

# 近视眼像差与人眼客观焦深的关联性分析

张明栋 王雁 赵新恒

天津医科大学眼科临床学院 天津市眼科医院 天津市眼科研究所 天津市眼科学与视觉科学重点实验室 南开大学附属眼科医院 南开大学眼科学研究院, 天津 300020

通信作者: 王雁, Email: wangyan7143@vip. sina. com

**【摘要】** 目的 探讨低、高阶像差与人眼客观焦深的关联性及其影响客观焦深的因素。方法 采用横断面研究, 选取 2022 年 2—4 月在天津市眼科医院屈光手术中心就诊的近视及散光患者 76 例 152 眼, 其中男 41 例, 女 35 例。采用 iTrace 视功能分析仪手动选择 3、4、5 和 6 mm 4 个扫描直径, 对患者的全眼低阶像差和高阶像差进行测量, 同时直接测得患者在该瞳孔直径下的客观焦深。采用 Spearman 秩相关性分析评估不同瞳孔直径下客观焦深与低、高阶像差之间的相关性; 对不同程度近视和散光人群及不同瞳孔直径、眼别、性别间的客观焦深进行比较。结果 客观焦深与总低阶像差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.380、0.317、0.385、0.519$ , 均  $P < 0.01$ )。客观焦深与离焦(近视度)在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.377、0.323、0.403、0.512$ , 均  $P < 0.01$ ), 与像散(散光度)仅在瞳孔直径为 6 mm 时呈正相关( $r_s = 0.255$ ,  $P < 0.05$ )。3、4、5、6 mm 瞳孔直径下不同近视程度组客观焦深总体比较差异均有统计学意义( $H = 6.440、7.370、9.990、16.930$ , 均  $P < 0.05$ ), 其中不同瞳孔直径下高度近视组客观焦深均明显高于低度近视组, 6 mm 瞳孔直径下高度近视组客观焦深高于中度近视组, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。客观焦深与总高阶像差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.911、0.807、0.733、0.677$ , 均  $P < 0.001$ )。在各项高阶像差中, 客观焦深与总彗差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.727、0.557、0.620、0.487$ , 均  $P < 0.001$ ); 与垂直彗差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.439、0.405、0.553、0.400$ , 均  $P < 0.001$ ); 与水平彗差在瞳孔直径为 5 mm 和 6 mm 时均呈正相关( $r_s = 0.308、0.308$ , 均  $P < 0.01$ ); 与三叶草像差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.344、0.443、0.316、0.330$ , 均  $P < 0.01$ ); 与球差在瞳孔直径为 4、5 和 6 mm 时均呈正相关( $r_s = 0.321、0.310、0.428$ , 均  $P < 0.01$ )。3 mm 与 4 mm、5 mm 与 6 mm 瞳孔直径下客观焦深比较, 差异均有统计学意义( $P = 0.011、0.004$ )。不同散光程度之间及不同性别、不同眼别之间客观焦深比较差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )。结论 人眼客观焦深大小主要与高阶像差中垂直彗差和三叶草像差以及低阶像差中离焦量具有较强关联性, 水平彗差和球差仅在瞳孔直径较大时与客观焦深相关性较强; 此外, 瞳孔直径较小(3 mm)或较大时(6 mm)明显影响客观焦深。

**【关键词】** 近视; 像差; 视觉质量; 客观焦深; 低阶像差; 高阶像差

**基金项目:** 国家重点研发计划(2022YFC2404502); 国家自然科学基金面上项目(82271118); 天津市科技计划(21JCZDJC01190); 天津市卫生健康科技项目(TJWJ2022XK036); 天津市医学重点学科(专科)建设项目(TJYXZDXK-016A)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20221123-00545

## Correlation analysis of myopia aberration and objective depth of focus in the human eye

Zhang Mingdong, Wang Yan, Zhao Xinheng

Clinical School of Ophthalmology, Tianjin Medical University, Tianjin Eye Hospital, Tianjin Eye Institute, Tianjin Key Laboratory of Ophthalmology and Vision Science, Affiliated Eye Hospital, Nankai University, Institute of Ophthalmology, Nankai University, Tianjin 300020, China

Corresponding author: Wang Yan, Email: wangyan7143@vip. sina. com

**[Abstract]** **Objective** To investigate the correlation between low-order and high-order aberrations and objective depth of focus in the human eye, and the factors that influence objective depth of focus. **Methods** A cross-sectional study was performed. Seventy-six patients (152 eyes) with myopia and astigmatism patients who were treated at the Refractive Surgery Center of Tianjin Eye Hospital from February to April 2022 were selected, including 41 males and 35 females. The patients' whole-eye low-order and high-order aberrations and objective depth of focus were measured at 3, 4, 5, and 6 mm manually selected pupil diameters using the iTrace visual function analyzer. The

correlation between objective depth of focus and low-order and high-order aberrations at different pupil diameters was analyzed by Spearman rank correlation analysis. Objective depth of focus was compared between individuals with different degrees of myopia and astigmatism, individuals with different pupil diameters, right and left eyes, and different sexes. This study adhered to the Declaration of Helsinki. The study protocol was approved by the Ethics Committee of Tianjin Eye Hospital (No. 2022039). **Results** Objective depth of focus was positively correlated with total low-order aberrations at 3, 4, 5, and 6 mm pupil diameter ( $r_s = 0.380, 0.317, 0.385, 0.519$ , all at  $P < 0.01$ ). Objective depth of focus was positively correlated with defocus at 3, 4, 5, and 6 mm pupil diameter ( $r_s = 0.377, 0.323, 0.403, 0.512$ , all at  $P < 0.01$ ), and with astigmatism at 6 mm pupil diameter ( $r_s = 0.255, P < 0.05$ ). There were statistically significant overall differences in objective depth of focus between groups with different degrees of myopia at 3, 4, 5, and 6 mm pupil diameter ( $H = 6.440, 7.370, 9.990, 16.930$ ; all at  $P < 0.05$ ). Among them, the objective depth of focus of high myopia was significantly higher than that of low myopia at different pupil diameters, and the objective depth of focus of high myopia was higher than that of moderate myopia at 6 mm pupil diameter, with statistically significant differences (all at  $P < 0.05$ ). Objective depth of focus was positively correlated with total high-order aberration at pupil diameters of 3, 4, 5, and 6 mm ( $r_s = 0.911, 0.807, 0.733, 0.677$ ; all at  $P < 0.001$ ). Among various high-order aberrations, objective depth of focus was positively correlated with total coma at 3, 4, 5, and 6 mm pupil diameter ( $r_s = 0.727, 0.557, 0.620, 0.487$ ; all at  $P < 0.001$ ), positively correlated with vertical coma at 3, 4, 5, and 6 mm pupil diameter ( $r_s = 0.439, 0.405, 0.553, 0.400$ ; all at  $P < 0.001$ ), positively correlated with horizontal coma at 5 and 6 mm pupil diameter ( $r_s = 0.308, 0.308$ ; both at  $P < 0.01$ ), positively correlated with trefoil aberration at 3, 4, 5, and 6 mm pupil diameter ( $r_s = 0.344, 0.443, 0.316, 0.330$ ; all at  $P < 0.01$ ), positively correlated with spherical aberration at 4, 5, and 6 mm pupil diameter ( $r_s = 0.321, 0.310, 0.428$ ; all at  $P < 0.01$ ). There was a significant difference in objective depth of focus between 3 and 4 mm, 5 and 6 mm pupil diameters ( $P = 0.011, 0.004$ ). There was no statistically significant difference in objective depth of focus between different degrees of astigmatism, between males and females, or between left and right eyes (all at  $P > 0.05$ ). **Conclusions** The objective depth of focus of the human eye is mainly strongly correlated with vertical coma, trefoil aberration in high-order aberrations, as well as defocus in low-order aberrations. Horizontal coma and spherical aberration are strongly correlated with objective depth of focus only when the pupil diameter is large. In addition, if the pupil diameter is too small (3 mm) or too large (6 mm), it has a significant effect on the objective depth of focus.

**[Key words]** Myopia; Aberration; Visual quality; Objective depth of focus; Low-aberration; High-aberration

**Fund program:** National Program on Key Research Project of China (2022YFC2404502); National Natural Science Foundation of China (82271118); Tianjin Science and Technology Project (21JCZDJC01190); Tianjin Health Research Project (TJWJ2022XK036); Tianjin Key Medical Discipline (Specialty) Construction Project (TJYXZDXK-016A)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20221123-00545

临床上往往通过视力、对比敏感度、点扩散函数、调制传递函数等指标来反映人眼的视觉质量以及成像质量<sup>[1-2]</sup>。近年来,各类眼科手术已从复明手术转到屈光手术,眼科医师对视觉质量以及成像质量的评价和研究越来越精细。焦深通常是指不影响视轴上的物体在视网膜上成像清晰度的像面可移动的最大范围<sup>[3-5]</sup>,直接影响视觉质量。目前,许多老视手术通过增加焦深来解决<sup>[6]</sup>,白内障手术中人工晶状体的设计以及屈光不正框架眼镜镜片的设计也涉及焦深问题<sup>[7-10]</sup>。但以往多通过计算得出人眼的主观焦深,关于人眼客观焦深的详细研究及其影响因素在国内外鲜见报道,且无法直接量化。本研究拟分析低、高阶像差对人眼客观焦深的影响,探讨客观焦深作为人眼视觉

质量及成像质量评价指标的可行性,为相关临床工作提供参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

采用横断面研究,选取 2022 年 2—4 月在天津市眼科医院屈光手术中心行术前检查的近视及散光患者 76 例 152 眼,其中男 41 例,女 35 例;年龄 18~40 岁,平均(24.41±5.21)岁;球镜度为-2.00~-8.00 D,平均(-4.41±1.50)D;柱镜度为 0.00~-2.75 D,平均(-0.81±0.64)D;等效球镜度(spherical equivalent, SE)为-2.13~-8.25 D,平均(-4.81±1.50)D。根据球镜度将受试者分为低度近视组(-0.50 D<球镜度≤

-3.00 D) 15 例、中度近视组 (-3.00 D < 球镜度 ≤ -6.00 D) 50 例和高度近视组 (球镜度 > -6.00 D) 11 例, 平均球镜度分别为 (-2.30 ± 0.27)、(-4.47 ± 0.71) 和 (-7.00 ± 0.52) D; 根据柱镜度将受试者分为无散光组 (柱镜度 ≤ -0.50 D) 37 例、低度散光组 (-0.50 D < 柱镜度 < -1.50 D) 26 例和高度散光组 (柱镜度 ≥ -1.50 D) 13 例, 平均柱镜度分别为 (-0.34 ± 0.17)、(-0.88 ± 0.18) 和 (-2.00 ± 0.38) D。纳入标准: (1) 球镜度 < -10.00 D, 柱镜度 < -3.00 D; (2) 术前最佳矫正视力 (best corrected visual acuity, BCVA) 均 ≥ 0.8; (3) 年龄 18 ~ 40 岁; (4) 角膜形态正常, 角膜透明且无云翳或斑翳; (5) 屈光度数稳定 2 年以上; (6) 软性角膜接触镜停戴 2 周以上, 硬性角膜接触镜停戴 4 周以上; (7) 眼压 < 21 mmHg (1 mmHg = 0.133 kPa)。排除标准: (1) 术前主客观验光结果不稳定, 多次测量结果不一致, 存在调节波动; (2) 患有眼部其他疾病, 如圆锥角膜或疑似圆锥角膜、角膜炎活动期、白内障、青光眼、视神经病变、眼底病变等; (3) 曾有眼部外伤史或手术史者; (4) 患有自身免疫性疾病或全身结缔组织疾病者; (5) 患有其他全身疾病、精神疾病或无法配合检查者。本研究遵循《赫尔辛基宣言》, 研究方案经天津市眼科医院伦理委员会审核批准 (批文号: 科研审查第 2022039 号)。

## 1.2 方法

**1.2.1 显然验光检查法测量球镜度、柱镜度及轴向** 由同一经验丰富的验光师通过显然验光检查法, 以受试者的电脑验光结果为基础, 采用综合验光仪及插片法对其进行主观验光, 记录受试者达到 BCVA 时对应的球镜度、柱镜度及轴向。

**1.2.2 iTrace 视觉功能分析系统测量全眼像差** 由同一经验丰富的检查者采用 iTrace 视觉功能分析系统 (6.1.0, 美国 Tracey 公司) 进行全眼像差测量。受检者于暗室环境中适应 5 min 后坐于设备前, 下颌完全前倾抵下颌杯, 前额靠在头枕上, 保持放松, 注视镜头里闪烁红点。检查者依次分别手动选择 3、4、5 和 6 mm 4 个扫描直径, 代表不同瞳孔大小, 通过移动操纵杆自动对焦进行拍摄, 对受试者全眼像差进行测量。每次扫描前嘱患者瞬目以排除泪膜对检查结果的影响, 每次扫描后嘱患者闭眼休息使其放松调节。结果采集标准: (1) 虹膜纹理清晰; (2) 屈光度与主观验光结果接近; (3) 拒绝点应为 0。测量后记录患者全眼低阶像差和高阶像差, 其中低阶像差包括总低阶像差、离焦 ( $Z_2^0$ )、像散 ( $Z_2^{-2}$  和  $Z_2^2$ ); 高阶像差包括总高阶像差、垂直彗差 ( $Z_3^{-1}$ )、水平彗差 ( $Z_3^1$ )、总彗差 ( $Z_3^{-1}$  和  $Z_3^1$ )、

总三叶草像差 ( $Z_3^{-3}$  和  $Z_3^3$ ) 和总球差 ( $Z_4^0$  和  $Z_6^0$ ), 以均方根计算。

**1.2.3 iTrace 视觉功能分析系统测量客观焦深** 客观焦深由 iTrace 视觉功能分析系统直接测得, 是所测得的患者基于光学传递函数的视觉斯特列尔比 (visual Strehl ratio based on the optical transfer function, VSOTF) 曲线图中峰值 50% 阈值水平的离焦范围, 其可靠性已在既往研究中得到证实<sup>[11-12]</sup>。VSOTF 不仅描述了人眼光学系统的成像能力, 同时考虑了视网膜及大脑对人眼成像感知处理的影响<sup>[5]</sup>, 是目前可以直接从波前像差数据中得到的视觉性能的最佳描述, 能够精确测量患者的客观视觉质量, 被定义为<sup>[13-15]</sup>:

$$VSOTF = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CSF_N(f_x, f_y) \cdot OTF(f_x, f_y) df_x df_y}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CSF_N(f_x, f_y) \cdot OTF_{DL}(f_x, f_y) df_x df_y}$$

其中,  $OTF(f_x, f_y)$  表示衍射受限的光学传递函数,  $CSF_N(f_x, f_y)$  是描述神经对比敏感度的实函数和正函数,  $(f_x, f_y)$  表示空间频率坐标。

## 1.3 统计学方法

采用 SPSS 26.0 统计学软件进行统计分析。除比较不同眼别客观焦深外, 其余参数均选取被检者右眼数据进行分析。计量资料数据经 Kolmogorov-Smirnov 检验证实符合正态分布者以  $\bar{x} \pm s$  表示, 不符合正态分布者以  $M(Q_1, Q_3)$  表示。采用 Spearman 秩相关性分析评估客观焦深与其他参数的相关性; 各组不同瞳孔直径下不同近视和散光程度间客观焦深及不同瞳孔直径之间客观焦深总体比较采用 Kruskal-Wallis  $H$  检验, 两两比较采用 Mann-Whitney  $U$  检验。不同瞳孔直径下不同眼别和不同性别的客观焦深比较采用 Mann-Whitney  $U$  检验。  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 低阶像差与客观焦深的关系

**2.1.1 各瞳孔直径下近视眼客观焦深与低阶像差的相关性** 客观焦深与总低阶像差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关 ( $r_s = 0.380, 0.317, 0.385, 0.519$ , 均  $P < 0.01$ )。客观焦深与离焦 (近视度) 在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关 ( $r_s = 0.377, 0.323, 0.403, 0.512$ , 均  $P < 0.01$ ), 与像散 (散光度) 仅在瞳孔直径为 6 mm 时呈正相关 ( $r_s = 0.255, P < 0.05$ ) (表 1)。

**2.1.2 各瞳孔直径下不同近视程度组客观焦深比较** 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下不同近视程度组客观焦深总体比较差异均有统计学意义 ( $H = 6.440, 7.370, 9.990, 16.930$ , 均  $P < 0.05$ ), 其中不同瞳孔直径下高度

近视组客观焦深均明显高于低度近视组,6 mm 瞳孔直径下高度近视组客观焦深高于中度近视组,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )(表 2)。

**2.1.3** 各瞳孔直径下不同散光程度组客观焦深比较 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下不同散光程度组客观焦深总体比较,差异均无统计学意义( $H = 2.049, 0.006, 2.122, 1.466$ , 均  $P > 0.05$ )(表 3)。

**2.2** 各瞳孔直径下近视眼客观焦深与高阶像差的相关性

客观焦深与总高阶像差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.911, 0.807, 0.733, 0.677$ , 均  $P < 0.001$ )。在各项高阶像差中,客观焦深与总彗差在 3、

4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.727, 0.557, 0.620, 0.487$ , 均  $P < 0.001$ ),其中与垂直彗差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.439, 0.405, 0.553, 0.400$ , 均  $P < 0.001$ );与水平彗差在瞳孔直径为 5 mm 和 6 mm 时呈正相关( $r_s = 0.308, 0.308$ , 均  $P < 0.01$ ),在瞳孔直径为 3 mm 和 4 mm 时均无明显相关性( $r_s = -0.022, 0.096$ , 均  $P > 0.05$ )。客观焦深与三叶草像差在 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下均呈正相关( $r_s = 0.344, 0.443, 0.316, 0.330$ , 均  $P < 0.01$ );与球差在瞳孔直径为 4、5 和 6 mm 时均呈正相关( $r_s = 0.321, 0.310, 0.428$ , 均  $P < 0.01$ ),在瞳孔直径为 3 mm 时无明显相关性( $r_s = 0.103, P > 0.05$ )(表 4)。

**表 1 不同瞳孔直径下客观焦深与低阶像差的相关性**  
**Table 1 Correlation between objective depth of focus and low-order aberrations at different pupil diameters**

像差	3 mm 瞳孔直径下客观焦深		4 mm 瞳孔直径下客观焦深		5 mm 瞳孔直径下客观焦深		6 mm 瞳孔直径下客观焦深	
	$r_s$ 值	$P$ 值	$r_s$ 值	$P$ 值	$r_s$ 值	$P$ 值	$r_s$ 值	$P$ 值
总低阶像差	0.380	0.001	0.317	0.005	0.385	0.001	0.519	<0.001
离焦	0.377	0.001	0.323	0.004	0.403	<0.001	0.512	<0.001
像散	0.180	0.120	0.136	0.241	0.102	0.380	0.255	0.026

注:(Spearman 秩相关性分析,  $n = 76$ )  
Note:(Spearman rank correlation analysis,  $n = 76$ )

**表 2 不同瞳孔直径下不同近视程度间客观焦深比较 [ $M(Q_1, Q_3), D$ ]**

**Table 2 Comparison of objective depth of focus among different degrees of myopia at different pupil diameters [ $M(Q_1, Q_3), D$ ]**

组别	眼数	不同瞳孔直径下客观焦深			
		3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
低度近视组	15	0.880(0.670, 0.930)	0.850(0.760, 1.110)	0.830(0.740, 1.170)	0.960(0.800, 1.160)
中度近视组	50	0.830(0.750, 1.053)	1.005(0.805, 1.290)	1.015(0.858, 1.395)	1.250(0.988, 1.580)
高度近视组	11	1.240(0.790, 1.350) <sup>a</sup>	1.330(1.000, 1.560) <sup>a</sup>	1.490(1.020, 1.760) <sup>a</sup>	1.880(1.630, 2.090) <sup>ab</sup>
$H$ 值		6.440	7.370	9.990	16.930
$P$ 值		0.040	0.030	0.010	<0.01

注:与低度近视组比较,<sup>a</sup> $P < 0.05$ ;与中度近视组比较,<sup>b</sup> $P < 0.05$ (Kruskal-Wallis  $H$  检验, Mann-Whitney  $U$  检验)  
Note:Compared with low myopia group, <sup>a</sup> $P < 0.05$ ; compared with moderate myopia group, <sup>b</sup> $P < 0.05$  (Kruskal-Wallis  $H$  test, Mann-Whitney  $U$  test)

**表 3 不同瞳孔直径下不同散光程度间客观焦深比较 [ $M(Q_1, Q_3), D$ ]**

**Table 3 Comparison of objective depth of focus among different degrees of astigmatism at different pupil diameters [ $M(Q_1, Q_3), D$ ]**

组别	眼数	不同瞳孔直径下客观焦深			
		3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
无散光组	37	0.810(0.745, 1.085)	1.010(0.800, 1.240)	1.040(0.850, 1.485)	1.160(0.915, 1.710)
低度散光组	26	0.875(0.798, 1.118)	0.985(0.805, 1.338)	1.100(0.860, 1.403)	1.385(1.045, 1.860)
高度散光组	13	0.790(0.705, 1.025)	0.980(0.800, 1.360)	0.870(0.735, 1.425)	1.420(0.970, 1.845)
$H$ 值		2.049	0.006	2.122	1.466
$P$ 值		0.359	0.997	0.346	0.480

注:(Kruskal-Wallis  $H$  检验)  
Note:(Kruskal-Wallis  $H$  test)

**表 4 不同瞳孔直径下客观焦深与高阶像差的相关性**  
**Table 4 Correlation between objective depth of focus and high-order aberrations at different pupil diameters**

像差	3 mm 瞳孔直径下客观焦深		4 mm 瞳孔直径下客观焦深		5 mm 瞳孔直径下客观焦深		6 mm 瞳孔直径下客观焦深	
	$r_s$ 值	$P$ 值	$r_s$ 值	$P$ 值	$r_s$ 值	$P$ 值	$r_s$ 值	$P$ 值
总高阶像差	0.911	<0.001	0.807	<0.001	0.733	<0.001	0.677	<0.001
总彗差	0.727	<0.001	0.557	<0.001	0.620	<0.001	0.487	<0.001
垂直彗差	0.439	<0.001	0.405	<0.001	0.553	<0.001	0.400	<0.001
水平彗差	-0.022	0.852	0.096	0.411	0.308	0.007	0.308	0.007
三叶草	0.344	0.002	0.443	<0.001	0.316	0.005	0.330	0.004
球差	0.103	0.378	0.321	0.005	0.310	0.006	0.428	<0.001

注:(Spearman 秩相关性分析,  $n=76$ )

Note:(Spearman rank correlation analysis,  $n=76$ )

### 2.3 其他因素对客观焦深的影响

#### 2.3.1 不同瞳孔直径间客观焦深的比较

3、4、5 和 6 mm 瞳孔直径下近视眼客观焦深分别为 0.865(0.750, 1.098)、1.005(0.810, 1.285)、1.015(0.813, 0.458) 和 1.290(0.963, 1.788) D, 客观焦深随着瞳孔直径的增加而增大, 总体比较差异有统计学意义 ( $H=35.960$ ,  $P<0.001$ ), 其中 3 mm 和 4 mm、5 mm 和 6 mm 瞳孔直径下客观焦深比较差异均有统计学意义 ( $P=0.011$ 、 $0.004$ ), 4 mm 和 5 mm 瞳孔直径下客观焦深比较差异无统计学意义 ( $P=0.399$ ) (图 1)。

2.3.2 各瞳孔直径下近视眼不同眼别客观焦深比较 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下不同眼别客观焦深总体比较, 差异均无统计学意义 ( $Z=-1.338$ 、 $-0.479$ 、 $-0.055$ 、 $-0.396$ , 均  $P>0.05$ ) (表 5)。

2.3.3 各瞳孔直径下不同性别间近视眼客观焦深比

较 3、4、5、6 mm 瞳孔直径下不同性别客观焦深总体比较, 差异均无统计学意义 ( $Z=-0.771$ 、 $-0.750$ 、 $-0.568$ 、 $-0.995$ , 均  $P>0.05$ ) (表 6)。

**表 5 不同瞳孔直径下不同眼别客观焦深比较 [ $M(Q_1, Q_3), D$ ]**  
**Table 5 Comparison of objective depth of focus between right and left eyes at different pupil diameters [ $M(Q_1, Q_3), D$ ]**

眼别	眼数	不同瞳孔直径下客观焦深			
		3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
右眼	76	0.865(0.750, 1.098)	1.005(0.810, 1.285)	1.015(0.813, 1.458)	1.290(0.963, 1.788)
左眼	76	0.920(0.750, 1.240)	0.975(0.813, 1.198)	1.105(0.810, 1.400)	1.295(0.935, 1.580)
Z 值		-1.338	-0.479	-0.055	-0.396
P 值		0.181	0.632	0.956	0.692

注:(Mann-Whitney  $U$  检验)

Note:(Mann-Whitney  $U$  test)

**表 6 不同瞳孔直径下不同性别客观焦深比较 [ $M(Q_1, Q_3), D$ ]**  
**Table 6 Comparison of objective depth of focus between males and females at different pupil diameters [ $M(Q_1, Q_3), D$ ]**

性别	例数	不同瞳孔直径下客观焦深			
		3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
男	41	0.860(0.775, 0.995)	1.030(0.810, 1.260)	1.100(0.875, 1.470)	1.350(0.995, 1.795)
女	35	0.880(0.740, 1.170)	0.930(0.810, 1.170)	0.990(0.800, 1.450)	1.160(0.900, 1.780)
Z 值		-0.771	-0.750	-0.568	-0.995
P 值		0.440	0.453	0.570	0.320

注:(Mann-Whitney  $U$  检验)

Note:(Mann-Whitney  $U$  test)

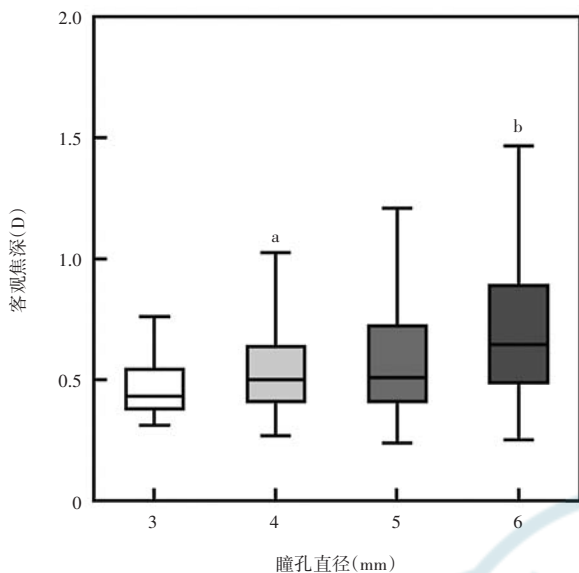


图1 不同瞳孔直径之间客观焦深比较  $H = 35.960, P < 0.001$ . 与 3 mm 瞳孔直径比较,  $^a P < 0.05$ ; 与 5 mm 瞳孔直径比较,  $^b P < 0.05$  (Kruskal-Wallis  $H$  检验, Mann-Whitney  $U$  检验;  $n = 76$ )

Figure 1 Comparison of objective depth of focus among different pupil diameters  $H = 35.960, P < 0.001$ . Compared with 3 mm pupil diameter,  $^a P < 0.05$ ; compared with 5 mm pupil diameter,  $^b P < 0.05$  (Kruskal-Wallis  $H$  test, Mann-Whitney  $U$  test;  $n = 76$ )

### 3 讨论

焦深作为视觉科学中的一个重要概念,已逐渐应用于临床许多方面,如白内障手术中人工晶状体的设计、屈光不正框架眼镜的设计以及老视的矫正等<sup>[6-10]</sup>。以往的研究多为人眼主观焦深,且无法直接量化。本研究在对人眼进行像差测量的同时直接量化人眼的客观焦深,就低、高阶像差对客观焦深的具体影响进行分析,并探讨瞳孔直径、近视程度和性别等对客观焦深的影响。结果显示,高阶像差对客观焦深影响较大,主要受垂直彗差影响,当瞳孔直径较大时也受球差的影响;同时客观焦深也受低阶像差的影响,其中主要受离焦影响。此外,本研究还发现焦深随着瞳孔直径的增加而变大,低度近视人群和高度近视人群的客观焦深存在明显差异。

本研究发现,在所有高阶像差中,总彗差对客观焦深的影响最大,在各瞳孔直径下均与客观焦深呈正相关。其中,垂直彗差与客观焦深的相关性较强,而水平彗差仅在瞳孔直径为 5 mm 和 6 mm 时与客观焦深相关。同时,三叶草像差在各瞳孔直径下也与客观焦深呈正相关。当瞳孔直径达到 4 mm 时,球差也对客观焦深产生影响,且当瞳孔直径达到 6 mm 时,球差与客观焦深的相关性高于垂直彗差和三叶草像差。可见当瞳孔变大时,球差对人眼客观焦深的影响十分重要。

既往研究中往往强调引入球差对人眼焦深的影响,极少涉及彗差<sup>[16-20]</sup>。但根据本研究结果,只有当瞳孔直径达到一定程度时,球差才会对人眼客观焦深产生影响,这可能是由于此时瞳孔变大暴露了更多球差的缘故,而彗差始终是高阶像差中人眼客观焦深的主要影响因素。

除高阶像差外,客观焦深也受低阶像差的影响,其中客观焦深与离焦在各瞳孔直径下均呈正相关。根据低阶像差对客观焦深的影响进一步分析,发现低度近视眼与高度近视眼的客观焦深差异有统计学意义,而不同散光程度人群之间的客观焦深无明显差异,即离焦量越大、近视程度越高,其客观焦深越大。不足的是,本研究纳入中度近视的受试者人数较多,近视程度分组人数差异较大。对于客观焦深较大的人群,物体经过屈光系统在视网膜上成像清晰度的像面可移动的最大范围更大。近视患者的调节滞后量往往高于正视人群,在同样的调节需求下动用更少的调节<sup>[21]</sup>。近视程度高的患者可能会因其较大的客观焦深导致调节滞后,因为其能够清晰成像的范围更大,所以可以动用更少的调节就能达到自身能接受的成像清晰度。当然,也有可能是近视患者因调节滞后量大导致了其拥有较大的客观焦深,二者之间的关系仍需进一步研究。众所周知,屈光手术是对低阶像差进行矫正,但在矫正低阶像差的同时会导致高阶像差的增加,而两者都会对人眼客观焦深的大小产生影响,因此如何设计切削度数使患者术后拥有最佳的视觉质量还需要进一步研究,或许可以参考人眼的客观焦深来实现。此外,我们在临床中发现个别飞秒激光小切口透镜取出术后存在少量屈光度的患者会抱怨视物不清,可能是因为该部分人群的客观焦深较小,这要求我们对于此类拟行屈光手术的患者要个性化设计,对其进行精准矫正。

本研究还发现,客观焦深随着瞳孔直径的等量增加呈现非等量增加趋势,这一发现与以往的认知不同。过去,物理光学认为瞳孔的增大会减小焦深<sup>[3-4,11]</sup>,然而本研究结果显示人眼的客观焦深随瞳孔直径的增加而变大,尤其是较小的瞳孔直径(3 mm)和较大的瞳孔直径(6 mm)间的客观焦深差异较大,或许提示我们明视觉或暗视觉对人眼的客观焦深也会产生影响,这仍需进一步研究。而 Wang 等<sup>[22]</sup>在对瞳孔与高阶像差关系的研究中发现,不同的高阶像差随着瞳孔的等量增加表现出不同的增加趋势,且彗差与其他高阶像差相比始终较大,这或许能够说明为什么在各瞳孔直径下彗差与客观焦深的相关性均高于其他像差。同时,客观焦深受总高阶像差影响较大,因此客观焦深与瞳

孔大小之间的关系可能是通过总高阶像差随瞳孔大小的变化所致。

综上所述,人眼的客观焦深受总高阶像差、总低阶像差的影响,其中高阶像差中垂直彗差对客观焦深的影响最大,球差在瞳孔直径达到 4 mm 以上时会对客观焦深产生影响;低阶像差中离焦是客观焦深的主要影响因素,近视程度高,客观焦深大。同时,瞳孔的变大也会使客观焦深增大。这提示我们在进行人工晶状体植入、老视矫正以及镜片设计时应针对不同患者采取个性化方案,如在白内障领域,可根据患者的客观焦深以及像差值进行设计,帮助患者获得更大焦深的人工晶状体,使其能够兼顾看远与看近;在屈光不正矫正手术领域,对屈光度的改变可能会影响焦深,焦深的改变也可能对成像质量有所影响。因此,临床上需要综合客观焦深的评估,结合患者主观感受,进行个性化手术设计,使患者获得满意的视觉质量。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在任何利益冲突

**作者贡献声明** 张明栋:参与选题、酝酿和设计试验、实施研究、采集数据、分析/解释数据、起草文章;王雁:参与选题、解释数据、对文章知识性内容的审阅和智力性内容的修改及定稿;赵新恒:参与选题、酝酿和设计试验、分析/解释数据、起草文章

## 参考文献

- [1] 中华医学会眼科学分会眼视光学组,中国医师协会眼科医师分会眼视光专业委员会.屈光手术视觉质量评价的专家共识[J].中华眼视光学与视觉科学杂志,2019,21(8):561-568. DOI:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2019.03.001.
- [2] 徐路路,王雁,吴雅楠,等.近视眼飞秒激光小切口基质透镜取出术后角膜光学质量的客观评估[J].中华实验眼科杂志,2017,35(2):139-145. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.02.010.
- [3] Xu LL, Wang Y, Wu YN, et al. Assessment of corneal optical quality following small incision lenticule extraction for myopia[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2017, 35(2): 139-145. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.02.010.
- [4] Atchison DA, Charman WN, Woods RL. Subjective depth-of-focus of the eye[J]. Optom Vis Sci, 1997, 74(7): 511-520. DOI: 10.1097/00006324-199707000-00019.
- [5] Wang B, Ciuffreda KJ. Depth-of-focus of the human eye: theory and clinical implications[J]. Surv Ophthalmol, 2006, 51(1): 75-85. DOI: 10.1016/j.survophthal.2005.11.003.
- [6] 王雁,赵堪兴,汤欣,等.波前像差与临床视觉矫正[M].北京:人民卫生出版社,2011:65-67.
- [7] Wang Y, Zhao KX, Tang X, et al. Wavefront aberration and clinical vision correction [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2011: 65-67.
- [8] Leray B, Cassagne M, Soler V, et al. Relationship between induced spherical aberration and depth of focus after hyperopic LASIK in presbyopic patients [J]. Ophthalmology, 2015, 122(2): 233-243. DOI: 10.1016/j.ophtha.2014.08.021.
- [9] Rampat R, Gatineau D. Multifocal and extended depth-of-focus intraocular lenses in 2020 [J/OL]. Ophthalmology, 2021, 128(11): e164-e185 [2023-10-10]. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32980397/. DOI: 10.1016/j.ophtha.2020.09.026.
- [10] Kohonen T, Suryakumar R. Extended depth-of-focus technology in intraocular lenses[J]. J Cataract Refract Surg, 2020, 46(2): 298-304. DOI: 10.1097/j.jcrs.000000000000109.
- [11] Pilger D, Homburg D, Brockmann T, et al. Clinical outcome and higher order aberrations after bilateral implantation of an extended depth of focus intraocular lens[J]. Eur J Ophthalmol, 2018, 28(4): 425-432. DOI: 10.1177/1120672118766809.
- [12] Vázquez-Villa A, Delgado-Atencio JA, Vázquez-Montiel S, et al. Aspheric lens to increase the depth of focus [J]. Opt Lett, 2015, 40(12): 2842-2845. DOI: 10.1364/OL.40.002842.
- [13] Legge GE, Mullen KT, Woo GC, et al. Tolerance to visual defocus[J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(5): 851-863. DOI: 10.1364/josaa.4.000851.
- [14] 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.
- [15] Thibos LN, Hong X, Bradley A, et al. Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations[J]. J Vis, 2004, 4(4): 329-351. DOI: 10.1167/4.4.9.
- [16] Iskander DR. Computational aspects of the visual Strehl ratio [J]. Optom Vis Sci, 2006, 83(1): 57-59. DOI: 10.1097/01.opx.0000195563.82891.3b.
- [17] Hipsley A, Hall B, Rocha KM. Long-term visual outcomes of laser anterior ciliary excision [J]. Am J Ophthalmol Case Rep, 2018, 10: 38-47. DOI: 10.1016/j.ajoc.2018.01.033.
- [18] Benard Y, Lopez-Gil N, Legras R. Subjective depth of field in presence of 4th-order and 6th-order Zernike spherical aberration using adaptive optics technology [J]. J Cataract Refract Surg, 2010, 36(12): 2129-2138. DOI: 10.1016/j.jcrs.2010.07.022.
- [19] Fernández J, Rodríguez-Vallejo M, Burguera N, et al. Spherical aberration for expanding depth of focus [J]. J Cataract Refract Surg, 2021, 47(12): 1587-1595. DOI: 10.1097/j.jcrs.0000000000000713.
- [20] Rocha KM, Soriano ES, Chamon W, et al. Spherical aberration and depth of focus in eyes implanted with aspheric and spherical intraocular lenses: a prospective randomized study [J]. Ophthalmology, 2007, 114(11): 2050-2054. DOI: 10.1016/j.ophtha.2007.01.024.
- [21] Rocha KM, Vabre L, Chateau N, et al. Expanding depth of focus by modifying higher-order aberrations induced by an adaptive optics visual simulator [J]. J Cataract Refract Surg, 2009, 35(11): 1885-1892. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.05.059.
- [22] Legras R, Benard Y, Lopez-Gil N. Effect of coma and spherical aberration on depth-of-focus measured using adaptive optics and computationally blurred images [J]. J Cataract Refract Surg, 2012, 38(3): 458-469. DOI: 10.1016/j.jcrs.2011.10.032.
- [23] 邸保忠.青少年近视眼与 AC/A 率关系的研究[J].眼视光学杂志,2000,2(1):38-39. DOI:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2000.01.011.
- [24] Di BZ. A study on AC/A ratio in juvenile myopes [J]. Chin J Optom Ophthalmol, 2000, 2(1): 38-39. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2000.01.011.
- [25] Wang Y, Zhao K, Jin Y, et al. Changes of higher order aberration with various pupil sizes in the myopic eye [J]. J Refract Surg, 2003, 19(2 Suppl): S270-274. DOI: 10.3928/1081-597X-20030302-21.

(收稿日期:2023-10-20 修回日期:2024-02-27)

(本文编辑:刘艳 施晓萌)