

高阶像差及散射光对非球面 IOL 眼视网膜成像质量的影响

马瑶 马忠旭 高原 孙龙格

300020 天津医科大学眼科临床学院 天津市眼科医院 天津市眼科学与视觉科学重点实验室 天津市眼科研究所

通信作者:马忠旭, Email: mazhongxu@hotmail.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.03.013

【摘要】 **背景** 高阶像差和散射光可能会对白内障超声乳化摘出联合非球面 IOL 植入眼视网膜成像质量造成影响,但目前采用客观方法评估其影响的研究较少。**目的** 客观分析白内障超声乳化摘出联合非球面 IOL 植入术后的高阶像差及散射光对视网膜成像质量的影响,并探讨改善白内障术后视觉质量的方法。**方法** 采用系列病例观察研究方法,收集天津市眼科医院 2014 年 2—8 月行白内障超声乳化摘出联合非球面 IOL 植入术 3 个月的患者 53 例 67 眼,利用 i-Trace 波前像差仪测量术后 3 个月患者 4 mm 瞳孔下的全眼、角膜及晶状体的总像差、总高阶像差、球差、彗差、三叶草等主要高阶像差的均方根值(RMS),分析全眼像差与角膜像差、晶状体像差的相关性。用视觉质量分析系统 OQAS II 测量非球面 IOL 植入眼 4 mm 瞳孔下的客观散射指数(OSI)及客观视网膜成像质量指标,包括调制解调函数截止频率(MTF cut off)、斯特尔比值(SR)及 100%、20%、9% 对比度下的 OQAS 值,分析客观视网膜成像质量指标与全眼像差、角膜像差、晶状体像差及 OSI 的相关性;并分析 OSI 与全眼像差、角膜像差及晶状体像差的相关性。**结果** 全眼像差与角膜像差、晶状体像差均呈正相关($r=0.255 \sim 0.586$, 均 $P<0.05$; $r=0.582 \sim 0.907$, 均 $P<0.01$),全眼像差与晶状体像差的相关性更强。客观视网膜成像质量指标与全眼的总像差、总高阶像差及各主要高阶像差均呈负相关($r=-0.247 \sim -0.675$, 均 $P<0.05$);客观视网膜成像质量指标与角膜、晶状体的总像差、总高阶像差及部分主要高阶像差呈负相关($r=-0.245 \sim -0.497$, 均 $P<0.05$; $r=-0.246 \sim -0.513$, 均 $P<0.05$)。客观视网膜成像质量指标与 OSI 均呈负相关($r=-0.620 \sim -0.781$, 均 $P<0.01$);OSI 与全眼、角膜及晶状体的总像差、总高阶像差及部分主要高阶像差均呈正相关($r=0.396 \sim 0.727$, 均 $P<0.01$; $r=0.320 \sim 0.522$, 均 $P<0.05$; $r=0.319 \sim 0.598$, 均 $P<0.01$)。**结论** 非球面 IOL 植入眼的高阶像差及散射光可能是术眼客观视网膜成像质量下降的主要影响因素,晶状体高阶像差对全眼高阶像差的影响更大。

【关键词】 白内障;非球面人工晶状体;像差;散射光;视觉质量

Effect of high-order aberrations and scattered light on visual quality in pseudophakic eyes with aspheric monofocal IOLs Ma Yao, Ma Zhongxu, Gao Yuan, Sun Longge

Clinical College of Ophthalmology of Tianjin Medical University, Tianjin Eye Hospital, Tianjin Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science, Tianjin Eye Research Institute, Tianjin 300020, China

Corresponding author: Ma Zhongxu, Email: mazhongxu@hotmail.com

[Abstract] **Background** High order aberrations and scattered light may be the main influencing factors of visual quality after phacoemulsification combined the aspherical IOL implantation. However, the study on objectively assessing the impact of them is little. **Objective** This study was to assess the impact of high order aberrations and scattered light on visual quality after phacoemulsification combined the aspherical IOL implantation. **Methods** A series cases-observational study was performed. Sixty-seven eyes of 53 patients who finished phacoemulsification and aspherical IOL implantation for at least 3 months in Tianjin Eye Hospital from February to August 2014 were enrolled. The root mean square (RMS) of total aberrations and high order aberrations was measured under the 4 mm pupil diameter with i-Trace aberrometer, including general high order aberrations, spherical aberrations, coma, and trefoil of entire eye, cornea and internal optics. The correlations between ocular aberrations and corneal or internal optic aberrations were analyzed. Objective scatter index (OSI) and objective visual quality parameters were measured,

including MTF cut off frequency (MTF cut off), strehl ratio (SR) and OQAS values (100% OV, 20% OV, 9% OV) with OQAS II, and the correlations between the objective visual quality parameters and OSI, ocular aberrations, corneal aberrations or internal optic aberrations were analyzed. In addition, the correlations between OSI and ocular, corneal or internal optic aberrations were evaluated. Written informed consent was obtained from each patient before entering the study. **Results** Ocular aberrations were significantly positively correlated with corneal or internal optic aberrations ($r=0.255-0.586$, all at $P<0.05$; $r=0.582-0.907$, all at $P<0.01$), and the associations between internal optic and ocular aberrations was stronger than those between corneal and ocular aberrations. The objective visual quality parameters were negatively correlated with ocular, corneal and internal optic aberrations ($r=-0.247- -0.675$, all at $P<0.05$; $r=-0.245- -0.497$, all at $P<0.05$; $r=-0.246- -0.513$, all at $P<0.05$) as well as with OSI ($r=-0.620- -0.781$, all at $P<0.01$). Most of the associations between internal optic aberrations and objective visual quality parameters were stronger than those of corneal aberrations. Furthermore, ocular, corneal and optical aberrations were all positively correlated with OSI ($r=0.396-0.727$, all at $P<0.01$; $r=0.320-0.522$, all at $P<0.05$; $r=0.319-0.598$, all at $P<0.01$). **Conclusions** High order aberrations and scattered light seem to interact with objective visual quality in aspherical IOL implanted eyes, and the correlation between internal optic aberrations and ocular aberrations tends to be stronger than that of corneal aberrations.

[Key words] Cataract; Aspherical intraocular lens; Aberration; Scattered light; Visual quality

随着波前像差技术和光学技术的发展,人们对白内障患者术后视觉质量的改善有了更深刻的认识,但是对各高阶像差与视觉质量之间的关系认识还不够深入,临床上对于视觉质量的客观评价方法尚不够完善。引起 IOL 眼视网膜成像质量不良的主要因素有光散射、衍射和像差^[1],其中衍射受瞳孔大小的影响,但在正常直径的瞳孔下衍射的作用较小,像差和散射光成为引起视网膜影像模糊的主导因素。有研究者采用主观的方法分析高阶像差及散射光对 IOL 眼视网膜成像质量的影响,但此方法受到患者认知能力和耐受力的影响,因此客观定量分析高阶像差及散射光对 IOL 眼视网膜成像质量的影响尤为重要,但目前中国的相关研究较少。本研究中采用 i-Trace 波前像差仪分别检测白内障超声乳化摘出联合非球面 IOL 植入术后患者的全眼、角膜及晶状体的像差,并利用基于双通道技术的视觉质量分析系统 II (optical quality analysis system II, OQAS II) 定量测量 IOL 眼的散射光及客观视网膜成像质量指标,研究白内障术后非球面 IOL 眼像差及散射光对视网膜成像质量的影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

采用系列病例观察研究方法,于 2014 年 2—8 月在天津市眼科医院接受白内障超声乳化联合囊袋内植入负球差非球面 IOL 术后 3 个月以上的白内障患者 53 例 67 眼,其中男 30 例,女 23 例;年龄 46~70 岁,平均(61.67±8.27)岁。纳入标准:年龄相关性白内障患者,能按时随访者;角膜内皮细胞计数及形态正常,瞳孔对光反射灵敏,眼轴长度为 22~25 mm,术前晶状体

核硬度按 LOCS II 分级属于 II~III 级者。排除标准:术前散光 ≥ 1.50 D, 弱视或术后最佳矫正远视力 (best corrected distance visual acuity, BCDVA) < 0.1 LogMAR 者;有眼部外伤史、内眼手术史、高度近视、各种眼表疾病、青光眼或眼压 > 21 mmHg (1 mmHg = 0.133 kPa)、葡萄膜炎、玻璃体疾病、视网膜疾病或有病理性近视眼底改变者;视神经疾病、糖尿病、高血压、自身免疫性疾病者;术后中囊膜破裂、术后 IOL 明显倾斜或偏心、晶状体后囊膜过度纤维化者。术前对患者行视力、眼压、裂隙灯显微镜、检眼镜、角膜内皮等检查。根据 IOL-Master 仪器测量的眼轴长度及角膜曲率采用 SRK/T 公式计算 IOL 度数,术后目标屈光度为 0.00 ~ -0.50 D。本研究遵循赫尔辛基宣言,所有患者均自愿参加并签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 手术步骤 术眼术前 30 min 用复方托吡卡胺滴眼液点眼充分扩瞳,爱尔凯因滴眼液点眼行表面麻醉。在术眼 11:00 点位做约 3.2 mm 透明角膜切口,2:00 点位做 0.9 mm 侧切口,连续环形撕囊,直径约为 5.5 mm,水分离后 Infinity 超声乳化仪(美国 Alcon 公司)行白内障超声乳化摘出。灌注抽吸皮质,前后囊膜抛光,植入负球差非球面 Quatrix Aspheric IOL(奥地利 CROMA 公司)于囊袋内,吸除黏弹剂,切口水密封闭。所有手术均由同一位经验丰富的医师实施,手术过程顺利,未出现术中并发症。术后复方硫酸新霉素滴眼液点眼,每日 4 次,每周递减 1 次,4 周后停用;普拉洛芬滴眼液点眼每日 4 次,1 个月后停用。

1.2.2 术后一般观察指标 术后随访观察指标包括裸眼视力 (uncorrected visual acuity, UCVA)、BCDVA、

眼压及裂隙灯显微镜检查,并使用 Pentacam (德国 OCULUS 公司)评价 IOL 术后偏心、后囊膜混浊情况。

1.2.3 波前像差检测 复方托吡卡胺滴眼液点眼扩瞳至直径 4 mm 以上,在同一暗室环境下,采用光线追踪原理的 i-Trace 波前像差仪(美国 Tracey 公司)测量 4 mm 瞳孔下的全眼、角膜、晶状体的总像差、总高阶像差、彗差、球差、三叶草和次级散光等像差的均方根值 (root mean square, RMS)。患者瞬目后检查者迅速采集数据,以排除泪膜对眼像差的影响。图像选取标准: i-Trace 波前像差仪显示拒绝点较低,重复性好。测量重复 3 次,取其平均值。所有检查均由同一检查者在 12:00 ~ 15:00 进行。

1.2.4 客观视觉质量的测量 复方托吡卡胺滴眼液点眼扩瞳至直径 4 mm 以上,使用基于双通道原理的 OQAS II 视觉质量分析系统(西班牙 Visiometrics 公司)测量暗室 4 mm 瞳孔下全眼的客观散射指数 (objective scattering index, OSI)、调制解调函数截止频率 (modulation transfer function cut off frequency, MTF cut off)、斯特尔比值 (Strehl Ratio, SR)、100%、20%、9% 对比度下的 OQAS 值 (100% OV、20% OV、9% OV)。检查前输入患者的屈光度等信息,调整手柄。检查过程包括测定瞳孔直径,通过系统自身对球镜进行矫正以及通过在仪器外面增加柱镜来矫正散光,以达到最佳聚焦,然后根据系统捕捉的 6 次点扩散函数图像依次得到 OSI、MTF cut off、SR、100% OV、20% OV、9% OV 等。每眼至少测量 3 次,取其平均值。所有检查均由同一检查者在 14:00 ~ 15:00 进行。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 17.0 统计学软件(美国 SPSS 公司)进行统计分析。本研究中测量指标的数据资料经 Kolmogorov-Smirnov 检验接近正态分布,以 $\bar{x} \pm s$ 表示,满足正态分布的 2 个变量在数量上的相关性比较采用 Pearson 积矩相关分析。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 非球面 IOL 植入术后全眼像差与角膜像差、晶状体像差的关系

非球面 IOL 4 mm 瞳孔下的全眼、角膜和晶状体的总像差、总高阶像差、球差、彗差、三叶草、次级散光的 RMS 见表 1。非球面 IOL 的全眼像差、晶状体像差均小于角膜像差 ($F = 38.082 \sim 101.085$, 均 $P < 0.01$); 全眼像差与角膜像差、晶状体像差均呈正相关 ($r = 0.255 \sim 0.586$, 均 $P < 0.05$; $r = 0.581 \sim 0.907$, 均 $P < 0.01$), 但与晶状体像差的相关性更强(表 2)。

表 1 非球面 IOL 4 mm 瞳孔直径下全眼、角膜和晶状体像差各成分 RMS 比较 ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

	眼数	总像差	总高阶像差	球差	彗差	三叶草	次级散光
全眼	67	0.346±0.268	0.167±0.168	0.015±0.025	0.090±0.077	0.092±0.096	0.029±0.031
角膜	67	0.424±0.113	0.203±0.104	0.040±0.017	0.098±0.054	0.162±0.082	0.036±0.026
晶状体	67	-0.078±0.249	-0.023±0.196	-0.025±0.021	-0.008±0.063	-0.069±0.109	-0.007±0.032
F		99.984	38.082	78.900	54.681	101.085	42.503
P		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: IOL: 人工晶状体; RMS: 均方根值(单因素方差分析)

表 2 非球面 IOL 植入眼 4 mm 瞳孔直径下全眼、角膜和晶状体像差的相关系数 (r 值)

项目	总像差	总高阶像差	球差	彗差	三叶草	次级散光
全眼像差 vs 角膜像差	0.370 ^b	0.474 ^b	0.541 ^b	0.586 ^b	0.255 ^a	0.376 ^b
全眼像差 vs 晶状体像差	0.907 ^b	0.582 ^b	0.735 ^b	0.726 ^b	0.688 ^b	0.662 ^b

注: ^a $P < 0.05$; ^b $P < 0.01$ (Pearson 积矩线性相关分析) IOL: 人工晶状体

2.2 非球面 IOL 植入眼 OSI 与客观视网膜成像质量的关系

非球面 IOL 植入眼 OSI 为 1.499 ± 0.761 , MTF cut off 为 $(27.541 \pm 10.563) \text{ c/deg}$, SR 为 0.146 ± 0.039 , 100%、20% 和 9% OV 分别为 0.918 ± 0.354 、 0.620 ± 0.234 和 0.352 ± 0.120 。OSI 与 MTF cut off、SR 和 100%、20%、9% OV 均呈负相关 ($r = -0.781, P = 0.000$; $r = -0.620, P = 0.000$; $r = -0.770, P = 0.000$; $r = -0.727, P = 0.000$; $r = -0.655, P = 0.000$) (图 1 ~ 2)。

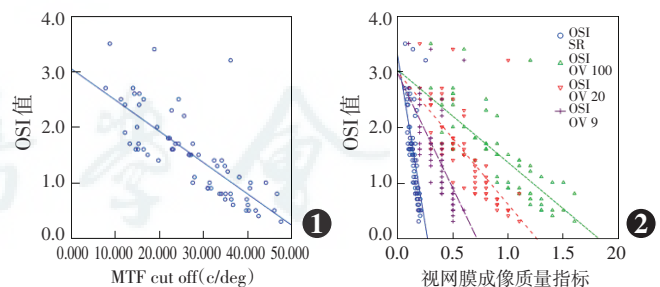


图 1 OSI 和 MTF cut off 关系的散点图 OSI 和 MTF cut off 呈明显负相关 ($r = -0.781, P = 0.000$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$)

图 2 OSI 与 SR 和 100%、20%、9% OV 关系的散点图 OSI 与 SR 和 100%、20%、9% OV 均呈明显负相关 ($r = -0.620, P = 0.000$; $r = -0.770, P = 0.000$; $r = -0.727, P = 0.000$; $r = -0.655, P = 0.000$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$) OSI: 客观散射指数; SR: 斯特尔比值; OV: OQAS 值

2.3 客观视网膜成像质量指标、OSI 与全眼像差、角膜像差、晶状体像差的相关性

非球面 IOL 植入眼 4 mm 瞳孔下的客观视网膜成像质量指标与全眼总像差、总高阶像差及各主要高阶

像差均呈明显负相关 ($r = -0.247 \sim -0.675$, 均 $P < 0.05$); 客观视网膜成像质量指标与角膜、晶状体的总像差、总高阶像差及部分主要高阶像差均呈负相关 ($r = -0.245 \sim -0.497$, 均 $P < 0.05$; $r = -0.246 \sim -0.513$, 均 $P < 0.05$) (表 3 ~ 5, 图 3 ~ 8)。OSI 与全眼、角膜及晶状体的总像差、总高阶像差及部分主要高阶像差均呈正相关 ($r = 0.396 \sim 0.727$, 均 $P < 0.01$; $r = 0.320 \sim 0.522$, 均 $P < 0.05$; $r = 0.319 \sim 0.598$, 均 $P < 0.01$) (表 3 ~ 5, 图 9 ~ 11)。

表 3 非球面 IOL 植入眼 4 mm 瞳孔全眼像差与 OSI 及客观视网膜成像质量指标间的相关性 (r 值)

指标	总像差	总高阶像差	球差	彗差	三叶草	次级散光
MTF cut off (c/deg)	-0.655 ^b	-0.457 ^b	-0.675 ^b	-0.489 ^b	-0.443 ^b	-0.258 ^a
SR	-0.551 ^b	-0.396 ^b	-0.583 ^b	-0.444 ^b	-0.444 ^b	-0.277 ^a
100% OV	-0.637 ^b	-0.449 ^b	-0.669 ^b	-0.496 ^b	-0.430 ^b	-0.247 ^a
20% OV	-0.623 ^b	-0.441 ^b	-0.632 ^b	-0.516 ^b	-0.454 ^b	-0.272 ^a
9% OV	-0.541 ^b	-0.394 ^b	-0.545 ^b	-0.414 ^b	-0.444 ^b	-0.266 ^a
OSI	0.724 ^b	0.552 ^b	0.727 ^b	0.556 ^b	0.396 ^b	0.160

注: ^a $P < 0.05$; ^b $P < 0.01$ (Pearson 积矩线性相关分析) OSI: 客观散射指数; MTF cut off: 调制解调函数截止频率; SR: 斯特尔比值; OV: OQAS 值

表 4 非球面 IOL 植入眼 4 mm 瞳孔下角膜像差与 OSI 及客观视网膜成像质量指标间的相关性 (r 值)

指标	总像差	总高阶像差	球差	彗差	三叶草	次级散光
MTF cut off (c/deg)	-0.421 ^b	-0.265 ^a	-0.497 ^b	-0.229	-0.135	-0.206
SR	-0.420 ^b	-0.275 ^a	-0.256 ^a	-0.276 ^a	-0.158	-0.194
100% OV	-0.426 ^b	-0.278 ^a	-0.497 ^b	-0.245 ^a	-0.129	-0.192
20% OV	-0.432 ^b	-0.256 ^a	-0.465 ^b	-0.255 ^a	-0.155	-0.238
9% OV	-0.387 ^b	-0.289 ^a	-0.303 ^a	-0.233	-0.192	-0.204
OSI	0.396 ^b	0.451 ^b	0.522 ^b	0.320 ^a	0.363 ^b	0.139

注: ^a $P < 0.05$; ^b $P < 0.01$ (Pearson 积矩线性相关分析) OSI: 客观散射指数; MTF cut off: 调制解调函数截止频率; SR: 斯特尔比值; OV: OQAS 值

表 5 非球面 IOL 植入眼 4 mm 瞳孔下晶状体像差与 OSI 及客观视网膜成像质量指标间的相关性 (r 值)

指标	总像差	总高阶像差	球差	彗差	三叶草	次级散光
MTF cut off (c/deg)	-0.513 ^b	-0.373 ^b	-0.390 ^b	-0.401 ^b	-0.288 ^a	-0.083
SR	-0.401 ^b	-0.371 ^b	-0.477 ^b	-0.306 ^a	-0.272 ^a	-0.110
100% OV	-0.491 ^b	-0.353 ^b	-0.382 ^b	-0.397 ^b	-0.281 ^a	-0.083
20% OV	-0.473 ^b	-0.390 ^b	-0.368 ^b	-0.410 ^b	-0.282 ^a	-0.070
9% OV	-0.406 ^b	-0.346 ^b	-0.395 ^b	-0.306 ^a	-0.246 ^a	-0.091
OSI	0.598 ^b	0.319 ^b	0.430 ^b	0.417 ^b	0.075	0.044

注: ^a $P < 0.05$; ^b $P < 0.01$ (Pearson 积矩线性相关分析) OSI: 客观散射指数; MTF cut off: 调制解调函数截止频率; SR: 斯特尔比值; OV: OQAS 值

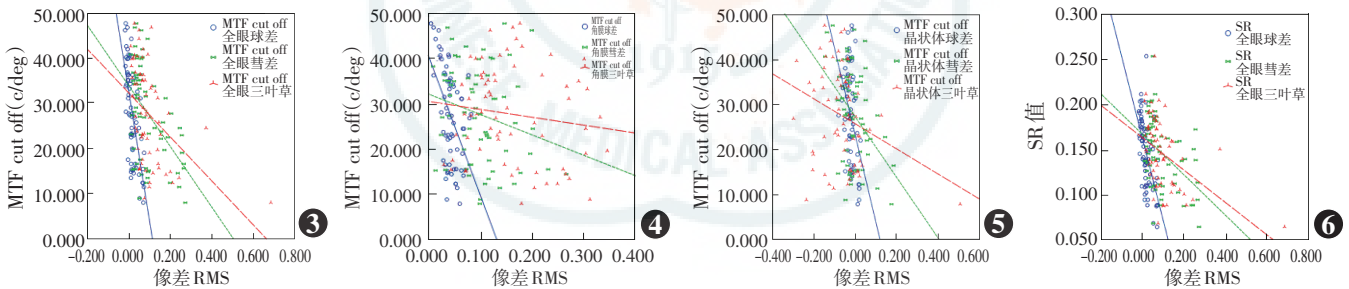


图 3 MTF cut off 与全眼球差、彗差、三叶草 RMS 关系的散点图 MTF cut off 与全眼球差、彗差、三叶草均呈明显负相关 ($r = -0.443 \sim -0.675$, 均 $P < 0.05$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$) MTF cut off: 调制解调函数截止频率; RMS: 均方根 **图 4 MTF cut off 与角膜球差、彗差、三叶草 RMS 的散点图 ($n = 67$)** MTF cut off 与角膜球差呈明显负相关 ($r = -0.497, P < 0.05$), MTF cut off 与角膜彗差、三叶草呈负相关趋势 ($r = -0.229, P = 0.062; r = -0.135, P = 0.278$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$) MTF cut off: 调制解调函数截止频率; OSI: 客观散射指数; RMS: 均方根值 **图 5 MTF cut off 与晶状体球差、彗差、三叶草 RMS 关系的散点图** MTF cut off 与晶状体球差、彗差、三叶草均呈明显负相关 ($r = -0.288 \sim -0.401$, 均 $P < 0.05$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$) MTF cut off: 调制解调函数截止频率; RMS: 均方根值 **图 6 SR 与全眼球差、彗差、三叶草 RMS 关系的散点图** SR 与全眼球差、彗差、三叶草均呈明显负相关 ($r = -0.444 \sim -0.583$, 均 $P < 0.05$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$) SR: 斯特尔比值; RMS: 均方根值

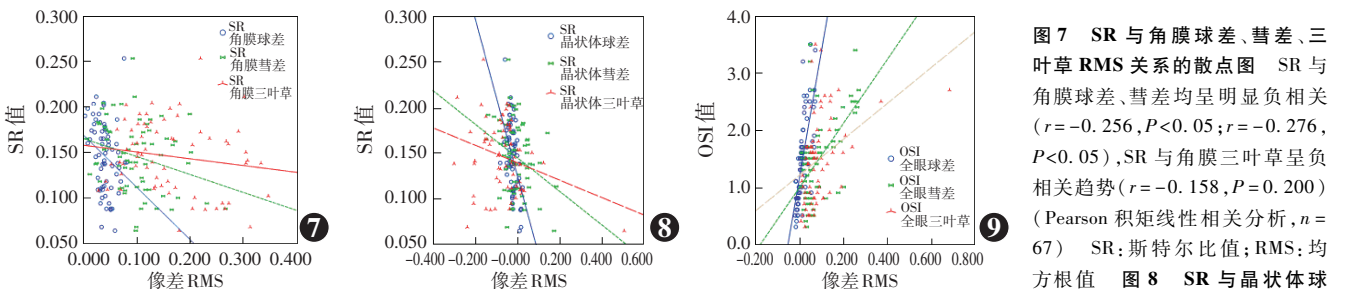


图 7 SR 与角膜球差、彗差、三叶草 RMS 关系的散点图 SR 与角膜球差、彗差均呈明显负相关 ($r = -0.256, P < 0.05; r = -0.276, P < 0.05$), SR 与角膜三叶草呈负相关趋势 ($r = -0.158, P = 0.200$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$) SR: 斯特尔比值; RMS: 均方根值 **图 8 SR 与晶状体球差、彗差、三叶草 RMS 关系的散点图** SR 与晶状体球差、彗差、三叶草均呈明显负相关 ($r = -0.272 \sim -0.477$, 均 $P < 0.05$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$) SR: 斯特尔比值; RMS: 均方根值 **图 9 OSI 与全眼球差、彗差、三叶草 RMS 关系的散点图** OSI 与全眼球差、彗差、三叶草均呈明显正相关 ($r = 0.396 \sim 0.727$, 均 $P < 0.05$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n = 67$) OSI: 客观散射指数; RMS: 均方根值

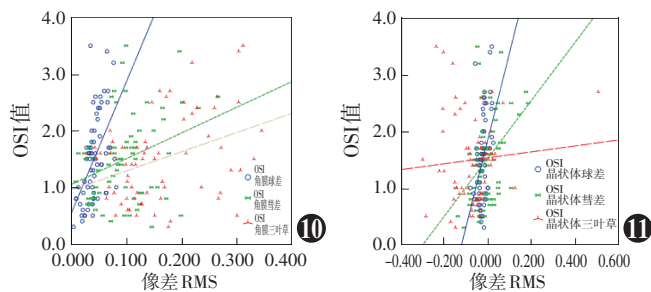


图 10 OSI 与角膜球差、彗差、三叶草 RMS 关系的散点图 OSI 与角膜球差、彗差、三叶草均呈明显正相关 ($r=0.320 \sim 0.522$, 均 $P < 0.05$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n=67$) OSI: 客观散射指数; RMS: 均方根值 图 11 OSI 与晶状体球差、彗差、三叶草 RMS 关系的散点图 OSI 与晶状体球差、彗差均呈明显正相关 ($r=0.430$, $P < 0.05$; $r=0.417$, $P < 0.05$), OSI 与晶状体的三叶草呈正相关 ($r=0.075$, $P=0.545$) (Pearson 积矩线性相关分析, $n=67$) OSI: 客观散射指数; RMS: 均方根值

3 讨论

人视网膜成像质量一直是眼科医师关注的焦点,其评价方法包括主观视觉质量和客观光学质量。主观视觉质量评价指标包括视力、对比敏感度水平、眩光失能、立体视觉等,客观光学质量评价指标包括 RMS、SR、光学传递函数 (optical transfer function, OTF) 等。对比敏感度测量简便,但易受主观因素的影响,且无法对线条的清晰程度作出定量评价,因此检查可靠性差。光学质量评价指标,通常用 OTF-MTF 表示,是客观的评价方法,能真实、全面、定量地反映人眼成像质量,在人视网膜成像质量的评估指标中占主导地位。临床上常采用基于波前像差原理的像差仪获得 MTF,主要是间接通过模拟的视网膜像推导而来,且忽略散射和衍射的影响,因而高估了视觉质量。MTF 也可由双通道成像技术进行评估,通过双通道直接采集点光源的视网膜成像而得到,综合考虑散射、衍射和像差的影响,因此结果更加客观、全面和准确,对于白内障、IOL 植入眼、角膜屈光手术后等眼散射较大者更精准^[2]。

本研究中采用双通道 OQAS II 测量,消除神经适应性和主观影响,并考虑了衍射、散射和像差的影响,能客观、全面地评价人视网膜成像质量,其指标主要包括 MTF cut off、SR、100% OV、20% OV 和 9% OV。MTF cut off 是人眼能分辨的最大空间频率,MTF cut off 越高,视觉系统探测微小细节的能力就越强,眼的视网膜成像质量也就越好^[3]。SR 指在同一瞳孔直径下有像差光学系统的点扩散函数的中心峰值与衍射受限光学系统(无像差)点扩散函数的中心峰值的比值,是视光学衡量视网膜成像质量的重要客观指标,一般为 0 ~ 1,比值越大,视网膜成像质量越好。客观对比度视力指保持对比度不变,测定能辨识的空间频率阈值,其比

测量 100% 对比度下的 Snellen 视力表能更灵敏、全面地反映视功能状态。OQAS 能测出 100% OV、20% OV、9% OV 3 种客观的对比度视力。

散射是指光线通过不均匀介质而偏离原来的传播方向并散开到各个方向的现象,若眼内散射光过大,则其成像质量较差。1998 年首次提出散射的概念,其包括眩光、光晕、暗点等症状,常规的视觉质量评价指标均不能反映散光状态^[4]。van Galen 等^[5]曾使用 C-Quant 散射光测量仪测量白内障术后 IOL 植入眼的散射光,发现术后 1 年的散射光比术后 6 周明显降低。但 C-Quant 是主观测量眼内散射光的仪器,需受试者配合,不能客观反映眼内散射的情况,且 van Galen 未进行散射光与视网膜成像质量关系的研究。本研究中测量眼内散射光使用的是双通道系统,避免了认知能力和主观的影响,并考虑了散射、衍射、像差的作用,通过 OSI 来评估眼内的散射情况。本研究还分析了眼内散射光与客观视网膜成像质量的关系,结果显示 OSI 与客观视网膜成像质量指标均呈负相关,即 IOL 眼内散射光的增加可能会降低 IOL 眼的视网膜成像质量。研究发现,白内障手术中撕囊口的位置和大小以及 IOL 的材质、设计、光学部直径等均是 IOL 眼散射光增加的影响因素^[6]。Kobayashi 等^[7]研究表明,双通道技术具有全面测量视网膜成像质量的功能,其综合考虑了像差及散射的影响。本研究中分析发现 OSI 与全眼、角膜及晶状体的总像差、总高阶像差及部分主要高阶像差呈正相关,可认为 OQAS 的 OSI 值同时受像差的影响,相比于角膜像差,OSI 主要受 IOL 像差的影响,其可能是像差对数据处理图像周围区域的光线强度有影响,进而改变 OSI 值,所以对 OSI 的解释应该包括眼像差对 OSI 的作用。

像差是另一个降低人视网膜成像质量的主要因素,人眼像差主要由角膜像差和内部像差(主要是晶状体像差)组成。Liang 等^[8]利用自适应光学技术矫正人眼的像差,使视网膜成像的衍射极限分辨率提高 2.7 倍,极大地改善了视网膜成像质量。Hayashi 等^[9]发现 IOL 眼的高阶像差主要是 IOL 的高阶像差,与全眼高阶像差的相关性很强,且与亮光、暗光下的对比敏感度相关,与本研究结果一致。本研究中,全眼总像差、总高阶像差及各主要高阶像差与角膜、晶状体的相应像差呈正相关,且与晶状体相应像差的相关性更强,可认为晶状体像差主要是 IOL 像差对非球面 IOL 眼的全眼像差的作用至关重要,非球面 IOL 也正是通过其零球差或负球差的设计达到降低全眼球差的目的。Jansonius 等^[10]研究表明,在个性化的白内障手术中,

每个单色像差均会影响模型眼的 MTF。Nochez 等^[11]研究发现,在非球面 IOL 眼的单色像差中,球差对视觉质量的影响较大,彗差、三叶草次之。Fernández-Sánchez 等^[12]评价孤立的三阶像差对视觉质量的影响,即在正常的瞳孔下,较大的彗差和三叶草值会降低对比敏感度。以上的研究均仅分析了全眼像差和视觉质量的关系,本研究中还分析了角膜和晶状体像差分别对客观视觉质量的影响,非球面 IOL 全眼的总像差、总高阶像差、彗差、球差、三叶草等与 MTF cut off、SR、100% OV、20% OV 和 9% OV 均呈负相关,说明术眼球差、彗差等主要高阶像差的变化可能会影响视网膜成像质量,术后高阶像差的改善(如相对个性化非球面 IOL 的使用)可以改善术眼的客观视网膜成像质量,也为从光学角度向患者解释术后的视觉质量情况提供了基础。本研究还分析了角膜、晶状体像差与 OQAS 客观视网膜成像质量的相关性,结果显示角膜和晶状体的总像差、总高阶像差及部分主要高阶像差均与 OQAS 客观视网膜成像质量指标呈负相关,且大部分晶状体像差比角膜像差与其相关性更强,可认为术后的角膜像差和晶状体像差分别会对术后的视网膜成像质量造成影响。白内障术后角膜像差的增加主要与手术切口有关,随着白内障超声乳化手术透明角膜切口大小的逐渐减小,术后角膜像差的变化越来越小,不会对患者的视觉质量造成太大影响。而术后晶状体像差变化主要由植入的 IOL 引起^[13-14],是导致术后全眼像差增大的主要因素,本研究中也得出类似结论,提示通过改善 IOL 的光学性能来改善白内障术后的客观视觉质量可能是提高患者术后客观视网膜成像质量的重要途径。由于人眼波前像差的个体差异,目前根据角膜球差设计的个体化非球面 IOL 的植入效果和可行性已经处于临床研究阶段^[15],本研究结果还发现彗差、三叶草等高阶像差及散射光也会对白内障术后的客观视网膜成像质量造成影响,在使用优化全眼球差的非球面 IOL 基础上,进一步优化彗差、三叶草等其余高阶像差和散射光,可能会使术后的视网膜成像质量更佳。至于为什么与客观视网膜成像质量相关的高阶像差主要是球差、彗差及三叶草,需对单一高阶像差的生理意义进行进一步研究。本研究样本量较小,仅分析了 4 mm 瞳孔直径下各高阶像差与客观视网膜成像质量的相关性,至于在不同瞳孔直径下各高阶像差对视网膜成像质量的影响情况是否有变化,尚有待进一步研究。

综上所述,白内障超声乳化摘出联合非球面 IOL 植入术后的散射光和高阶像差,可能是术后患者视网膜成像质量下降的主要原因。在使用零总眼球差的非

球面 IOL 的基础上进一步降低术眼的高散射光和彗差、三叶草等其余主要高阶像差,可能会获得更佳的术后视觉质量。在开发新的多焦点、可调节等高端 IOL 时,这些研究结果也可以作为参考。

参考文献

- [1] 汤欣. 正确认识像差和散射合理选择人工晶状体[J]. 中华眼科杂志, 2014, 50(2): 81-83. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0412-4081. 2014. 02. 001.
Tang X. Proper understanding of aberration and scatter light and reasonable selection of IOL[J]. Chin J Ophthalmol, 2014, 50(2): 81-83. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0412-4081. 2014. 02. 001.
- [2] Díaz-Doutón F, Benito A, Pujol J, et al. Comparison of the retinal image quality with a Hartmann-Shack wavefront sensor and a double-pass instrument[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2006, 47(4): 1710-1716. DOI: 10. 1167/iops. 05-1049.
- [3] Alió JL, Schimchak P, Montés-Micó R, et al. Retinal image quality after microincision intraocular lens implantation[J]. Cataract Refract Surg, 2005, 31(8): 1557-1560. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2005. 01. 026.
- [4] Davison JA. Positive and negative dysphotopsia in patients with acrylic intraocular lenses[J]. Cataract Refract Surg, 2000, 26(9): 1346-1355.
- [5] van Galen KW, Koopmans SA, Hooymans JM, et al. Straylight measurements in pseudophakic eyes with natural and dilated pupils: one-year follow-up[J]. Cataract Refract Surg, 2010, 36(6): 923-928. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2009. 12. 048.
- [6] 汤欣. 关注眼内散射光对人工晶状体眼视觉质量的影响[J]. 中华实验眼科杂志, 2013, 31(12): 1097-1099. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2013. 12. 001.
Tang X. Proper attention to the effect of intraocular straylight in pseudophakic eyes on visual quality[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2013, 31(12): 1097-1099. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2013. 12. 001.
- [7] Kobayashi K, Shibutani M, Takeuchi G, et al. Calculation of ocular single-pass modulation transfer function and retinal image simulation from measurements of the polarized double-pass ocular point spread function[J]. Biomed Opt, 2004, 9(1): 154-161. DOI: 10. 1117/1. 1627777.
- [8] Liang JZ, Williams DR. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 1997, 14(11): 2873-2883.
- [9] Hayashi K, Yoshida M, Hayashi H. Correlation of higher-order wavefront aberrations with visual function in pseudophakic eyes[J]. Eye (Lond), 2008, 22(12): 1476-1482. DOI: 10. 1038/sj. eye. 6702921.
- [10] Jansonius NM, Kooijman AC. The effect of spherical and other aberrations upon the modulation transfer of the defocused human eye[J]. Ophthalmic Physiol Opt, 1998, 18(6): 504-513.
- [11] Nochez Y, Majzoub S, Pisella PJ. Effect of residual ocular spherical aberration on objective and subjective quality of vision in pseudophakic eyes[J]. Cataract Refract Surg, 2011, 37(6): 1076-1081. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2010. 12. 056.
- [12] Fernández-Sánchez V, Ponce ME, Lara F, et al. Effect of 3rd-order aberrations on human vision[J]. Cataract Refract Surg, 2008, 34(8): 1339-1344. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2008. 04. 017.
- [13] Rawer R, Stork W, Spraul CW, et al. Imaging quality of intraocular lenses[J]. Cataract Refract Surg, 2005, 31(8): 1618-1631. DOI: 10. 1016/j. jcrs. 2005. 01. 033.
- [14] Norrby NES, Grossman LW, Geraghty EP, et al. Determining the imaging quality of intraocular lenses[J]. Cataract Refract Surg, 1998, 24(5): 703-714.
- [15] Holladay JT, Piers PA, Koranyi G, et al. A new intraocular lens design to reduce spherical aberration of pseudophakic eyes[J]. Refract Surg, 2002, 18(6): 683-691.

(收稿日期: 2016-01-25)

(本文编辑: 尹卫靖 杜娟)