

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

谢丽暄¹ 廖莹¹ 兰长骏² 谭青青¹ 潘若琳¹ 唐玉玲¹ 秦苏云¹ 王艳¹

¹川北医学院附属医院眼科 川北医学院眼视光医学院,南充 637000;²成都东区爱尔眼科医院,成都 610056

通信作者:兰长骏,Email:lanchangjun@sina.com

【摘要】 **目的** 应用体外光学质量测试设备 OptiSpheric IOL R&D 比较 2 种具有相同负球差值的非球面人工晶状体 (IOL) AcrySof IQ SN60WF 和 Proming A1-UV 的光学性能。 **方法** 应用 OptiSpheric IOL R&D 设备,分别在球差为 0 μm (ISO-1) 和 +0.28 μm (ISO-2) 的模型角膜以及孔径为 3.0 和 4.5 mm 条件下对 +20.0 D 蓝光滤过型 SN60WF 和高次非球面设计的非蓝光滤过全像差补偿型 A1-UV IOL 进行光学性能评估。分别测量 IOL 居中,偏心 0.3、0.5、0.7、0.9 和 1.1 mm,倾斜 3°、5°、7°、9° 和 11° 的调制传递函数 (MTF) 以及 USAF 1951 分辨率测试图。采用紫外可见分光光度计 UV-3300 测试 IOL 的光谱透射比。 **结果** 与 A1-UV IOL 相比,SN60WF 对 400~500 nm 波长蓝光的光谱透射比明显降低,能明显减少蓝光透过。当孔径为 3.0 mm 时,居中位置的 SN60WF 和 A1-UV 在 100 lp/mm 空间频率时 ISO-1 角膜测量条件下 MTF 值分别为 0.576 和 0.598,ISO-2 角膜测量条件下 MTF 值分别为 0.564 和 0.563;当孔径为 4.5 mm 时,ISO-1 角膜测量条件下 MTF 值分别为 0.238 和 0.404,ISO-2 角膜测量条件下 MTF 值分别为 0.438 和 0.339。在 3.0 mm 孔径下,100 lp/mm 空间频率时 ISO-1 角膜测量条件下 MTF 值均较 ISO-2 角膜测量条件下升高;在 ISO-1 角膜测量条件下,A1-UV 相比于 SN60WF 展现出更优越的光学质量,而在 ISO-2 角膜测量条件下,2 种 IOL 的光学质量相似。在 3.0 mm 孔径下,偏心 0.3 mm 的 SN60WF 和 A1-UV 在 100 lp/mm 空间频率时 ISO-1 角膜测量条件下 MTF 值分别为 0.414 和 0.571,ISO-2 角膜测量条件下 MTF 值分别为 0.438 和 0.512,倾斜 3° 的 ISO-1 角膜测量条件下 MTF 值分别为 0.522 和 0.597,ISO-2 角膜测量条件下 MTF 值分别为 0.532 和 0.531,A1-UV 在 2 种角膜测量条件下的 MTF 值和 USAF 分辨率测试图未发生显著改变。当 IOL 发生相同程度偏心或倾斜时,除 4.5 mm 孔径 ISO-1 角膜测量条件以外,A1-UV 各空间频率的 MTF 值相较于 SN60WF 均下降。随着孔径的增大,IOL 偏心或倾斜对 MTF 值和 USAF 分辨率测试图的影响更加显著。 **结论** SN60WF IOL 能有效滤过波长在 400~500 nm 范围内的蓝光。当 2 种 IOL 发生大于 0.3 mm 的偏心或大于 3° 的倾斜时,均会造成 IOL 的光学质量下降。A1-UV 相较于 SN60WF 在体外抗偏心 and 倾斜性能方面具有一定优势。

【关键词】 人工晶状体; 光学性能; 体外; 偏心; 倾斜; 成像质量

基金项目: 四川省医学科研课题 (S21011)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20230821-00075

Evaluation of optical performance of aspherical intraocular lens *in vitro* by optical bench

Xie Lixuan¹, Liao Xuan¹, Lan Changjun², Tan Qingqing¹, Pan Ruolin¹, Tang Yuling¹, Qin Suyun¹, Wang Yan¹

¹Department of Ophthalmology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Medical School of Ophthalmology & Optometry, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China; ²Chengdu Eastern Aier Eye Hospital, Chengdu 610056, China

Corresponding author: Lan Changjun, Email: lanchangjun@sina.com

【Abstract】 **Objective** To evaluate the optical performance of two aspheric intraocular lenses (IOL) AcrySof IQ SN60WF and Proming A1-UV with identical negative spherical aberration values, using the optical bench OptiSpheric IOL R&D through an *in vitro* study. **Methods** The optical performance of +20.0 D blue-light filtering SN60WF and monofocal high-order aspheric non blue-light filtering A1-UV IOL was evaluated through cornea models with the spherical aberration of 0 μm (ISO-1) and +0.28 μm (ISO-2) under apertures of 3.0 mm and 4.5 mm via the

optical bench OptiSpheric IOL R&D. The modulation transfer function (MTF) and USAF 1951 resolution test chart were employed to measure the IOL with centering, decentration of 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 and 1.1 mm, as well as tilt of 3°, 5°, 7°, 9° and 11°. The spectral transmittance of IOL was measured with the UV-3300 UV-VIS spectrophotometer. **Results** Compared with the A1-UV IOL, the spectral transmittance of SN60WF for blue light with wavelengths of 400–500 nm was significantly reduced, which effectively reduced the passage of blue light. At an aperture of 3.0 mm, the MTF values at 100 lp/mm spatial frequency for the centered SN60WF and A1-UV were 0.576 and 0.598 under ISO-1 corneal measurement conditions, 0.564 and 0.563 under ISO-2 conditions. At an aperture of 4.5 mm, the MTF values were 0.238 and 0.404 under ISO-1 corneal measurement conditions, and 0.438 and 0.339 under ISO-2 conditions. The MTF values of A1-UV and SN60WF at 3.0 mm aperture and 100 lp/mm spatial frequency under ISO-1 corneal measurement conditions were larger than those under ISO-2 corneal measurement conditions. Under ISO-1 corneal measurement conditions with a 3.0 mm aperture, A1-UV had a better optical quality compared to SN60WF, whereas under ISO-2 corneal measurement conditions, the optical quality of both IOLs was similar. Under the 3.0 mm aperture, the MTF values of SN60WF and A1-UV at a decentration of 0.3 mm and 100 lp/mm spatial frequency were 0.414 and 0.571 under ISO-1 corneal measurement conditions, 0.438 and 0.512 under ISO-2 corneal measurement conditions, respectively. The MTF values of SN60WF and A1-UV at a tilt of 3° were 0.522 and 0.597 under ISO-1 corneal measurement conditions, and 0.532 and 0.531 under ISO-2 corneal measurement conditions. The MTF values and USAF resolution test chart of A1-UV had no significant change between the two corneal measurement conditions. When subjected to equal degrees of decentration or tilting, except for the ISO-1 corneal measurement conditions at a 4.5 mm aperture, the MTF values of A1-UV showed a gradual decline across various spatial frequencies compared to SN60WF. With the increase in aperture size, the impact of IOL decentration or tilting on MTF values and USAF 1951 resolution test chart became more notable for A1-UV relative to SN60WF. **Conclusions** The SN60WF IOL effectively filters blue light within the wavelength range of 400–500 nm. However, when both IOL experience decentration greater than 0.3 mm or tilting beyond 3°, the optical quality of the IOL will decline. A1-UV has a distinct advantage over SN60WF in terms of resistance to both decentration and tilting-induced optical performance degradation *in vitro*.

[Key words] Lenses, intraocular; Optical performance; *In vitro*; Decentration; Tilt; Optical quality

Fund program: Medical Research Project of Sichuan Province (S21011)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20230821-00075

近年来,人工晶状体(intraocular lens, IOL)材料和设计不断更新,同时 IOL 眼内位置对其光学性能的影响也值得关注^[1-2]。IOL 的理想位置是居于囊袋内且中心与视轴重合,但由于患者眼部解剖结构、IOL 特性和手术操作等因素, IOL 不可避免地发生偏心和倾斜。轻微的 IOL 偏心和倾斜不会引起患者明显的主观不适,但一定程度的偏心和倾斜可能导致近视漂移、斜向散光、彗差等高阶像差增加、最佳矫正视力下降和视觉质量下降等^[1-3]。通常情况下,角膜的球差为正值且相对稳定,6.0 mm 瞳孔直径下约为+0.27 μm,而晶状体的球差为负值,2 个光学系统之间呈相互补偿的理想状态^[4]。然而随着年龄增长,晶状体的球差逐渐从负值变为正值,导致全眼总球差增加和视觉质量下降^[5-6]。目前,临床上非球面 IOL 应用广泛,如散光矫正型、老视矫正型 IOL 等,其光学性能的影响程度与非球面 IOL 的球差值紧密相关^[7-8]。本研究团队在前期临床研究发现,植入囊袋的单焦点非球面 IOL,如 SN60WF 和 A1-UV 存在不同程度的偏心和倾斜,然而

其在患者视力、对比敏感度和视觉质量方面并未显示出临床意义上的差异,这说明术后轻度的 IOL 偏心和倾斜对患者来说是可以良好耐受的^[9-10]。既往关于 IOL 偏心和倾斜对视觉质量影响的研究大多为体内研究,容易受到个体差异、光学介质和患者主观感受的影响,具有一定的局限性,因此难以确切地评价偏心、倾斜和瞳孔大小等因素的影响^[11];另一方面,一些体外研究依赖光学设计软件,如 ZEMAX、OSLO 等,得到的结果可能与真实值存在一定差异^[12-13]。光学测试设备 OptiSpheric IOL R&D 能够根据不同研究目的来设置光学参数,对功能性 IOL 进行光学性能评估,能更客观、准确地评价 IOL 的光学性能^[7-8,14]。据了解,目前已有关于不同球差 IOL 体外光学性能比较的研究,但不同光学设计对 IOL 光学性能的影响尚不清楚^[7,13,15]。因此,本研究拟采用 OptiSpheric IOL R&D 设备比较 2 种具有相同负球差值但不同平台设计的非球面 IOL 的光学性能,旨在从光学层面为临床个性化选择 IOL 提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验 IOL (1) 非球面蓝光滤过型 IOL AcrySof IQ SN60WF (美国 Alcon 公司) 由疏水性丙烯酸酯制成, 基于 AcrySof 一片式平台设计, 全长 13.0 mm, 球差为 $-0.20 \mu\text{m}$, 光学区直径为 6.0 mm, 襟为改良型的 L 型。(2) 非球面非蓝光滤过型 IOL Proming A1-UV (北京爱博诺德医疗科技股份有限公司) 由疏水性丙烯酸酯制成, 可折叠一片式, 全长 13.0 mm, 球差为 $-0.20 \mu\text{m}$, 光学区直径为 6.0 mm, 襟为改良型的 L 型, 采用“高次”非球面设计, 能够补偿球差、彗差、三叶草像差等, 是全像差补偿型 IOL。

1.1.2 主要仪器 体外光学质量测量设备 OptiSpheric IOL R&D (德国 Trioptics GmbH 公司), 设备的设置和测量符合国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 11979-2^[16] 和 11979-7^[17] 规定的指南; 紫外可见分光光度计 UV-3300 (上海美谱达仪器有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 光谱透射比的测量 设置紫外可见分光光度计 UV-3300 测试孔径光阑直径为 3.0 mm, IOL 放置在充满 0.9% 氯化钠溶液的石英比色皿中, 确保 IOL 光学区与固定支架平行, 将石英比色皿放入分光光度计吸收池支架中, 在光探测器前面放置 1 个辅助积分球, 以收集 IOL 折射的所有光, 测量 300~700 nm 波长范围内 IOL 的光谱透射比, 即透射光通量与入射光通量之比。

1.2.2 不同偏心和倾斜程度下的调制传递函数和 USAF 分辨率测试图测量 通过 OptiSpheric IOL R&D 自检校正后开始测量, 35 °C 下将 IOL 置于折射率为 1.336 (接近房水和玻璃体液的折射率) 的 0.9% 氯化钠溶液中平衡至少 30 分钟。设置 OptiSpheric IOL R&D 孔径大小为 3.0 mm 和 4.5 mm, 分别模拟 60 岁以上患者明视和暗视条件下的瞳孔大小^[18]; 分别在居中, 偏心 0.3、0.5、0.7、0.9 和 1.1 mm, 倾斜 3°、5°、7°、9° 和 11° 条件下测试 IOL 0~150 lp/mm 空间频率下的调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 值并拍摄最佳远焦点处的 USAF 图像。通过测量探测器 (由物镜显微镜镜头和集成自动对焦的高分辨率电荷耦合设备相机组成) 捕获测试 IOL 所投射目标的焦点平面, 将捕获的图像生成线扩散函数, 以反映光学系统重现无限小细缝图像的能力; 通过傅里叶变换技术将细缝图像的截面强度分布计算成 MTF 值。同一特定条件下重复测量 3 次, 取平均值。本实验采用的 IOL 均为旋转对称

性 IOL, 故取矢向 MTF 值和切向 MTF 值进行分析。

1.3 评价指标

1.3.1 光谱透射比 光谱透射比越大, 表明物质对光的吸收越弱; 反之, 光谱透射比越小, 表明物质对光的吸收越强。

1.3.2 MTF MTF 反映光学系统对不同空间频率的响应能力, MTF 值越高, 透镜的光学质量越好。50 和 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值分别相当于 20/40 (Snellen) 和 20/20 (Snellen) 的视力^[19]。

1.3.3 USAF 分辨率测试图 用于测试光学成像系统的分辨能力, 可定性比较不同光学系统的光学性能。

1.3.4 离焦曲线 通过 MTF 随焦距响应试验得到, 以反映 IOL 焦深范围。

2 结果

2.1 SN60WF IOL 与 A1-UV IOL 的光谱透射比比较

SN60WF 和 A1-UV 对 400 nm 波长光的光谱透射比分别为 7.01% 和 95.09%, 对 440 nm 波长光的光谱透射比分别为 43.76% 和 97.62%, 对 480 nm 波长光的光谱透射比分别为 78.51% 和 97.84%; 2 种 IOL 对 600 nm 及以上波长光的光谱透射比相一致。与 A1-UV 比较, SN60WF 能明显减少 400~500 nm 波长的蓝光透过 (图 1)。

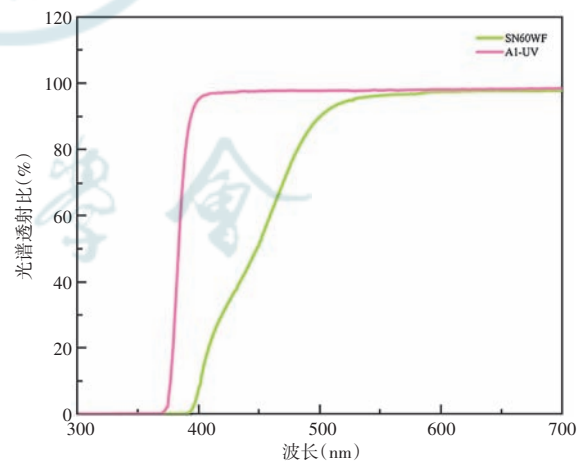


图 1 SN60WF IOL 和 A1-UV IOL 的光谱透射比曲线

Figure 1 Spectral transmittance curves of SN60WF IOL and A1-UV IOL

2.2 SN60WF IOL 与 A1-UV IOL 在不同空间频率下 MTF 值比较

当孔径为 3.0 mm 时, ISO-1 角膜测量条件下, 居中位置 A1-UV IOL 100 lp/mm 空间频率的 MTF 值大于 SN60WF IOL, 而在 ISO-2 角膜测量条件下 2 种

IOL 100 lp/mm 频率 MTF 值接近;4.5 mm 孔径各角膜条件下 2 种 IOL 0 ~ 150 lp/mm 空间频率 MTF 值较 3.0 mm 孔径均有不同程度下降。当 IOL 发生偏心和倾斜时,ISO-1 和 ISO-2 角膜测量条件下 2 种 IOL 各空间频率的 MTF 值均下降;随着偏心和倾斜量的增加,MTF 降幅增大。在 3.0 mm 孔径 ISO-1 角膜测量条件下, A1-UV 偏心 0.3 mm 时 MTF 曲线较居中时变化很小, 100 lp/mm 空间频率时 A1-UV 的 MTF 值由居中位置的 0.598 降为偏心 0.3 mm 的 0.571, 倾斜 3° 时的 MTF 曲线与居中位置的 MTF 曲线基本保持一致;而 SN60WF 出现 0.3 mm 偏心和 3° 倾斜时 MTF 曲线发生较明显改变。除 4.5 mm 孔径 ISO-1 角膜测量条件外, A1-UV 发生相同程度偏心和倾斜后各空间频率的 MTF 值下降较 SN60WF 更为缓慢。随着孔径的增大, IOL 偏心和倾斜后 MTF 值和 MTF 曲线下降更为显著(图 2, 3, 表 1, 2)。

2.3 SN60WF IOL 与 A1-UV IOL 的 USAF 分辨率测试图成像质量比较

在 3.0 mm 孔径下, 偏心 0.3 mm 或倾斜 3° 范围内, 2 种 IOL 在 ISO-1 和 ISO-2 角膜测量条件下的 USAF 分辨率测试图均能保持较清晰的成像质量, 而当偏心达 0.5 mm 或倾斜达 5° 以上时, 2 种 IOL 的成像质量逐渐衰减, 在 ISO-1 角膜测量条件下所得的各 IOL 分辨率测试图均优于 ISO-2 角膜条件, 与相同条件下 SN60WF 相比, A1-UV 的分辨率测试图更佳; 在 4.5 mm 孔径下, 偏心 0.3 mm 或倾斜 3° 时 SN60WF 的成像质量即开始下降, 而 A1-UV 的分辨率测试图优于 SN60WF(图 4, 5)。

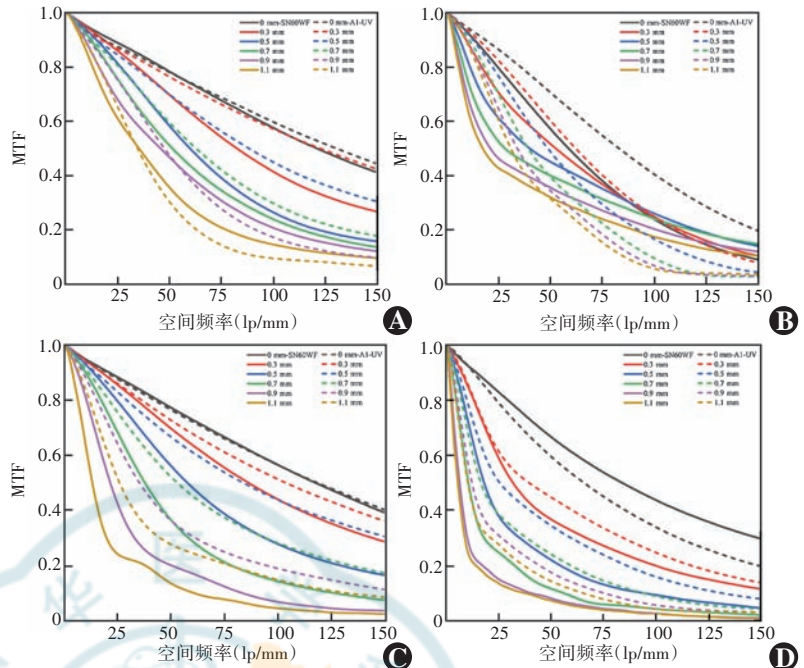


图 2 各孔径及角膜条件下 SN60WF IOL 和 A1-UV IOL 不同偏心程度的空间频率 MTF 变化曲线 A: 3.0 mm 孔径 ISO-1 角膜条件下 B: 4.5 mm 孔径 ISO-1 角膜条件下 C: 3.0 mm 孔径 ISO-2 角膜条件下 D: 4.5 mm 孔径 ISO-2 角膜条件下 MTF: 调制传递函数

Figure 2 Spatial frequency MTF curves of SN60WF IOL and A1-UV IOL under different degrees of decentration, various aperture sizes and corneal conditions A: Under ISO-1 corneal condition with a 3.0 mm aperture B: Under ISO-1 corneal condition with a 4.5 mm aperture C: Under ISO-2 corneal condition with a 3.0 mm aperture D: Under ISO-2 corneal condition with a 4.5 mm aperture MTF: modulation transfer function

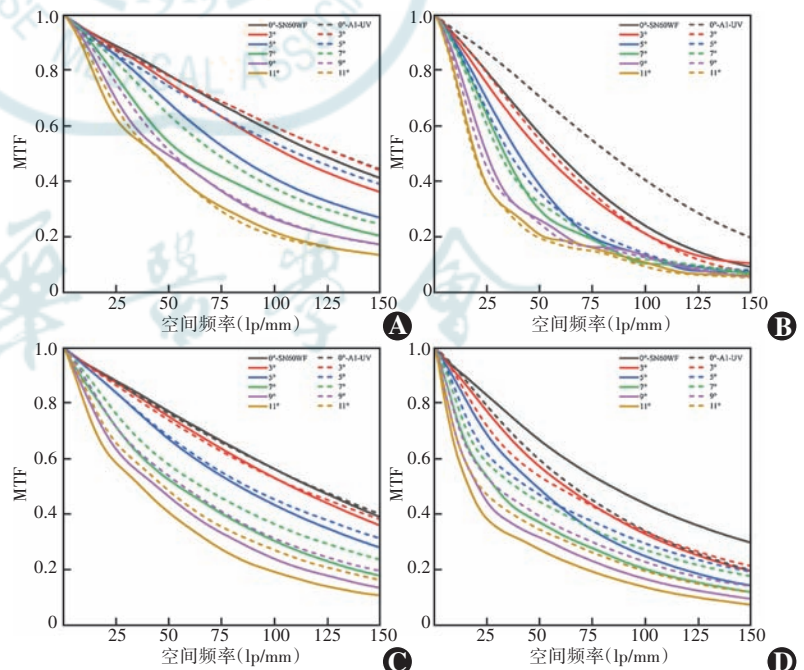


图 3 各孔径及角膜条件下 SN60WF IOL 和 A1-UV IOL 不同倾斜程度的空间频率 MTF 变化曲线 A: 3.0 mm 孔径 ISO-1 角膜条件下 B: 4.5 mm 孔径 ISO-1 角膜条件下 C: 3.0 mm 孔径 ISO-2 角膜条件下 D: 4.5 mm 孔径 ISO-2 角膜条件下 MTF: 调制传递函数

Figure 3 Spatial frequency MTF curves of SN60WF IOL and A1-UV IOL under different degrees of tilt, various aperture sizes and corneal conditions A: Under ISO-1 corneal condition with a 3.0 mm aperture B: Under ISO-1 corneal condition with a 4.5 mm aperture C: Under ISO-2 corneal condition with a 3.0 mm aperture D: Under ISO-2 corneal condition with a 4.5 mm aperture MTF: modulation transfer function

表 1 不同空间频率下 SN60WF IOL 和 A1-UV IOL 各偏心程度下的 MTF 值
Table 1 MTF values of SN60WF IOL and A1-UV IOL under different degrees of decentration at different spatial frequencies

空间频率	角膜条件	IOL	3.0 mm 孔径下 MTF 值						4.5 mm 孔径下 MTF 值					
			居中	偏心	偏心	偏心	偏心	偏心	居中	偏心	偏心	偏心	偏心	偏心
				0.3 mm	0.5 mm	0.7 mm	0.9 mm	1.1 mm		0.3 mm	0.5 mm	0.7 mm	0.9 mm	1.1 mm
50 lp/mm	ISO-1	A1-UV	0.780	0.765	0.699	0.596	0.476	0.304	0.705	0.602	0.487	0.393	0.343	0.313
		SN60WF	0.784	0.698	0.584	0.511	0.467	0.356	0.571	0.516	0.450	0.399	0.355	0.319
	ISO-2	A1-UV	0.764	0.726	0.666	0.520	0.362	0.275	0.596	0.448	0.345	0.242	0.175	0.143
		SN60WF	0.772	0.696	0.560	0.364	0.200	0.133	0.668	0.368	0.220	0.116	0.080	0.072
100 lp/mm	ISO-1	A1-UV	0.598	0.571	0.449	0.298	0.172	0.094	0.404	0.248	0.165	0.094	0.067	0.056
		SN60WF	0.576	0.414	0.264	0.239	0.207	0.145	0.238	0.247	0.259	0.240	0.202	0.174
	ISO-2	A1-UV	0.563	0.512	0.437	0.281	0.188	0.147	0.339	0.247	0.159	0.088	0.055	0.041
		SN60WF	0.564	0.438	0.276	0.141	0.067	0.043	0.438	0.199	0.092	0.042	0.025	0.022

注: IOL: 人工晶状体; MTF: 调制传递函数; ISO: 国际标准化组织; ISO-1: 模型角膜球差为 0 μm; ISO-2: 模型角膜球差为 +0.28 μm
 Note: IOL: intraocular lens; MTF: modulation transfer function; ISO: International Organization for Standardization; ISO-1: model corneal spherical aberration of 0 μm; ISO-2: model corneal spherical aberration of +0.28 μm

表 2 不同空间频率下 SN60WF IOL 和 A1-UV IOL 各倾斜程度下的 MTF 值
Table 2 MTF values of SN60WF IOL and A1-UV IOL under different degrees of tilt at different spatial frequencies

空间频率	角膜条件	IOL	3.0 mm 孔径下 MTF 值						4.5 mm 孔径下 MTF 值					
			无倾斜	倾斜 3°	倾斜 5°	倾斜 7°	倾斜 9°	倾斜 11°	无倾斜	倾斜 3°	倾斜 5°	倾斜 7°	倾斜 9°	倾斜 11°
50 lp/mm	ISO-1	A1-UV	0.780	0.781	0.744	0.641	0.513	0.449	0.705	0.550	0.355	0.322	0.247	0.194
		SN60WF	0.784	0.757	0.684	0.542	0.494	0.453	0.571	0.514	0.386	0.296	0.260	0.207
	ISO-2	A1-UV	0.764	0.741	0.682	0.580	0.539	0.486	0.596	0.537	0.470	0.445	0.392	0.344
		SN60WF	0.772	0.753	0.672	0.525	0.465	0.407	0.668	0.572	0.491	0.370	0.316	0.272
100 lp/mm	ISO-1	A1-UV	0.598	0.597	0.538	0.374	0.268	0.203	0.404	0.211	0.138	0.117	0.124	0.091
		SN60WF	0.576	0.522	0.410	0.327	0.263	0.216	0.238	0.210	0.129	0.102	0.131	0.106
	ISO-2	A1-UV	0.563	0.531	0.454	0.364	0.313	0.271	0.339	0.336	0.294	0.271	0.227	0.194
		SN60WF	0.564	0.532	0.434	0.304	0.239	0.191	0.438	0.328	0.248	0.201	0.166	0.136

注: IOL: 人工晶状体; MTF: 调制传递函数; ISO: 国际标准化组织; ISO-1: 模型角膜球差为 0 μm; ISO-2: 模型角膜球差为 +0.28 μm
 Note: IOL: intraocular lens; MTF: modulation transfer function; ISO: International Organization for Standardization; ISO-1: model corneal spherical aberration of 0 μm; ISO-2: model corneal spherical aberration of +0.28 μm

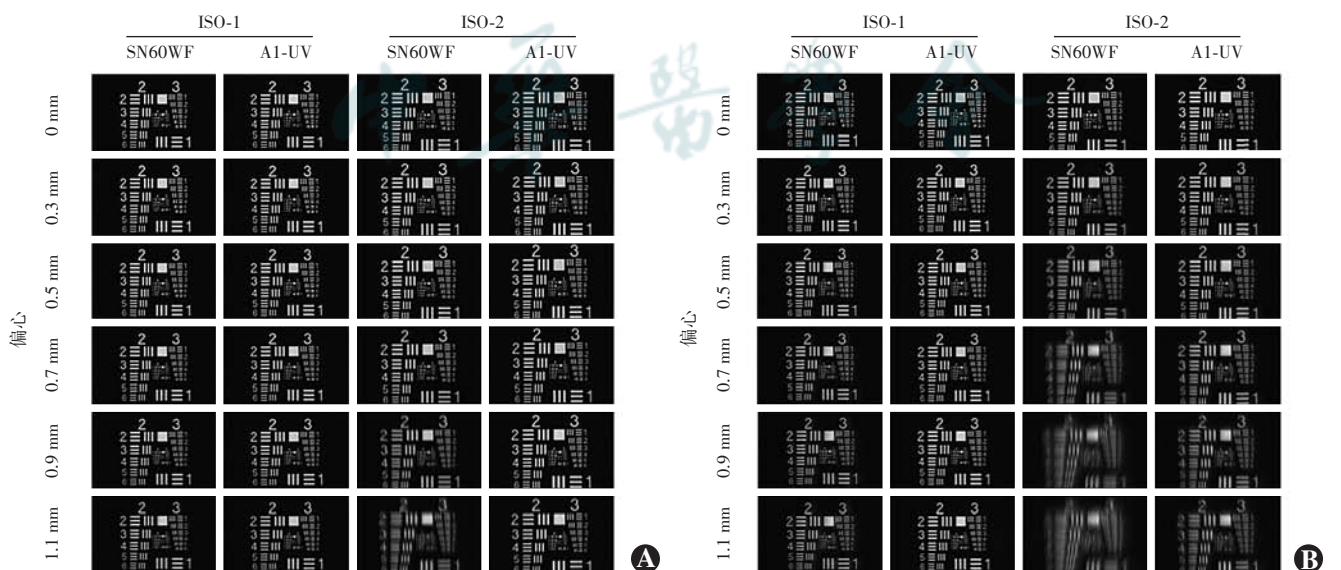


图 4 不同孔径和角膜条件下 SN60WF IOL 和 A1-UV IOL 不同程度偏心的 USAF 分辨率测试图 A: 3.0 mm 孔径 B: 4.5 mm 孔径 USAF 分辨率测试图于最佳远焦点处拍摄 ISO: 国际标准化组织; ISO-1: 模型角膜球差为 0 μm; ISO-2: 模型角膜球差为 +0.28 μm
Figure 4 USAF resolution test chart images of SN60WF IOL and A1-UV IOL under different degrees of decentration, different apertures, and corneal conditions A: At 3.0 mm aperture B: At 4.5 mm aperture The USAF resolution test chart image was recorded at the best focusing distance ISO: International Organization for Standardization; ISO-1: model corneal spherical aberration of 0 μm; ISO-2: model corneal spherical aberration of +0.28 μm

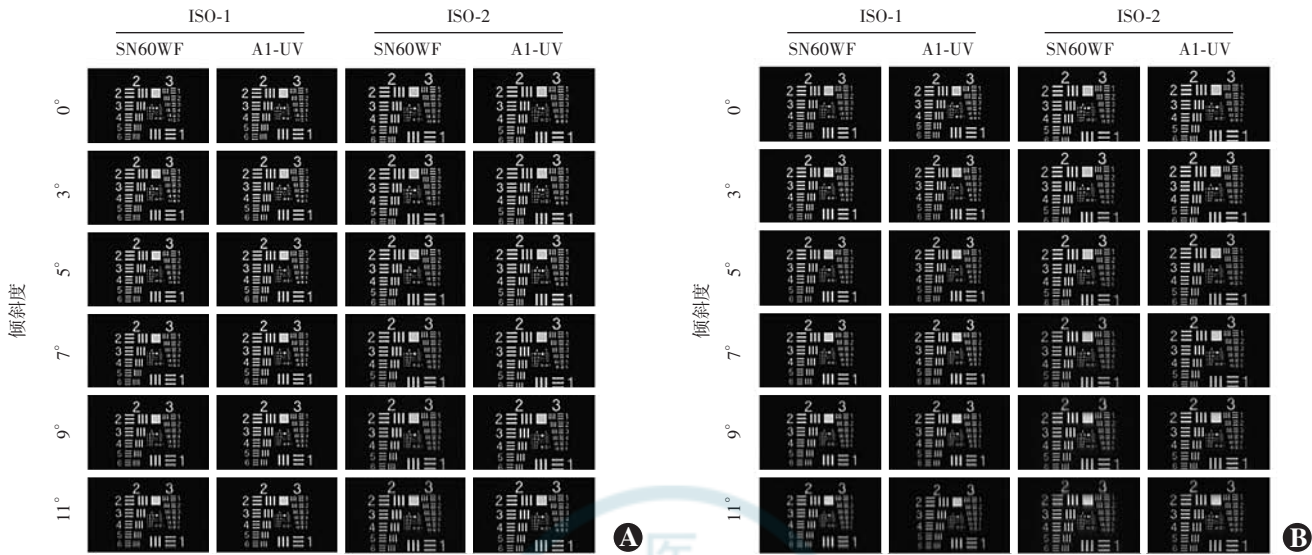


图5 各孔径和角膜条件下SN60WF IOL和A1-UV IOL不同程度倾斜的USAF分辨率测试图 A:3.0 mm孔径 B:4.5 mm孔径 USAF分辨率测试图于最佳远焦点处拍摄 ISO:国际标准化组织;ISO-1:模型角膜球差为0 μm;ISO-2:模型角膜球差为+0.28 μm

Figure 5 USAF resolution test chart images of SN60WF IOL and A1-UV IOL under different degrees of tilt under different apertures and corneal conditions A: At 3.0 mm aperture B: At 4.5 mm aperture The USAF resolution test chart was recorded at the best focusing distance ISO: International Organization for Standardization; ISO-1: model corneal spherical aberration of 0 μm; ISO-2: model corneal spherical aberration of +0.28 μm

2.4 SN60WF IOL 和 A1-UV IOL 离焦曲线比较

当孔径为 3.0 mm 时,SN60WF 和 A1-UV 在离焦为 0 的情况下均有较好的 MTF,焦深范围基本相同,离焦曲线在正负方向对称,在 ISO-2 角膜测量条件下的焦深范围较 ISO-1 角膜略减小,离焦 MTF 降低;4.5 mm 孔径时 ISO-1 和 ISO-2 测量条件下 SN60WF 和 A1-UV 的离焦 MTF 较 3.0 mm 孔径时均降低;ISO-1 角膜测量条件下,A1-UV 的离焦 MTF 大于 SN60WF,而 ISO-2 测量条件下则相反;A1-UV 和 SN60WF 的离焦曲线均未因孔径的增大而出现明显偏移,最佳 MTF 出现在-0.25~+0.25 D(图 6)。

3 讨论

蓝光是一种高能量可见光,分为 400~440 nm 的紫色光谱和 440~500 nm 的蓝色光谱^[20-21]。研究表明蓝光可通过影响松果体的褪黑素分泌,在人类昼夜节律中发挥重要作用,和紫外线一样也可能对视网膜光感受器和色素上皮细胞产生光毒性^[22-23]。本实验结果表明相较于非蓝光滤过型 IOL A1-UV,蓝光滤过型 IOL SN60WF 能有效滤过波长在 400~500 nm 的蓝光。

本研究采用光学质量测试设备 OptiSpheric IOL R&D 球差分别为 0 μm (ISO-1) 和 +0.28 μm (ISO-2) 的模型角膜对 2 种相同负球差值的非球面 IOL 进行测试,评估其不同程度偏心和倾斜状态下的成像质量。根据 ISO 11979-2 的规定^[16],对于单焦点 IOL,本研究着重对 100 lp/mm 空间频率下的 MTF 值进行分析。本研究结果显示,在光学实验台上不同角膜测量条件下 IOL 的光学性能不同。3.0 mm 孔径下,ISO-1 角膜测量条件 A1-UV 和 SN60WF 居中位置 50 lp/mm 和 100 lp/mm 空间频率时的 MTF 值均较 ISO-2 角膜测量条件下升高。不考虑人眼角膜球差时,在 50 lp/mm 空间频率时 2 种 IOL 光学质

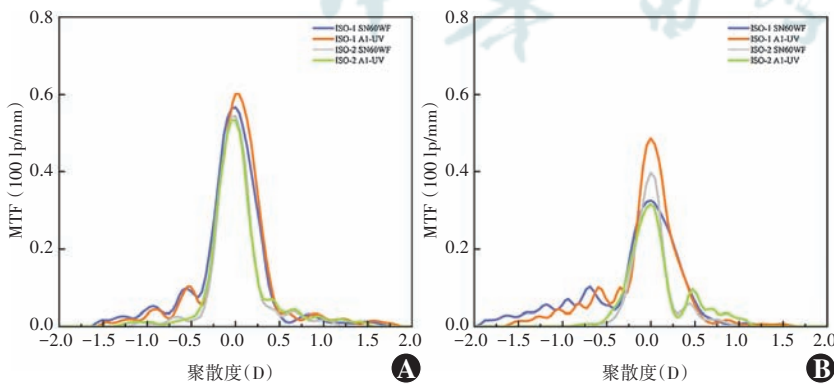


图6 不同孔径及角膜条件下SN60WF IOL和A1-UV IOL的离焦曲线 A:3.0 mm孔径 B:4.5 mm孔径 MTF:调制传递函数;ISO:国际标准化组织;ISO-1:模型角膜球差为0 μm;ISO-2:模型角膜球差为+0.28 μm

Figure 6 Through-focus curves of SN60WF IOL and A1-UV IOL under different apertures and corneal conditions A: At 3.0 mm aperture B: At 4.5 mm aperture MTF: modulation transfer function; ISO: International Organization for Standardization; ISO-1: model corneal spherical aberration of 0 μm; ISO-2: model corneal spherical aberration of +0.28 μm

量非常接近,而在 100 lp/mm 空间频率时 A1-UV 相较于 SN60WF 展现出更优越的细节分辨率;当考虑人眼角膜球差时,明视条件下 100 lp/mm 空间频率时 A1-UV 和 SN60WF 在居中位置展现出相似的光学特性,当发生相同程度的偏心或倾斜时,相比于 SN60WF, A1-UV 在各空间频率的 MTF 值下降较为缓慢。随着孔径的增大, IOL 偏心或倾斜对光学质量的影响更加显著。近期的一项研究比较了 AcrySof IQ Vivity IOL (美国 Alcon 公司)与其同平台单焦点 IOL(球差值均为 $-0.20 \mu\text{m}$) 在 $+0.135$ 、 $+0.290$ 和 $+0.540 \mu\text{m}$ 角膜球差下的光学质量和光晕,结果表明在 4.5 mm 孔径下,随着角膜球差的增加,景深延长型和单焦点 IOL MTF 曲线峰值均降低,诱导的光晕增大, IOL 光学质量下降,而在 3.0 mm 孔径下角膜球差的增加似乎未明显改变 IOL 的光学质量^[24],这与本研究结论相似。此外,本研究发现当 2 种 IOL 偏心 0.3 mm 或倾斜 3° 时,尽管 100 lp/mm 空间频率时的 MTF 值下降,但是 USAF 分辨率测试图均能保持清晰的成像质量。在 4.5 mm 孔径时,尽管 ISO-1 测量条件下 SN60WF 偏心 0.7 mm 以内和 ISO-2 测量条件下 A1-UV 倾斜 3° 以内,在 100 lp/mm 空间频率时的 MTF 值与居中位置相比变化较小,但其在 $0\sim 50$ lp/mm 空间频率的 MTF 值较居中位置却大幅度下降, USAF 分辨率测试图成像质量也发生衰减,这是因为 100 lp/mm 仅为空间频率的 1 个点并不能说明整体变化趋势,因此总体上 IOL 最佳远焦点的 MTF 曲线与 USAF 分辨率测试图的变化结果一致。

本研究结果显示,与 SN60WF 相比, A1-UV 在抗偏心 and 倾斜性能方面具有一定优势,这与曹广梁等^[25]的研究结果一致,推测这可能与 A1-UV 的高次非球面设计有关,其可以补偿角膜球差和各类非对称像差,从而改善 IOL 偏心或倾斜后的视觉质量。需要注意的是,相较于倾斜,偏心对 IOL 光学质量的下降影响更为显著。Lacort 等^[13]基于 Atchison 模型眼(角膜球差为 $+0.242 \mu\text{m}$)使用光学设计软件(OSLO 2022 EDU Edition 22.1,美国 Lambda Research 公司)评估不同球差 IOL 的光学性能,结果显示球差为 $-0.214 \mu\text{m}$ 的 IOL 发生倾斜对成像质量影响较偏心小且倾斜产生的离焦、散光和彗差较少受到 IOL 设计的影响。Borkenstein 等^[8]在比较不同球差设计的单焦点 IOL 的光学性能时也指出,当使用球差为 $+0.28 \mu\text{m}$ (ISO-2) 的人工角膜时,负球差单焦点 IOL 较球面单焦点 IOL 对偏心 and 倾斜更敏感,这取决于 IOL 的球差,与本研究结果基本一致。光学实验台可以根据研究目的设置不

同参数以消除可能混淆在体测量的受试者之间的变异性和生理变量。

本研究仍存在一定局限性:(1)本研究结果仅描述了 IOL 的体外光学性能,而不同的眼部条件和神经适应也会影响最终的成像质量;(2)本研究仅使用单色光研究了光学质量,未考虑纵向和横向色差的影响,也未考虑 Kappa 角引起的几何像差的影响,获得的数据适用于最佳聚焦条件,不一定反映 IOL 在一系列聚散度上的性能;(3)受限于 OptiSpheric IOL R&D 体外测试设备,仅能通过 MTF 值(定量指标)和 USAF 分辨率测试图(定性指标)来评价 3.0 mm 和 4.5 mm 孔径下 IOL 的光学性能,该设备目前尚无法测得 IOL 的点扩散函数,不能反映 IOL 在大孔径条件下产生的眩光。

目前,不同制造商设计的 IOL 具有各自的优点和局限性,角膜球差的改变会影响 IOL 的光学特性,这也为角膜屈光术后白内障超声乳化吸除联合 IOL 植入提供了一定参考。临床医生可综合考虑 IOL 体内和体外研究结果,为术后可能出现 IOL 偏心和倾斜的患者选择具有特殊设计抗偏心和倾斜能力的 IOL,以提升视觉质量。体外实验研究需考虑真实的人眼环境,不可忽略温度和角膜球差对 IOL 光学性能的影响,未来的研究可以呼吁制造商提供大于 6.0 mm 孔径的配套条件,并使用 OptiSpheric IOL R&D 的升级设备 OptiSpheric IOL Pro II 得到复色光条件下的点扩散函数、眩光状态下的 MTF 等相关数据亦或者通过连接 WaveMaster 波前像差测量仪,对 IOL 的点扩散函数和泽尼克系数进行测量,进一步评估大孔径下偏心和倾斜对 IOL 光学性能的影响,这将有助于预测 IOL 在真实人眼环境中的视觉质量。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 谢丽暄:参与选题与研究设计、数据采集、分析/解释数据、文章撰写;廖莹、谭青青:审阅和修改论文;兰长骏:研究设计、数据分析、论文修改、对文章知识性内容作批评性审阅及定稿;潘若琳、唐玉玲、秦苏云、王艳:参与选题与研究设计、资料分析和解释

参考文献

- [1] 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 [2023-08-12]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28863141>. DOI: 10.1371/journal.pone.0184066.
- [2] 兰长骏,廖莹.重视白内障患者视觉质量的评估[J].中华实验眼科杂志,2018,36(5):326-329. DOI:10.3760/ema.j.issn.2095-0160.2018.05.002.
Lan CJ, Liao X. Focus on the evaluation of visual quality in cataract patients[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2018, 36(5): 326-329. DOI: 10.3760/ema.j.issn.2095-0160.2018.05.002.
- [3] 兰长骏,唐玉玲,廖莹.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.
- [4] 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. DOI: 10. 3928/1081-597X-20021101-04.
- [5] Wang L, Dai E, Koch DD, et al. Optical aberrations of the human anterior cornea [J]. J Cataract Refract Surg, 2003, 29(8) : 1514-1521. DOI: 10. 1016/s0886-3350(03)00467-x.
- [6] de Sanctis U, Vinai L, Bartoli E, et al. Total spherical aberration of the cornea in patients with cataract [J]. Optom Vis Sci, 2014, 91(10) : 1251-1258. DOI: 10. 1097/OPX. 0000000000000380.
- [7] Tandogan T, Auffarth GU, Choi CY, et al. *In vitro* comparative optical bench analysis of a spherical and aspheric optic design of the same IOL model [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2017, 17(1) : 9 [2023-08-14]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28178942>. DOI: 10. 1186/s12886-017-0407-5.
- [8] 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.
- [9] Liao X, Li JY, Tan QQ, et al. Comparison of visual quality after implantation of A1-UV and SN60WF aspheric intraocular lens [J]. Int J Ophthalmol, 2020, 13(11) : 1727-1732. DOI: 10. 18240/ijo. 2020. 11. 07.
- [10] 钱玖林, 廖萱, 唐玉玲, 等. 非球面人工晶体偏心 and 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 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.
- [11] McKelvie J, McArdle B, McGhee C. The influence of tilt, decentration, and pupil size on the higher-order aberration profile of aspheric intraocular lenses [J]. Ophthalmology, 2011, 118(9) : 1724-1731. DOI: 10. 1016/j. ophtha. 2011. 02. 025.
- [12] Oltrup T, Bende T, Al-Mohamedi H, et al. Comparison of spherical and aspherical intraocular lenses with decentration and tilt error using a physical model of human contrast vision and an image quality metric [J]. Z Med Phys, 2021, 31(3) : 316-326. DOI: 10. 1016/j. zemedi. 2021. 01. 004.
- [13] Lacort M, Pérez-Gracia J, Ares J, et al. Optical quality variation of different intraocular lens designs in a model eye: lens placed correctly and in an upside-down position [J]. Ophthalmic Res, 2023, 66(1) : 757-766. DOI: 10. 1159/000528504.
- [14] Son HS, Tandogan T, Liebing S, et al. *In vitro* optical quality measurements of three intraocular lens models having identical platform [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2017, 17(1) : 108 [2023-08-19]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28662629>. DOI: 10. 1186/s12886-017-0460-0.
- [15] Pérez-Gracia J, Ares J, Ávila FJ, et al. Effect of decentration, tilt and rotation on the optical quality of various toric intraocular lens designs: a numerical and experimental study [J]. Biomed Opt Express, 2022, 13(4) : 1948-1967. DOI: 10. 1364/BOE. 447045.
- [16] International Organization for Standardization. Ophthalmic implants-Intraocular lenses-Part 2: Optical properties and test methods: ISO 11979-2 : 2014 [S/OL]. [2023-08-19]. <https://www.iso.org/standard/55682.html>.
- [17] International Organization for Standardization. Ophthalmic implants-Intraocular lenses-Part 7: clinical investigations of intraocular lenses for the correction of aphakia: ISO 11979-7 : 2024 [S/OL]. [2024-02-05]. <https://www.iso.org/standard/79689.html>.
- [18] Montés-Micó R, Ferrer-Blasco T, Cerviño A. Analysis of the possible benefits of aspheric intraocular lenses: review of the literature [J]. J Cataract Refract Surg, 2009, 35(1) : 172-181. DOI: 10. 1016/j. jers. 2008. 09. 017.
- [19] Carson D, Hill WE, Hong X, et al. Optical bench performance of AcrySof® IQ ReSTOR®, AT LISA® tri, and FineVision® intraocular lenses [J]. Clin Ophthalmol, 2014, 8 : 2105-2113. DOI: 10. 2147/OPTH. S66760.
- [20] Mainster MA, Turner PL. Blue-blocking IOLs decrease photoreception without providing significant photoprotection [J]. Surv Ophthalmol, 2010, 55(3) : 272-289. DOI: 10. 1016/j. survophthal. 2009. 07. 006.
- [21] Glickman RD. Phototoxicity to the retina: mechanisms of damage [J]. Int J Toxicol, 2002, 21(6) : 473-490. DOI: 10. 1080/10915810290169909.
- [22] Feng X, Xu K, Hao Y, et al. Impact of blue-light filtering intraocular lens implantation on the quality of sleep in patients after cataract surgery [J/OL]. Medicine (Baltimore), 2016, 95(51) : e5648 [2023-08-20]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28002333>. DOI: 10. 1097/MD. 0000000000005648.
- [23] Marie M, Bigot K, Angebault C, et al. Light action spectrum on oxidative stress and mitochondrial damage in A2E-loaded retinal pigment epithelium cells [J/OL]. Cell Death Dis, 2018, 9(3) : 287 [2023-08-20]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29459695>. DOI: 10. 1038/s41419-018-0331-5.
- [24] Madrid-Costa D, Fernández-Vega-Cueto L, Azor-Morón JA, et al. Beam-shaping extended depth of focus intraocular lens: optical assessment with corneas of increasing spherical aberration [J]. J Refract Surg, 2023, 39(2) : 95-102. DOI: 10. 3928/1081597X-20221215-02.
- [25] 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 GL, Liu XM, Fan Z, et al. Evaluation of optical performance of IOL *in vitro* by optical bench [J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2022, 24(12) : 894-901. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115909-20211118-00449.

(收稿日期:2023-10-09 修回日期:2024-02-08)

(本文编辑:张宇 骆世平)

读者·作者·编者

本刊对来稿中电子版图片的要求

自我刊开通网上投稿以来,作者均采用将 Word 文档从网上在线投稿的方式,但部分来稿中所包含的图片像素较低,这些图片便于网上审稿,并不能用于制版印刷。因为显示器与彩印纸品的色彩形成截然不同,显示器应用红、绿、蓝的三原色原理发射光线形成图像,这种色彩形成的原理被称为 RGB 模式;而彩色印刷品是蓝、红、黄、黑四色油墨印制在纸制品上来形成彩色图像,这种原理被称为 CMYK 模式。那些在显示器上看起来比较清晰但分辨率较低的图片在实际印刷时不能转换为高质量 CMYK 模式的图片。为了保证论文的刊出质量及本刊的印刷出版质量,如果作者的来稿中附有组织病理图、免疫荧光染色图、免疫组织化学图、细胞图,请作者将原图保存为 TIFF 格式或 JPG 格式,图片的分辨率至少 300 dpi。