.0 D 而散光度不同的 T3、T4、T5 Toric IOL 进行研究, 探讨 T3、T4、T5 Toric IOL 旋转对术眼成像质量的影响。

本研究使用 Hwey-Lan Liou 精密模型眼, 角膜球差为 +0.26 μm, 屈光参数非常接近临床解剖数据。Toric IOL 由不同曲率半径的球面光学结构组成, 所以均有一定的正球差, 模型眼总的球差为正值。本研究发现, 随着旋转角度的增大, 散光度大的 Toric IOL 在高空间频率下 MTF 降低更为明显, 而中、低空间频率下 MTF 曲线的变化较小。结合旋转后散光和球镜残留度数的变化, 显示散光度大的 Toric IOL 由于其旋转后残留的散光度大, 对成像质量的影响大于散光度小的 Toric IOL, 因此散光度越大的 IOL 植入时对轴向的精度和术后旋转稳定性的要求越高。波前像差数据转换后的屈光度变化显示, Toric IOL 旋转不但影响了散光的矫正情况, 也带来正球镜度的残留, 使模型眼出现不同程度的远视状态。散光残留和正球镜度数的增大共同造成 Toric IOL 成像质量的降低。但临床研究表明, Toric IOL 的旋转对患者造成的影响不仅是散光和球镜度数的变化, 斜轴散光可使视觉质量下降更明显<sup>[28]</sup>。因此 Toric IOL 旋转造成的 MTF 曲线降低主要与低阶像差的增大和斜轴散光有关。

研究表明, 与 IOL 偏心不同, Toric IOL 旋转后球差稳定不变, 旋转主要引起散光和球镜度数的增加, 而且没有彗差和三叶草等非对称像差的增加。彗差是

由位于轴外的物点发出的单色光束经过光学系统后不能准确形成汇聚于像面上的焦点而形成彗星形光斑,其与球面像差引起的圆形弥散斑不同<sup>[29]</sup>。彗差是轴外像差的一种,是视场与入射光瞳相关垂轴像差,并且彗差随视场改变而变化;对相同视场,由于入射光瞳直径大小的不同,彗差也随之改变。本研究是在模拟物点假设位于光轴上无限远点的成像,对于 Toric IOL 来说,虽然散光轴发生偏转与角膜散光形成夹角,但角膜和 Troic IOL 的光学中心仍位于光轴上,所以成像仍符合轴上成像规律,没有带来轴外像差,故彗差和三叶草像差为 0。

综上所述,Toric IOL 旋转主要引起散光和正球镜度数的增加,临床上行 Toric IOL 植入时适量保留负的目标屈光度可能会抵消一部分残留的正球镜度数,改善患者的视觉质量。Toric IOL 旋转时球差稳定不变,使用非球面 Toric IOL 来矫正角膜球差不受 IOL 旋转的影响。但 Toric IOL 与旋转对称的球面和非球面 IOL 一样可以出现不同程度的偏心或偏心旋转同时存在的现象,Toric IOL 抗偏心的性能,及偏心对波前像差造成哪些影响尚不清楚,我们将在进一步的研究中探讨这些误差对 Toric IOL 的成像质量的影响及内在的影响因素。

## 参考文献

- [1] Ernest P, Potvin R. Effects of preoperative corneal astigmatism orientation on results with a low-cylinder-power toric intraocular lens[J]. J Cataract Refract Surg, 2011, 37(4): 727-732. DOI: 10.1016/j.jcrs.2010.11.026.
- [2] Tsinoopoulos IT, Symeonidis C, Tsaousis KT, et al. Intra-operative assessment of toric intra-ocular lens implantation[J]. Indian J Ophthalmol, 2011, 59(1): 60-62.
- [3] 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.
- [4] Shimizu K, Misawa A, Suzuki Y. Toric intraocular lenses: correcting astigmatism while controlling axis shift[J]. J Cataract Refract Surg, 1994, 20(5): 523-526.
- [5] 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.
- [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] Ferrer-Blasco T, Montés-Micó R, Peixoto-de-Matos SC, et al. Prevalence of corneal astigmatism before cataract surgery[J]. J Cataract Refract Surg, 2009, 35(1): 70-75.
- [8] 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.
- [9] Tsinoopoulos IT, Tsaousis KT, Tsakpinis D, et al. Acrylic toric intraocular lens implantation: a single center experience concerning clinical outcomes and postoperative rotation[J]. Clin Ophthalmol, 2010, 4: 137-142.
- [10] 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.
- [11] Findl O, Drexler W, Menapace R, et al. Changes in intraocular lens position after neodymium: YAG capsulotomy[J]. J Cataract Refract Surg, 1999, 25(5): 659-662.
- [12] Olsen T, Corydon L, Gimbel H. Intraocular lens power calculation with an improved anterior chamber depth prediction algorithm[J]. J Cataract Refract Surg, 1995, 21(3): 313-319.
- [13] Landau IM, Laurell CG. Ultrasound biomicroscopy examination of intraocular lens haptic position after phacoemulsification with continuous curvilinear capsulorhexis and extracapsular cataract extraction with linear capsulotomy[J]. Acta Ophthalmol Scand, 1999, 77(4): 394-396.
- [14] 张斌, 刘丹岩, 杜颖华, 等. 复曲面人工晶状体个体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. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.04.014.
- [14] Zhang B, Liu DY, Du YH, et al. Optimization of optical performance of biconvex Toric intraocular lens using a customized vision model[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2016, 34(4): 352-356. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.04.014.
- [15] Zhao H, Mainster MA. The effect of chromatic dispersion on pseudophakic optical performance[J]. Br J Ophthalmol, 2007, 91(9): 1225-1229. DOI: 10.1136/bjo.2007.118745.
- [16] Atchison DA, Guo H, Charman WN, et al. Blur limits for defocus, astigmatism and trefoil[J]. Vision Res, 2009, 49(19): 2393-2403. DOI: 10.1016/j.visres.2009.07.009.
- [17] 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.
- [18] Dalimier E, Dainty C. Use of a customized vision model to analyze the effects of higher-order ocular aberrations and neural filtering on contrast threshold performance[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2008, 25(8): 2078-2087.
- [19] Ernest P, Potvin R. Effects of preoperative corneal astigmatism orientation on results with a low-cylinder-power toric intraocular lens[J]. J Cataract Refract Surg, 2011, 37(4): 727-732. DOI: 10.1016/j.jcrs.2010.11.026.
- [20] Bauer NJ, de Vries NE, Webers CA, et al. Astigmatism management in cataract surgery with the AcrySof toric intraocular lens[J]. J Cataract Refract Surg, 2008, 34(9): 1483-1488. DOI: 10.1016/j.jcrs.2008.05.031.
- [21] Ahmed II, Rocha G, Slomovic AR, et al. Visual function and patient experience after bilateral implantation of toric intraocular lenses[J]. J Cataract Refract Surg, 2010, 36(4): 609-616. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.10.044.
- [22] Carey PJ, Leccisotti A, McGilligan VE, et al. Assessment of toric intraocular lens alignment by a refractive power/corneal analyzer system and slitlamp observation[J]. J Cataract Refract Surg, 2010, 36(2): 222-229. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.08.033.
- [23] Taberner 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/iov.06-0444.
- [24] Piers PA, Fernandez EJ, Manzanera S, et al. Adaptive optics simulation of intraocular lenses with modified spherical aberration[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2004, 45(12): 4601-4610. DOI: 10.1167/iov.04-0234.
- [25] 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.
- [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] Pieh 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/iov.08-2187.
- [28] Novis C. Astigmatism and toric intraocular lenses[J]. Curr Opin Ophthalmol, 2000, 11(1): 47-50.
- [29] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 345-357.

(收稿日期: 2016-12-02)

(本文编辑: 尹卫靖 杜娟)