

# 偏心 and 倾斜对不同屈光度的单焦点人工晶状体光学性能影响的实验研究

潘若琳<sup>1,2,3</sup>, 廖萱<sup>2,3</sup>, 兰长骏<sup>1,2,3</sup>, 谭青青<sup>2,3</sup>, 谢丽暄<sup>2,3</sup>, 黄欢<sup>2,3</sup>, 秦苏云<sup>2,3</sup>, 王艳<sup>2,3</sup>

1. 成都东区爱尔眼科医院 白内障科, 四川 成都 610056

2. 川北医学院附属医院 眼科, 四川 南充 637000

3. 川北医学院 眼视光医学院, 四川 南充 637000

**摘要:** **目的** 探讨居中时不同屈光度的非球面单焦点人工晶状体 (intraocular len, IOL) 的光学特性及不同程度偏心 and 倾斜对不同屈光度的 IOL 光学质量的影响。 **方法** 采用体外光学质量测试系统 OptiSpheric IOL R&D 评价 +10 m<sup>-1</sup>、+20 m<sup>-1</sup> 和 +30 m<sup>-1</sup> 3 种屈光度的非球面单焦点 IOL AcrySof IQ SN60WF 的光学质量。测量并比较 3.0 mm 和 4.5 mm 孔径下, IOL 在居中、不同程度偏心 and 倾斜时, 远焦点处的 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值、MTF 曲线和美国空军 (the United States air force, USAF) 分辨率测试图。 **结果** IOL 的屈光度越高, 居中时 MTF 值和 USAF 分辨率越高, 偏心 and 倾斜时下降幅度越大。偏心 and 倾斜程度越大, 3 种屈光度 IOL 的 MTF 值和 USAF 分辨率越低。在 2 种孔径下各 IOL 在 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值均从偏心 0.3 mm 时开始下降。+10 m<sup>-1</sup> IOL 在 3.0 mm 孔径下, 倾斜 5° 时 50 lp/mm 空间频率下的 MTF 值开始下降, 而在 4.5 mm 孔径、2 种空间频率下, 倾斜 3° MTF 值就开始下降。+20 m<sup>-1</sup> 和 +30 m<sup>-1</sup> IOL 在 2 种孔径下, MTF 值均从倾斜 3° 开始下降。相同位置条件下, 3.0 mm 孔径下测量的 IOL 的 MTF 值和 USAF 分辨率较 4.5 mm 孔径下更高。 **结论** 非球面单焦点 IOL SN60WF 的屈光度越高, 居中时光学质量越好, 偏心 and 倾斜时光学质量下降幅度越大。3 种屈光度 IOL 发生 0.30 mm 偏心 and 5° 及以上倾斜时, 光学质量均较居中时下降, 同时小孔径下测量 IOL 的光学质量优于大孔径。

**关键词:** 人工晶状体; 体外测试; 光学质量; 偏心; 倾斜

中图分类号: R776.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3770(2026)01-0038-09

**引用格式:** 潘若琳, 廖萱, 兰长骏, 等. 偏心 and 倾斜对不同屈光度的单焦点人工晶状体光学性能影响的实验研究[J]. 山东大学耳鼻喉眼学报, 2026, 40(1): 38-46. PAN Ruolin, LIAO Xuan, LAN Changjun, et al. Experimental study on the influence of decentration and tilt on the optical properties of monofocal intraocular lens with different diopter[J]. Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University, 2026, 40(1): 38-46.

## Experimental study on the influence of decentration and tilt on the optical properties of monofocal intraocular lens with different diopter

PAN Ruolin<sup>1,2,3</sup>, LIAO Xuan<sup>2,3</sup>, LAN Changjun<sup>1,2,3</sup>, TAN Qingqing<sup>2,3</sup>, XIE Lixuan<sup>2,3</sup>, HUANG Huan<sup>2,3</sup>, QIN Suyun<sup>2,3</sup>, WANG Yan<sup>2,3</sup>

1. Department of Cataract, Chengdu Eastern Aier Eye Hospital, Chengdu 610051, Sichuan, China

2. Department of Ophthalmology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan, China

3. Medical School of Ophthalmology & Optometry, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan, China

**Abstract: Objective** To investigate the optical properties of aspheric monofocal intraocular lenses (IOLs) with different diopters under centered and the effects of different degrees of decentration and tilt on the optical quality of IOLs with different diopters.

**Methods** OptiSpheric IOL R&D, an in vitro optical quality testing system, was used to evaluate the optical quality of aspheric monofocal IOL AcrySof IQ SN60WF with three different diopters of +10 m<sup>-1</sup>, +20 m<sup>-1</sup> and +30 m<sup>-1</sup>. The modulation transfer function (MTF) values at spatial frequencies of 50 lp/mm and 100 lp/mm, the MTF curve and the United States air force (USAF) resolution test chart were measured and compared for the IOLs under centered, different degrees of decentration, and tilt at apertures of 3.0 mm and 4.5 mm. **Results** The higher diopter of the IOL, the higher the of MTF values and the higher of USAF resolution under the centered position, and the faster decreases of the MTF values and USAF resolution when decentered and tilted. The greater the degree of decentration and tilt, the greater the decrease of MTF value and USAF resolution of the three diopter IOLs. At 2 aperture sizes, MTF values at spatial frequencies of 50 lp/mm and 100 lp/mm of IOLs decreased by 0.3 mm from the centered position when

收稿日期: 2024-06-25

基金课题: 四川省医学科研课题 (S21011); 爱尔眼科医院集团临床研究所科研基金项目 (AIG2306D01)

通信作者: 兰长骏. E-mail: eyelanchangjun@163.com

they were decentered. The MTF values at 50 lp/mm spatial frequency for the +10 m<sup>-1</sup> IOL at an aperture of 3.0 mm started to decrease at a tilt of 5°, whereas at an aperture of 4.5 mm and 2 spatial frequencies, the MTF value started to decrease at a tilt of 3°. The MTF values of +20 m<sup>-1</sup> and +30 m<sup>-1</sup> IOL started decreasing from a tilt of 3° at both apertures. MTF values and USAF resolution of the IOLs measured at 3.0 mm aperture were higher than at 4.5 mm aperture at the same positional conditions. **Conclusion** The higher the diopter of aspheric monofocal IOL SN60WF, the better the optical quality when centered, and the faster the optical quality decreased when decentered and tilted. Optical quality decreased at 0.30 mm decentration and tilts of 5° and above for the IOLs compared to when centered. Additionally, the optical quality of IOLs measured at small apertures is superior to that of large apertures.

**Key words:** Intraocular lens; In vitro test; Optical quality; Decentration; Tilt

人工晶状体(intraocular lens, IOL)植入术后不可避免发生一定程度的偏心 and 倾斜,这可能导致视觉质量下降<sup>[1-4]</sup>。通常情况下,IOL 植入术后偏心 0.2~0.3 mm、倾斜 2~3°,一般不会影响视力。研究<sup>[5-6]</sup>显示白内障术后约 10%的 IOL 偏心超过 0.5 mm,4%的 IOL 倾斜超过 5°,这可能导致视觉质量下降。IOL 偏心 and 倾斜的研究可分为临床上体内检测和体外光学质量测试<sup>[2,5]</sup>,体内测量设备存在一定局限性,如患者瞳孔直径过小影响测量精确度;不同设备采用的偏心 and 倾斜的参考轴不同,导致测量结果的差异;体内测量无法设置 IOL 的偏心量和倾斜度;难以排除眼内屈光介质的影响。相比之下,体外光学质量测试可根据研究目的设置不同测试孔径、IOL 的偏心量和倾斜度,研究结果更客观和全面,是评价 IOL 光学质量的有效方法<sup>[7-12]</sup>。

球差是影响 IOL 偏心 and 倾斜时视觉质量的因素之一<sup>[5-6]</sup>,非球面单焦点 IOL 仍是目前临床上使用最多的 IOL 类型,多焦点和散光矫正型 IOL 也基于各自厂家的非球面平台设计,因此,深入研究非球面单焦点 IOL 的光学特性具有重要意义。6.0 mm 瞳孔直径下角膜球差值约为+0.27 μm, -0.20 μm 球差值设计的 SN60WF IOL(美国,Alcon)植入后全眼球差约+0.10 μm,这有助于增加焦深,同时保持较好的视觉质量<sup>[13-14]</sup>。多项临床体内研究表明,白内障患者术前晶状体与术后 IOL 的位置存在相关性<sup>[15-16]</sup>。本团队前期体外研究测量了+20 m<sup>-1</sup> SN60WF IOL(美国,Alcon)在居中、偏心 and 倾斜状态下的光学特性,发现偏心 0.3 mm 和倾斜超过 3°时,光学质量较居中时下降,为临床上正常眼轴长度患者植入非球面单焦点 IOL 提供了参考<sup>[17]</sup>。目前不同屈光度 IOL 在居中、偏心 and 倾斜状态下的光学特性研究较少,偏心 and 倾斜对不同屈光度 IOL 光学质量的影响尚不明确,本研究评价不同屈光度的非球面单焦点 IOL SN60WF 的光学性能,同时探讨 IOL 屈光度大小与抗偏心 and 倾斜能力的关系。由于临床上长眼轴和短眼轴白内障患者并不少见,特别

是近视患者高发,其囊袋较大,易发生 IOL 偏心和倾斜,这类患者通常植入低屈光度 IOL<sup>[18-19]</sup>。本研究将有利于临床预测术后 IOL 位置及 IOL 屈光度对术后视觉质量的影响,以便在术前个性化选择 IOL,也有利于与患者和家属的沟通。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 人工晶状体

AcrySof IQ SN60WF 是一款基于 AcrySof IQ 平台设计的、球差为-0.20 μm 的 L 形非球面 IOL,本研究中 SN60WF 屈光度为+10 m<sup>-1</sup>、+20 m<sup>-1</sup> 和+30 m<sup>-1</sup>。

#### 1.1.2 实验设备

体外光学质量测试系统 OptiSpheric IOL R&D (Trioptics, 德国)符合 ISO 标准 11979-2 的要求<sup>[20]</sup>,其主要组成部件包括照明系统、测试靶标[可选十字线和美国空军(the United States air force, USAF)分辨率测试图等]、准直器、模型眼(由模型角膜、模拟瞳孔的光阑和放置待测 IOL 的湿房组成)以及成像系统(由显微镜物镜和电荷耦合器件 CCD 相机等组成)。

### 1.2 测量指标

研究通过调制传递函数(modulate transfer function, MTF)和 USAF 分辨率测试图对不同测试条件下各 IOL 的光学质量进行定量和定性评价。MTF 是光学系统所成像与实际物的对比度比值,反映光学因素对成像质量的影响<sup>[21-22]</sup>。MTF 曲线反映图像整体的对比度变化,50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值分别对应 Snellen 视力表 20/40 和 40/40 视力<sup>[23]</sup>。USAF 分辨率测试图能直观反映光学系统的成像质量<sup>[11,24]</sup>。

### 1.3 实验方法

研究测量+10 m<sup>-1</sup>、+20 m<sup>-1</sup> 和+30 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF 在居中、不同程度偏心 and 倾斜时的光学质量。设置入射光波长为 546 nm,使用+0.28 μm 球差

值的 ISO-2 模型角膜(接近人眼角膜球差值),在 35 ℃(模拟人眼前房温度)下进行所有测量,IOL 放置在模型眼湿房中的 IOL 支架上,湿房内充满生理盐水<sup>[10,21,25]</sup>。分别在 3.0 mm 和 4.5 mm(代表明视觉和中间视觉下的瞳孔大小)孔径下,测量各 IOL 居中、偏心(0.3 mm、0.5 mm、0.7 mm、0.9 mm 和 1.1 mm)和倾斜(3°、5°、7°、9°和 11°)时,远焦点处的 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值、MTF 曲线和 USAF 分辨率测试图。以上所有数据连续测量 3 次,进行下一次操作前需矫正 IOL 的中心位置使其与光学测试台的光轴中心重合。MTF 值和 MTF 曲线均为 3 次切向和矢向 MTF 的平均值。

## 2 结果

### 2.1 不同屈光度 IOL 在居中、不同程度偏心和倾斜时的 MTF 值

表 1 ~ 2 和图 1 展示 +10 m<sup>-1</sup>、+20 m<sup>-1</sup> 和

+30 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF 在居中、不同偏心和倾斜程度时 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值,结果显示非球面单焦点 IOL SN60WF 的屈光度越高,居中时 MTF 值越高,偏心和倾斜时 MTF 值下降幅度越大。相同偏心或倾斜程度时,3.0 mm 孔径下各屈光度的 SN60WF MTF 值均高于 4.5 mm 孔径下,且在 3.0 mm 孔径下各 IOL 偏心和倾斜时 MTF 值下降幅度更小。在 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下,随着偏心和倾斜程度增加,各屈光度 SN60WF MTF 值整体呈下降趋势。3 种屈光度的 SN60WF, MTF 值从偏心 0.3 mm 开始下降。+10 m<sup>-1</sup> IOL 在 3.0 mm 孔径下,倾斜 5°时 50 lp/mm 空间频率下的 MTF 值开始下降,而在 4.5 mm 孔径、50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下,倾斜 3° MTF 值就开始下降。无论孔径大小,+20 m<sup>-1</sup> 和 +30 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下 MTF 值均从倾斜 3°时开始较居中时下降。

表 1 不同屈光度 IOLs 在居中和不同程度偏心时 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值

Table 1 MTF values at spatial frequency of 50 lp/mm and 100 lp/mm of the IOLs with different diopters under centered and various degrees of decentered conditions

空间频率/ (lp/mm)	孔径/ mm	屈光度/ m <sup>-1</sup>	居中	偏心 0.3 mm	偏心 0.5 mm	偏心 0.7 mm	偏心 0.9 mm	偏心 1.1 mm
50	3.0	+10	0.732	0.696	0.616	0.495	0.334	0.199
		+20	0.758	0.702	0.593	0.434	0.241	0.178
		+30	0.791	0.718	0.603	0.446	0.243	0.180
	4.5	+10	0.639	0.520	0.350	0.206	0.115	0.093
		+20	0.678	0.397	0.246	0.141	0.095	0.083
		+30	0.736	0.455	0.245	0.133	0.095	0.079
100	3.0	+10	0.515	0.466	0.370	0.244	0.132	0.073
		+20	0.550	0.468	0.329	0.189	0.103	0.062
		+30	0.597	0.502	0.345	0.186	0.098	0.052
	4.5	+10	0.364	0.319	0.200	0.090	0.044	0.029
		+20	0.450	0.234	0.104	0.048	0.033	0.028
		+30	0.487	0.264	0.100	0.028	0.024	0.019

表 2 不同屈光度 IOLs 在居中和不同程度倾斜时 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值

Table 2 MTF values at spatial frequency of 50 lp/mm and 100 lp/mm of the IOLs with different diopters under centered and various degrees of tilted conditions

空间频率/ (lp/mm)	孔径/ mm	屈光度/ m <sup>-1</sup>	居中	倾斜 3°	倾斜 5°	倾斜 7°	倾斜 9°	倾斜 11°
50	3.0	+10	0.738	0.742	0.732	0.720	0.685	0.609
		+20	0.758	0.736	0.666	0.561	0.508	0.452
		+30	0.791	0.772	0.692	0.498	0.411	0.333
	4.5	+10	0.639	0.605	0.594	0.532	0.493	0.445
		+20	0.678	0.626	0.509	0.483	0.419	0.361
		+30	0.736	0.632	0.458	0.338	0.272	0.259
100	3.0	+10	0.504	0.520	0.506	0.490	0.451	0.368
		+20	0.554	0.525	0.429	0.353	0.296	0.232
		+30	0.597	0.568	0.453	0.265	0.197	0.145
	4.5	+10	0.364	0.327	0.319	0.280	0.272	0.241
		+20	0.429	0.379	0.260	0.264	0.220	0.169
		+30	0.487	0.215	0.122	0.116	0.100	0.068

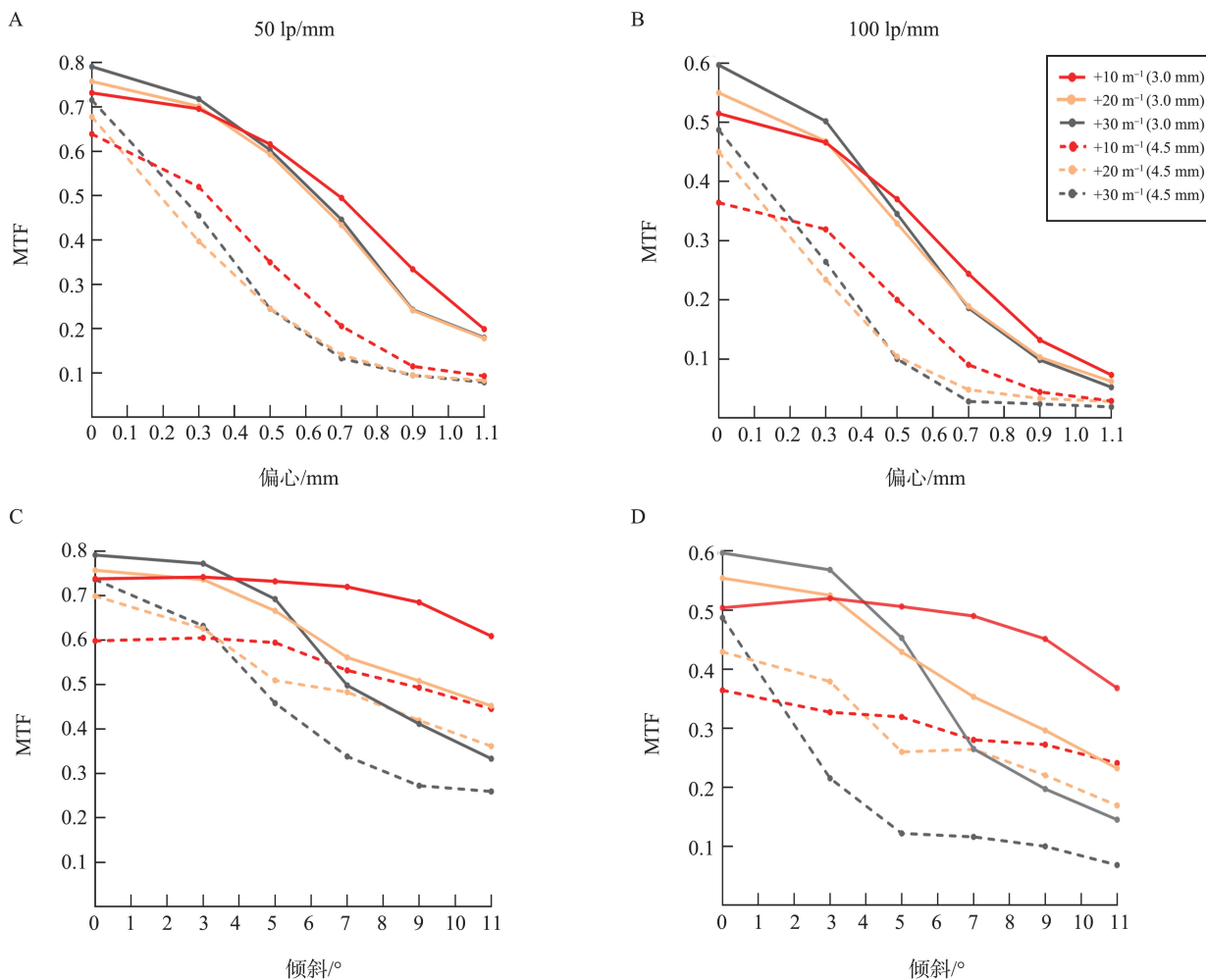


图 1 3.0 mm 和 4.5 mm 孔径下,不同屈光度的 IOLs 偏心 and 倾斜时 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下 MTF 值的折线图  
 A: 偏心时 50 lp/mm 的 MTF 值; B: 偏心时 100 lp/mm 的 MTF 值; C: 倾斜时 50 lp/mm 的 MTF 值; D: 倾斜时 100 lp/mm 的 MTF 值

Figure 1 Line plot of MTF values at spatial frequencies of 50 lp/mm and 100 lp/mm for the IOLs with different diopters at apertures of 3.0 and 4.5 mm when the IOLs were decentered and tilted

A: MTF values at spatial frequencies of 50 lp/mm when the IOLs were decentered; B: MTF values at spatial frequencies of 100 lp/mm when the IOLs were decentered; C: MTF values at spatial frequencies of 50 lp/mm when the IOLs were tilted; D: MTF values at spatial frequencies of 100 lp/mm when the IOLs were tilted

## 2.2 不同屈光度 IOL 在居中、不同程度偏心和倾斜时的 MTF 曲线

50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值都仅代表单一空间频率下的变化情况。为更全面、准确地反映 IOL 的光学质量,本研究测量了 0 ~ 150 lp/mm 空间频率下的 MTF 曲线。

图 2 为 +10 m<sup>-1</sup>、+20 m<sup>-1</sup> 和 +30 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF 在不同偏心和倾斜程度时,包含 0 ~ 150 lp/mm 空间频率下 MTF 值的 MTF 曲线,结果显示 3 种屈光度的 SN60WF 在居中位置时 IOL 的屈光度越高,MTF 曲线整体越高,而在 3.0 mm 孔径下偏心 0.5 mm 和倾斜 5° 以上,以及在 4.5 mm 孔径下偏心

0.3 mm 和倾斜 3° 以上表现为 IOL 屈光度越高,MTF 曲线整体越低。+10 m<sup>-1</sup>、+20 m<sup>-1</sup> 和 +30 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF 偏心 0.3 mm 时,MTF 曲线均较居中下降。+10 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF 在 3.0 mm 孔径下倾斜 3° 时 MTF 曲线与居中几乎重合,在倾斜 5° 时较居中时下降,而在 4.5 mm 孔径下倾斜 3° MTF 曲线即出现下降;+20 m<sup>-1</sup> 和 +30 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF,在 2 种孔径下发生 3° 倾斜 MTF 曲线均较居中下降。随着偏心和倾斜程度增加,3 种屈光度的 SN60WF MTF 曲线下降幅度增大,且 IOL 屈光度越高,发生偏心和倾斜 MTF 曲线下降幅度越大。

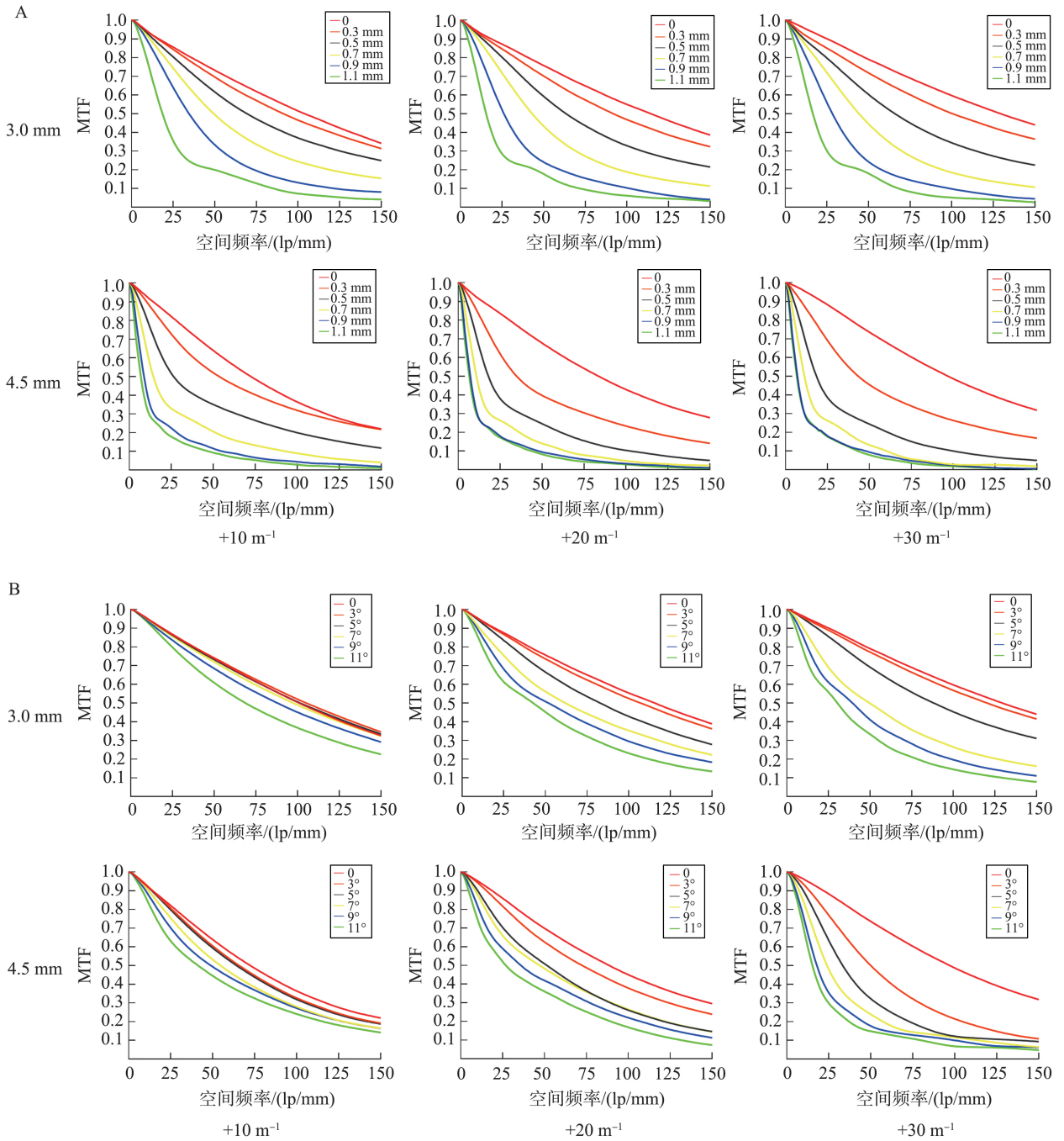


图2 3.0 mm 和 4.5 mm 孔径下,不同屈光度的 IOLs 偏心(A)和倾斜(B)时的 MTF 曲线  
Figure 2 MTF curves for the IOLs with different diopters at apertures of 3.0 and 4.5 mm when the IOLs were decentered (A) and tilted (B)

### 2.3 不同屈光度 IOL 在居中、不同程度偏心和倾斜时的 USAF 分辨率测试图

USAF 分辨率测试图可直观地显示不同测量条件下 IOL 光学质量的变化。图 3 为 +10 m<sup>-1</sup>、+20 m<sup>-1</sup> 和 +30 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF 在不同偏心和倾斜程度时的 USAF 分辨率测试图。结果显示 3 种屈光度 SN60WF 中, IOL 的屈光度越高, 居中位置的 USAF 分辨率越高。在 3.0 mm 孔径下偏心 0.5 mm 和倾斜 5° 以上, 以及在 4.5 mm 孔径下偏心 0.3 mm

和倾斜 3° 以上, IOL 的屈光度越高, USAF 分辨率越低, 这与 MTF 曲线结果一致。3 种屈光度的 SN60WF USAF 分辨率均从偏心 0.3 mm 开始下降; +10 m<sup>-1</sup> SN60WF 在 3.0 mm 和 4.5 mm 孔径下 USAF 分辨率分别从倾斜 5° 时和 3° 开始下降。而 +20 m<sup>-1</sup> 和 +30 m<sup>-1</sup> 的 SN60WF 在 2 种孔径下倾斜 3° 即出现 USAF 分辨率轻微下降。随着偏心和倾斜程度增加, 3 种屈光度 IOL USAF 分辨率更低。

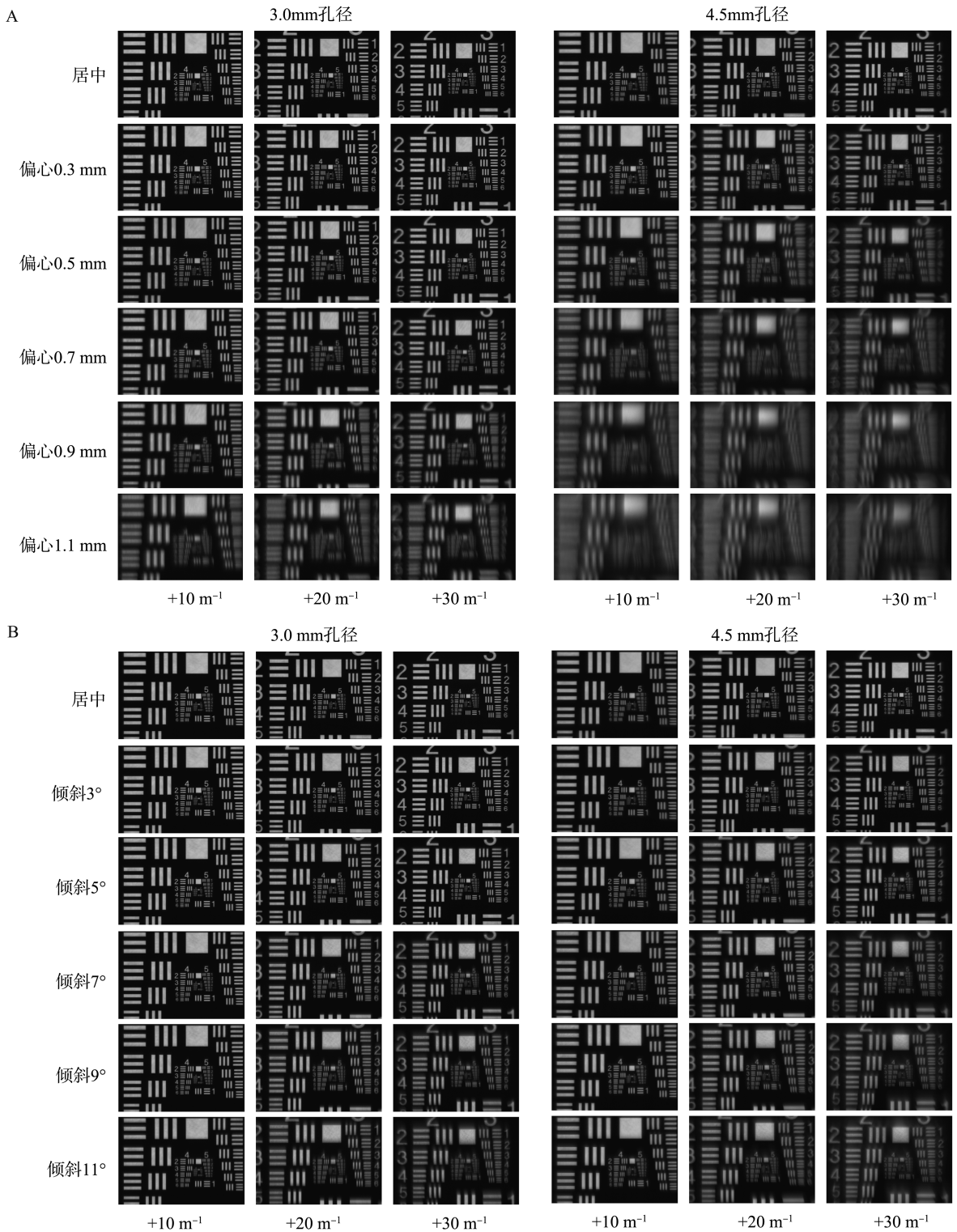


图 3 3.0 mm 和 4.5 mm 孔径下,不同屈光度的 IOLs 偏心(A)和倾斜(B)时的 USAF 分辨率测试图  
 Figure 3 USAF resolution test charts for the IOLs with different diopters at apertures of 3.0 and 4.5 mm when the IOLs were decentered (A) and tilted (B)

### 3 讨论

IOL 体外光学质量测试可设置测量条件,如孔径大小、IOL 位置,是一种更为客观、全面的 IOL 光学特性的评价方法,既往研究多基于正常眼轴条件

下 IOL 屈光度的评估,鲜有不同屈光度的 IOL 光学特性差异及抗偏心和倾斜能力的研究<sup>[24,26]</sup>。而实际临床工作中,不同程度远视和近视的患者并不少见,特别是近年来近视患病率升高,需要植入较低屈光度 IOL 的患者也增多,因此研究不同屈光度 IOL

在光学质量及抗偏心和倾斜的能力的差异具有重要意义<sup>[27]</sup>。目前,非球面 IOL 仍是临床上应用最广泛的 IOL 类型,不同厂家设计的非球面 IOL 球差值不同,居中时的光学质量存在差异,抗偏心和倾斜能力也不尽相同<sup>[28]</sup>。 $-0.200\ \mu\text{m}$  球差值的非球面 IOL SN60WF 适用于角膜球差值接近人群平均水平的患者,本研究首次体外条件下测量了 3.0 mm 和 4.5 mm 孔径下,不同屈光度的 SN60WF 在居中、偏心和倾斜时光学质量,探索不同屈光度非球面单焦点 IOL 光学特性及抗偏心和倾斜的能力。这有助于临床医生了解 IOL 的光学特性,预测不同屈光度,尤其是伴高度近视白内障患者术后可能出现更大的偏心和倾斜带来的视觉质量下降,从而便于术前沟通,同时也为未来基于非球面平台设计的多焦点 IOL 和散光矫正型 IOL 的光学质量和位置改变后的影响研究提供参考。

本研究结果显示,SN60WF 的屈光度越高,居中心时光学质量越好,其原理与 IOL 的屈光度越高,焦距越短,光损失量越小有关<sup>[28]</sup>。随着偏心和倾斜程度的增大, $+10\ \text{m}^{-1}$ 、 $+20\ \text{m}^{-1}$ 和 $+30\ \text{m}^{-1}$  3 种屈光度的 SN60WF 光学质量整体均呈下降趋势,这可能与偏心量和倾斜度增大导致彗差和散光增加,进而影响 IOL 的成像质量有关<sup>[3,5-6]</sup>。偏心和倾斜时,IOL 的屈光度越高,光学质量下降幅度越大。这是因为屈光度越高的 IOL 在偏心和倾斜时产生的散光和彗差越大,光学质量受到的负面影响越大,临床上伴有高度远视的白内障患者尤其要注意撕囊口大小、撕囊的居中性,减少术后 IOL 的偏心和倾斜。3 种屈光度的 SN60WF 均从偏心 0.3 mm 开始出现光学质量下降,而倾斜的影响略有不同, $+10\ \text{m}^{-1}$  的 SN60WF 在 3.0 mm 和 4.5 mm 孔径下光学质量分别从倾斜  $5^\circ$  和  $3^\circ$  开始下降,而  $+20\ \text{m}^{-1}$  和  $+30\ \text{m}^{-1}$  的 SN60WF 在 2 种孔径下倾斜  $3^\circ$  时即出现光学质量下降现象。Pérez-Gracia 等<sup>[28]</sup> 在 3.0 mm 孔径下测量了不同屈光度的非球面单焦点 IOL ( $-0.137\ \mu\text{m}$  球差值),发现  $+10\ \text{m}^{-1}$  的 IOL MTF 值从偏心 0.25 mm 和倾斜  $4^\circ$  开始下降,而  $+20\ \text{m}^{-1}$  和  $+35\ \text{m}^{-1}$  的 IOL MTF 值从偏心 0.25 mm 和倾斜  $2^\circ$  开始下降,并且随着偏心和倾斜程度增加,各屈光度的 IOL MTF 值下降幅度增大,与本研究结果接近。曹广梁等<sup>[24]</sup> 通过体外光学测试设备应用 ISO-1 模型角膜(球差值为  $0\ \mu\text{m}$ ) 在 3.0 mm 孔径下测量了  $+21\ \text{m}^{-1}$  的 SN60WF 偏心和倾斜时的光学质量,结果显示 SN60WF 随偏心和倾斜程度增加光学质量下降,与本研究结果规律一致。与该研究相比,本研究采用

的模型角膜球差值 ( $+0.28\ \mu\text{m}$ ) 模拟人眼平均角膜球差 ( $+0.27\ \mu\text{m}$ ),测试温度与前房温度近似,增设 4.5 mm 孔径模拟中间视觉条件,设置的 IOL 偏心和倾斜测量范围更广,对 IOL 偏心和倾斜时的光学影响探讨更全面。

另外,本团队的体内研究显示 SN60WF 植入后偏心约为 0.26 mm,这个范围内 IOL 对偏心的耐受性较好<sup>[1]</sup>。以往体外研究表明,非球面 IOL 比球面 IOL 对偏心和倾斜更敏感,尤其是负球差值高的非球面 IOL,偏心和倾斜对其光学质量影响更大<sup>[28]</sup>,结合本研究结果可为临床医师个性化选择 IOL 提供思路:对于所需植入的 IOL 屈光度很高或很低的患者,偏心和倾斜对其视觉质量影响较大,这部分患者选择较低球差值的 IOL 更为适宜,而对于屈光状态接近正视眼的患者,IOL 的球差值大小对其光学质量影响相对较小,可综合术前检查结果预测术后可能发生的偏心和倾斜量,选择合适球差设计的 IOL。

有关不同屈光度 IOL 采用不同孔径大小测试的差异,本研究显示偏心和倾斜程度相同时,4.5 mm 孔径下 3 种屈光度 SN60WF 的光学质量均低于 3.0 mm 孔径,4.5 mm 孔径下各 IOL 偏心和倾斜时光学质量下降幅度更大。以往研究<sup>[29]</sup> 表明,大孔径下产生的彗差较小孔径下更大,并且屈光度越高的 IOL 发生偏心和倾斜时产生的彗差越大,与本研究孔径和屈光度大小对 IOL 光学质量影响的规律一致。另外,Tandogan 等<sup>[30]</sup> 的体外研究表明, $+21\ \text{m}^{-1}$  的单焦点 IOL CT ASPHINA 409M (德国, Zeiss) 随偏心程度增加,光学质量下降,并且在较大孔径下发生偏心时光学质量下降幅度更大,与本研究中相近屈光度 ( $+20\ \text{m}^{-1}$ ) 的 SN60WF 规律一致。本研究提示植入同一种 IOL 的患者在视物清晰度上可能存在一定差异,临床上特别是对于植入 IOL 屈光度高的患者,应注意观察明视和暗视环境下的瞳孔直径,并更加重视 IOL 的居中性,以免导致术后视觉质量下降。

研究存在一定的局限性,如由于设备限制,研究仅采用单色光进行测量,未考虑 Kappa 角对几何像差的影响,因此与多色光源下的测量结果可能存在一定差异;无法测量 IOL 位置改变时产生的球差、彗差和散光等波前像差。未来的研究中可寻找能够进行多色光源下 IOL 偏心和倾斜的光学质量测量设备,并细分不同类型高阶像差的测量,以明确 IOL 在不同位置条件下各种高阶像差对光学质量的影响。另外,可在研究基础上进一步探索角膜球差值

大小对 SN60WF 光学表现的影响,以及基于 Acrosf IQ 平台开发的双焦点、三焦点和散光矫正型 IOL 偏心 and 倾斜时的光学表现。

## 参考文献:

[1] 钱玖林, 廖萱, 唐玉玲, 等. 非球面人工晶状体偏心和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  
QIAN Jiulin, LIAO Xuan, TANG Yuling, et al. Comparative study of decentration, tilt and visual quality after implantation of aspherical intraocular lenses [J]. Chinese Journal of Ophthalmology, 2022, 58(7): 521-528. doi: 10.3760/cma.j.cn112142-20211103-00518

[2] 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. doi: 10.3760/cma.j.cn115989-20210526-00323  
TANG Yuling, LIAO Xuan, TAN Qingqing, et al. Repeatability of CASIA2 for measuring the tilt and decentration of crystalline lens and intraocular lens under non-mydiatic and mydiatic conditions[J]. Chinese Journal of Experimental Ophthalmology, 2022, 40(5): 440-447. doi: 10.3760/cma.j.cn115989-20210526-00323

[3] 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

[4] 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. doi: 10.6040/j.issn.1673-3770.0.2021.544  
HUANG Ziyang, DUAN Guoping. Effects of tilt and decentration on visual quality after various intraocular lens implantations[J]. Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University, 2022, 36(6): 26-31. doi: 10.6040/j.issn.1673-3770.0.2021.544

[5] 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. doi: 10.3760/cma.j.cn112142-20210223-00096  
LAN Changjun, TANG Yuling, LIAO Xuan. Chinese Journal of Ophthalmology, 2021, 57(7): 552-556. doi: 10.3760/cma.j.cn112142-20210223-00096

[6] 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

[7] Łabuz G, Auffarth GU, Knorz MC, et al. Trifocality

achieved through polypseudophakia: optical quality and light loss compared with a single trifocal intraocular lens [J]. J Refract Surg, 2020, 36(9): 570-577. doi: 10.3928/1081597X-20200715-01

[8] Mayer C, Son HS, abuz G, et al. In vitro optical quality assessment of a monofocal IOL sutured to an artificial iris [J]. J Cataract Refract Surg, 2020, 46(8): 1184-1188. doi: 10.1097/j.jcrs.0000000000000287

[9] Song SH, Song IS, Oh SJ, et al. Optical bench simulation for intraocular lenses using field-tracing technology [J]. PLoS One, 2021, 16(12): e0250543. doi: 10.1371/journal.pone.0250543

[10] Liu XM, Xie LX, Huang YS. 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

[11] Son HS, abuz G, Khoramnia R, et al. Laboratory analysis and ray visualization of diffractive optics with enhanced intermediate vision [J]. BMC Ophthalmol, 2021, 21(1): 197. doi: 10.1186/s12886-021-01958-8

[12] 潘若琳, 廖萱, 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  
PAN Ruolin, LIAO Xuan, LAN Changjun. Research progress in the application of in vitro optical quality test system for the assessment of IOL optical quality [J]. Chinese Journal of Experimental Ophthalmology, 2024, 42(3): 290-296. doi: 10.3760/cma.j.cn115989-20221107-00521

[13] Beiko GHH, Haigis W, Steinmueller A. Distribution of corneal spherical aberration in a comprehensive ophthalmology practice and whether keratometry can predict aberration values [J]. J Cataract Refract Surg, 2007, 33(5): 848-858. doi: 10.1016/j.jcrs.2007.01.035

[14] 南莉, 汤欣, 刘永基. 球面与非球面人工晶状体焦深研究[J]. 中华眼科杂志, 2012, 48(2): 137-141. doi: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2012.02.009  
NAN Li, TANG Xin, LIU Yongji. Depth of focus in spherical and aspheric intraocular lenses [J]. Chinese Journal of Ophthalmology, 2012, 48(2): 137-141. doi: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2012.02.009

[15] Gu XX, Chen XY, Yang GY, 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

[16] 唐玉玲, 廖萱, 谭青青, 等. 扫频 OCT CASIA2 测量白内障患者术前晶状体与术后人工晶状体偏心和倾斜的相关性[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2022, 24

- (6): 434-440. doi:10.3760/cma.j.cn115909-20210928-00399
- TANG Yuling, LIAO Xuan, TAN Qingqing, et al. Correlation of decentration and tilt between crystalline lens and intraocular lens measured by swept-source ocular coherence tomography CASIA2 [J]. *Chinese Journal of Optometry Ophthalmology and Visual Science*, 2022, 24(6): 434-440. doi:10.3760/cma.j.cn115909-20210928-00399
- [17] 谢丽暄, 廖萱, 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 Lixuan, LIAO Xuan, LAN Changjun, et al. Evaluation of optical performance of aspherical intraocular lens in vitro by optical bench [J]. *Chinese Journal of Experimental Ophthalmology*, 2024, 42(3): 240-247. doi: 10.3760/cma.j.cn115989-20230821-00075
- [18] Pakuliene G, Zimarinas K, Nedzelskiene I, et al. Anterior segment optical coherence tomography imaging and ocular biometry in cataract patients with open angle glaucoma comorbidity [J]. *BMC Ophthalmol*, 2021, 21(1): 127. doi:10.1186/s12886-021-01874-x
- [19] Chen YX, Meng JQ, Cheng KW, et al. Influence of IOL weight on long-term IOL stability in highly myopic eyes [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9: 835475. doi:10.3389/fmed.2022.835475
- [20] International Organization for Standardization. Ophthalmic implants-Intraocular lenses-Part 2: Optical properties and test methods; ISO11979-2:2014[S/OL]. <https://www.iso.org/standard/55682.html>.
- [21] Borkenstein AF, Borkenstein EM, Luedtke H, et al. Optical bench analysis of 2 depth of focus intraocular lenses [J]. *Biomed Hub*, 2021, 6(3): 77-85. doi:10.1159/000519139
- [22] Son HS, Labuz G, Khoramnia R, et al. Ray propagation imaging and optical quality evaluation of different intraocular lens models [J]. *PLoS One*, 2020, 15(2): e0228342. doi:10.1371/journal.pone.0228342
- [23] Son HS, Tandogan T, Liebing S, et al. In vitro optical quality measurements of three intraocular lens models having identical platform [J]. *BMC Ophthalmol*, 2017, 17(1): 108. doi:10.1186/s12886-017-0460-0
- [24] 曹广梁, 刘晓敏, 樊峥, 等. 体外光学质量测试设备评价 IOL 的光学性能 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2022, 24(12): 894-901. doi: 10.3760/cma.j.cn115909-20211118-00449
- CAO Guangliang, LIU Xiaomin, FAN Zheng, et al. Evaluation of optical performance of IOL in vitro by optical bench [J]. *Chinese Journal of Optometry Ophthalmology and Visual Science*, 2022, 24(12): 894-901. doi:10.3760/cma.j.cn115909-20211118-00449
- [25] Shen ZR, Lin YC, Zhu YN, et al. Clinical comparison of patient outcomes following implantation of trifocal or bifocal intraocular lenses: a systematic review and meta-analysis [J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 45337. doi:10.1038/srep45337
- [26] Ortiz C, Esteve-Taboada JJ, Belda-Salmerón L, et al. Effect of decentration on the optical quality of two intraocular lenses [J]. *Optom Vis Sci*, 2016, 93(12): 1552-1559. doi:10.1097/OPX.0000000000001004
- [27] Walline JJ, Lindsley KB, Swaroop Vedula S, et al. Interventions to slow progression of myopia in children [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2020, 1(1): CD004916. doi:10.1002/14651858.CD004916.pub4
- [28] Pérez-Gracia J, Varea A, Ares J, et al. Evaluation of the optical performance for aspheric intraocular lenses in relation with tilt and decenter errors [J]. *PLoS One*, 2020, 15(5): e0232546 doi: 10.1371/journal.pone.0232546
- [29] 袁博. 实验室眼模型中 IOL 发生位置变化的彗差和视觉质量分析 [D]. 天津: 天津医科大学, 2018
- [30] Tandogan T, Son HS, Choi CY, et al. Laboratory evaluation of the influence of decentration and pupil size on the optical performance of a monofocal, bifocal, and trifocal intraocular lens [J]. *J Refract Surg*, 2017, 33(12): 808-812. doi:10.3928/1081597X-20171004-02

(编辑:李纬)