

不同球差非球面人工晶状体个体化选择的研究进展

曾国燕,张远平,李静华,杨燕妮,周丽琼,张为佳

基金项目: 云南省应用基础研究面上项目(No. 2014FZ030)
作者单位: (650101) 中国云南省昆明市,昆明医科大学第二附属医院眼科
作者简介: 曾国燕,昆明医科大学在读硕士研究生,研究方向:白内障。
通讯作者: 张远平,毕业于昆明医科大学,教授,硕士研究生导师,主任医师,科主任,研究方向:白内障。zhyp5125@163.com
收稿日期: 2016-09-04 **修回日期:** 2016-12-05

Research advance of individual choice for different spherical aberration aspheric intraocular lens

Guo-Yan Zeng, Yuan-Ping Zhang, Jing-Hua Li, Yan-Ni Yang, Li-Qiong Zhou, Wei-Jia Zhang

Foundation item: Project on Applied Basic Research in Yunnan Province(No. 2014FZ030)

Department of Ophthalmology, the Second Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming 650101, Yunnan Province, China

Correspondence to: Yuan - Ping Zhang. Department of Ophthalmology, the Second Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming 650101, Yunnan Province, China. zhyp5125@163.com

Received:2016-09-04 Accepted:2016-12-05

Abstract

• As the continuous improvement and development of cataract surgery technology and intraocular lens (IOL), patients with postoperative visual quality requirements are no longer confined to "see", but is durable and comfortable to "see". Aberration is the important factors affecting postoperative visual quality. It includes low-order aberrations and higher-order aberrations. Low-order aberration can be corrected easily, but high-order aberration is more difficult to correct, and the higher order, the more difficulty to correct. Studies have showed that high order aberrations increase with age not only including spherical aberration, but also coma. But the change is far less than the spherical aberration, and other higher-order aberrations are close to zero. So spherical aberration becomes key area of high-order aberration attention and research in ophthalmology. Conventional spherical IOL has positive spherical aberration. It can not correct positive corneal spherical aberration of human eyes. In order to correct the positive corneal spherical aberration, the aspheric IOLs which design with zero or negative spherical aberration have been produced, studies have shown that it can obtain better postoperative

visual quality than traditional spherical IOL, but how to comprehensively evaluate different spherical aberration aspheric IOL eye vision quality and how to choose it individually are the problems need to solve right now. For the best corrected spherical aberration of IOL eyes is uncertain, studies found that the amount of positive spherical aberration general approach to obtain a better visual quality, and can increase the depth of focus, which can increase far and near vision. In this paper, we will summarize the research progress on individual choice of aspheric IOL, to provide clinical basis about how to choose it individually for clinicians.

• **KEYWORDS:** intraocular lens; aspheric intraocular lens; spherical aberration; best corrected spherical aberration

Citation: Zeng GY, Zhang YP, Li JH, *et al.* Research advance of individual choice for different spherical aberration aspheric intraocular lens. *Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci)* 2017;17(1):62-65

摘要

随着白内障手术技术及人工晶状体(intraocular lens, IOL)的不断改良和发展。患者对术后的视觉质量要求不再局限于“看得见”,而是能持久舒适地“看清楚”。像差是影响术后视觉质量的重要影响因素。分为低阶像差及高阶像差,低阶像差易矫正,高阶像差则较难矫正,且阶数增高,矫正难度增加。研究发现,高阶像差中随着年龄增长而增加的除了球差,还包括彗差,但其变化远小于球差,其他的高阶像差大多接近于零,所以球差成为眼科领域重点关注和研究的高阶像差。传统的球面 IOL 具有正球差,无法矫正人眼通常存在的角膜正性球差;旨在矫正角膜正球差,设计有零或负球差等不同球差值的非球面 IOL 问世,研究证明,较传统球面 IOL 能获得更好的术后视觉质量,但如何全面衡量不同球差非球面 IOL 眼的视觉质量,怎样个体化选择是目前需要解决的问题。对于 IOL 眼的最佳矫正球差(此球差可获得最佳视觉质量)尚无定论。本文对非球面 IOL 的个体化选择研究进展进行综述,为临床医师个体化选择非球面 IOL 提供临床依据。

关键词: 人工晶状体;非球面人工晶状体;球面像差;最佳矫正球差

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2017.1.15

引用: 曾国燕,张远平,李静华,等. 不同球差非球面人工晶状体个体化选择的研究进展. 国际眼科杂志 2017;17(1):62-65

0 引言

白内障手术已由复明时代进入屈光时代,术后的视觉质量成为研究热点,像差是影响术后视功能的重要因素。人眼中分布着 83%~95% 低阶像差及 5%~17% 高阶像差。低阶像差即离焦(包括近视、远视)和规则散光,依靠

IOL 屈光度数的准确性可矫正近视和远视, Toric 晶状体也能很好地矫正角膜引起的规则散光。高阶像差包括彗差、球差、三叶草差等, 其中唯一具有旋转对称性的球差是主要影响因素, 可利用同样具有旋转对称性的 IOL 矫正, 单纯矫正球差后, 可提高视网膜对比度 12 倍^[1]。不同厂家的非球面 IOL, 球差、材料和结构设计等均不同, 因每款非球面 IOL 只有一个固定的球差值, 但正常人群的角膜球差值各异, 所以, 任何一款非球面 IOL 都无法满足整个人群。研究表明, 术前利用波前像差技术测定角膜球差, 指导个性化选择非球面 IOL, 使术后总球差趋于预期值, 可获得较好的视觉质量^[2]。但最佳矫正球差的研究目前尚无定论, 如何全面、合理地进行个性化选择 IOL 是眼科医师亟需解决的问题。本文对个性化选择非球面 IOL 的研究进展进行综述, 为指导个性化选择非球面 IOL 提供临床依据。

1 波前像差技术的发展

波前像差是实际测量光学波阵面与理想光学系统参考波阵面之间的偏差, 是一项动态评价人眼光学系统成像质量的重要指标, 分为低阶像差及高阶像差, 低阶像差包括一阶: 倾斜, 二阶: 离焦和散光; 三阶及其以上为高阶像差, 包括球差、彗差、像散、像场弯曲和畸变, 主要影响视觉质量的是球差及彗差, 其中球差是关键因素^[3]。矫正低阶像差的方法较简单, 矫正高阶像差则较难, 并且阶数增高, 矫正难度增大。Liang 等^[4]根据 Hartmann-Shack 原理设计了人眼波前像差测量仪, 首次在人眼屈光系统的研究中引入波前像差的概念。目前临床上波前像差仪种类较多, 包括 Irx3、Keratron、OPD-Scan、iTrace 等, 可测量角膜、晶状体及全眼的高阶像差、角膜地形图、泪膜功能等指标, 各有优势。Visser 等^[5]研究指出由 Irx3、Keratron、OPD-Scan、iTrace 四种不同仪器所测量的全眼和角膜波前像差值存在差异, iTrace 在测量角膜波前像差方面具有最好的可重复性。波前像差技术已广泛应用于眼科临床, 如: 角膜接触镜、个性化角膜切割及人工晶状体设计等领域, 通过减少光学波前像差来提高视觉质量^[6]。结合这一技术设计的非球面 IOL, 具有零或负球差, 可矫正部分角膜固有的正性球差, 提高术后对比敏感度及 MTF 值, 较传统的球面 IOL 获得更好的视觉质量。波前像差的影响因素包括瞳孔大小、泪膜稳定性、年龄、调节、屈光状态、角膜疾病、晶状体疾病及视网膜疾病等; 瞳孔大小是最关键影响因素, 当瞳孔直径 < 2.5 mm 时对视觉质量影响很小, 随着瞳孔直径的增加, 高阶像差增大, 成为影响视觉质量的主要因素^[7]。

2 非球面 IOL 的研究进展

2.1 非球面 IOL 产生的原理 随着年龄增加, 视觉系统的球差增加是引起视觉质量下降的重要原因, 人眼球差主要来自角膜及晶状体, 角膜为正性球差, 随年龄增加无明显改变, 而晶状体则负性球差减少, 正性球差增加, 破坏了角膜与晶状体正负性球差相抵消的平衡关系, 导致眼球总球差值增大, 对比敏感度下降, 最终造成视觉质量的下降。传统的球面 IOL 为正球差, 会导致术后总球差增加, 而设计为零或负球差的非球面 IOL 可抵消部分角膜的正球差, 降低术后眼总球差, 提高视觉质量。传统球面 IOL 各点曲率相等但屈光度不同, 由于正常角膜前后表面曲率不一致, 引起 IOL 光学部周边的光线发生离焦, 成像位于中央区光线成像的前方, 导致视网膜黄斑区形成光线的衍射

环, 术后球差增加, 视觉质量下降。非球面 IOL 在光学设计原理上更接近人类自然的晶状体, 其各点的曲率不同但屈光度一致, 光线自中心到周边均聚焦于一点, 在视网膜上生成高质量的清晰成像, 更能满足人们对白内障术后高视觉质量的要求^[8]。

2.2 临床上几种常见的非球面 IOL 非球面 IOL 可分为三种: (1) 使全眼球差无限接近于零, IOL 全部矫正角膜球差; (2) 全眼适当保留少量正性球差, IOL 矫正部分角膜球差; (3) 不改变原有的球差, 这种 IOL 为零球差。Tecnis Z 系列是较早运用波前像差理论设计出的消像差非球面 IOL, 理论上, 植入球差值为 $-0.27\mu\text{m}$ 的 Tecnis ZA9003 IOL 后, 总球差会降低到零; Tecnis 设计理念是提供与年轻人晶状体类似的光学表面—扁长前表面设计, 可显著减少球差, 改良功能性视力。AcrySof® IQ 是 Alcon 公司最新推出的新型 IOL, 中央及边缘光学面整体厚度较其他非球面 IOL 薄将近 50% (以 +20D IOL 比较得出), 并附加黄色载色基团, 可减少短波光线对视网膜色素上皮层细胞的损伤, 球差为 $-0.20\mu\text{m}$, 理论上植入术后总球差为 $+0.10\mu\text{m}$; Acri smart 36A 为双曲面一片式 IOL, 本身具有负球差, 可消除角膜球差, 适用于 1.4mm 微切口的超声乳化手术。零球差非球面 IOL 不改变角膜及眼球固有的球差, 虽然术后全眼保留部分正性球差, 但增加了焦深, 可提高眼球屈光的假性调节力, 提高远近视力, 改善阅读功能^[9]。Terwee 等通过研究模型眼发现, 非球面 IOL 矫正全眼球差越趋向于零, 视网膜成像质量越好。但是非球面与球面 IOL 眼相比, 在降低全眼球差的同时, 焦深降低, 也降低了离焦耐受性。McLellan 等研究发现, 适量正球差可减少色差和高阶单色像差的副作用, 但球差减小也可能会导致其他高阶像差 (如彗差) 的增加^[10]。目前临床上常见的几种非球面 IOL 参数见表 1。

2.3 非球面 IOL 的临床效果

2.3.1 非球面 IOL 的视功能 目前临床上评价 IOL 眼视功能最简便常用的指标是裸眼和最佳矫正远、近视力。大量研究数据表明, 各组非球面 IOL 眼裸眼及最佳矫正视力组间无显著差异, 且非球面 IOL 与球面 IOL 都能有效地提高术后视力, 在恒定的亮度对比度下, 非球面 IOL 眼相对于球面 IOL 眼视力没有显著提高。但非球面 IOL 可使白内障患者术后获得较好的功能性视力, 特别是在有雾、昏暗环境或驾车等情况下的视力。Dick 等研究发现, 非球面 IOL Tecnis ZA9000 可明显提高患者在夜间的功能性视觉和驾驶能力, 在 55km/h 的速度下, 缩短司机对紧急情况时的反应时间约 0.5s, 显著提高驾驶员紧急逃生措施的时间^[11]。

2.3.2 非球面 IOL 与瞳孔直径 非球面 IOL 并不是在所有情况下都能体现其减少像差后所带来的良好视觉质量, 在小瞳孔直径下的患者并不能发挥其减少球差的作用, 但是夜间或昏暗照明时, 瞳孔直径扩大到 5mm 以上时, 其光学特性的优势就会显现出来。Taketani 等^[12]通过研究两种 Alcon AcrySof 的球面及非球面 IOL 眼视觉质量后发现, 当瞳孔直径为 4mm 时, 差异无显著差异, 瞳孔直径为 6mm 时, 前表面弯曲度偏大的 IOL 具有较小的球差, 视觉质量更佳。所以非球面 IOL 在大瞳孔状态下, 比传统的球面 IOL 可获得更好的视觉质量, 此外, 年轻人较老年人的瞳孔扩张能力更强, 所以, 非球面 IOL 更适合年轻的、长期暗光下工作及夜间驾驶的患者。

表1 几种常见非球面 IOL 参数

非球面 IOL	球差(μm)	IOL 类型	A 常数	非球面特性	光学部材料
Tecnis ZA9003	-0.27	三片式	119.1	前表面	疏水性丙烯酸酯
Acri smart36A	-0.26	一片式	118.0	前表面	疏水性丙烯酸酯
Alcon AcrySof® IQ	-0.20	一片式	118.7	后表面	疏水性异丁烯酸酯聚合物
Staar KS-3Ai	-0.18	三片式	119.5	前表面	硅胶
B&L MI60	0	一片式	118.9	前后表面	亲水性丙烯酸酯
B&L Akreos AO	0	一片式	118.4	前后表面	亲水性丙烯酸酯

2.3.3 非球面 IOL 的稳定性 许多因素共同影响着非球面 IOL 充分发挥其减少球差的优势,例如:个体变异性, IOL 偏心或倾斜以及与年龄相关的小瞳孔等,研究证明,非球面 IOL 稳定性不佳,发生偏中心、倾斜等并发症时,相较于球面 IOL 可造成眼内不对称的高阶像差,如彗差等的产生,将导致更大的像差,因此植入非球面 IOL 对手术操作过程的精确度要求很高。Holladay 等认为非球面 IOL 若偏中心 0.4mm 或倾斜超过 7°,其本身抵消角膜球差的优势将消失。Atchison 研究表明,非球面 IOL 只有在中央固定好的情况下,才能减少球差,获得良好的视觉质量;当发生偏位或倾斜时,彗差和散光等像差均会增大,视觉质量明显下降^[13]。故对于术前就存在悬韧带部分断裂等导致晶状体囊袋不稳定因素或术中出现较严重后囊膜破裂的患者均不适合植入非球面 IOL。Almann 等研究了两种硅凝胶材质的 IOL (Advanced Medical Optics/LI61U/Bausch、SofPort AO/Bausch&Lomb、Tecnis Z9000) 出现偏中心的视觉质量,结果表明,负球差晶状体 Tecnis Z9000 和 LI61U 组晶状体偏心后,模型眼由于不对称高阶像差的产生,视觉质量明显下降,SofPort AO 为零球差,偏心时不产生其他像差,因此对视网膜成像质量没有不利影响,其与负球差 IOL 相比,无论是否产生偏心以及在瞳孔直径发生变化的情况下,均有较高的视觉质量。因此准分子激光治疗术后或较严重的角膜瘢痕等患者,因其角膜像差的不确定性,更适合植入零球差非球面 IOL,而不适宜植入负球差的 IOL。不同非球面 IOL 眼内稳定性亦不同,研究表明,多瓣支撑 IOL 较双瓣支撑 IOL 稳定性更好,一片式优于三片式 IOL,丙烯酸酯材料 IOL 较硅凝胶材料 IOL 更稳定。临床医师在选择 IOL 时,应综合分析,选择稳定性较好的,尽量减少术后 IOL 偏心及倾斜的发生,目前有一些特殊设计的 IOL,改变了其光学部结构,即使术后发生轻度倾斜或偏心,也可避免引起严重的高阶像差^[14]。

3 视觉质量的评估

非球面 IOL 眼的视觉质量评估至关重要,可指导临床医师判断术后是否达到预期目标。决定人眼视觉质量的三大重要因素是屈光系统的成像质量、视网膜生理功能、视觉信号的传递及视觉中枢的认知功能。视觉功能目前尚无统一的指标及定义,通常包括:视力、舒适度、稳定性及清晰度等指标。在进行 IOL 眼视觉质量评估时,应注意结合主观及客观评价指标综合评估,近年来,更多临床医师开始关注患者术后的心理评估。

3.1 主观评估指标 临床常用的主观评估指标包括视力、对比敏感度、眩光敏感度及视觉生活质量问卷等^[15]。测定视力的方法简便、直观,但具有主观依赖性,所以单纯应用视力来评价视觉质量具有局限性,临床上必须结合其他评价指标方能有效评估。对比敏感度指不同对比条件下,

对不同空间频率下目标的分辨力,相对较全面,可评价屈光系统和神经传导功能两方面,但对患者而言有主观依赖性,要求其高度配合,可重复性差,对比敏感度下降时,易出现驾驶困难及跌倒。眩光敏感度反映在眩光条件下的对比敏感度,指失能性眩光引起的视觉质量下降程度。视觉生活质量问卷简便易行,反映患者真实主观的感受,是重要的评价指标,问卷形式多样,内容包括夜间或暗光下是否出现视力下降、重影、眩光和阅读困难等方面,根据患者的主观感受来综合评价视觉质量。

3.2 客观评估指标 屈光度、波前像差、调制传递函数(modulation transfer function, MTF)、斯泰尔比值(strehl ratio, SR)、点扩散函数(point spread function, PSF)等是目前临床常见的客观视觉质量评估指标^[16]。屈光度指晶状体的调节能力及人眼在无调节下的聚焦能力,在无调节下,视远不能将物像聚焦于视网膜,需要透镜补充的屈光力就叫做屈光度,屈光度较小时,患者有较好的裸眼远视力。波前像差在上文已详细讲述。MTF 是一项评价功能性视力的客观指标,解释成像过程建立在现代光学的傅里叶(Fourier)理论上,指不同空间频率下像与物对比度之间的差异,能够科学地客观评价光学系统的成像质量,MTF 曲线与纵轴、横轴所围成的空间面积越大或 MTF 值越高,成像越清晰,视觉质量越好。SR 值是一个屈光指数值,存在像差的光学系统与理想光学系统之间点扩散函数中心峰值的比值,介于 0~1 之间,该数值越大,成像质量越高,正常人约为 0.3。PSF 指一个物点通过光学系统后在成像面上的光强度分布函数,反映光学系统物点成像的位置偏差和光强度衰减。包括像差、衍射及散射,与对比敏感度不同,不受视觉中枢的干预,可以较客观、准确、全面地评估视网膜的成像质量。PSF 评估成像质量的指标包括光斑面积大小和光斑的光强度:光斑面积越小,表明点光源弥散越少,视网膜成像越好;光斑的光强度越高,说明光能量损失越少,成像质量越好^[17]。

4 个体化选择非球面人工晶状体

研究证明,在进行功能性视力和视觉敏感度对比测试中发现,非球面 IOL 眼在视网膜成像及视觉行为方面具有显著改善,较传统球面 IOL 眼在眩光和夜视力方面的改善有重要意义。目前非球面 IOL 在临床上的运用已十分普遍,种类较多,根据不同的设计理念,拥有不同的球差、结构及材质,如何个体化选择非球面 IOL,使患者获得较好的术后视觉质量是眼科医生亟需解决的问题。很多医院在选择非球面 IOL 时,术前未常规测量角膜的高阶像差来指导个性化选择,而是随机或盲目地选择,术后也未比较不同 IOL 眼的视觉质量,非球面 IOL 眼是否达到预期视觉质量不得而知。据报道,白内障术后全眼球像差变化由植入的 IOL 及角膜前表面像差改变所致,且角膜前表面像差

值变化不大,主要由植入的IOL引起。但角膜球差值在人群中存在个体差异性,目前大部分非球面IOL都是基于矫正角膜正性球差而设计的,且角膜的其他高阶像差与角膜球差相互作用可能提高或降低视网膜成像质量,因此临床上应强调“个体化”选择非球面IOL,根据术前测量角膜球差及预期保留全眼球差来指导非球面IOL的选择,否则将造成个别患者植入非球面IOL效果更差。

对于最佳矫正球差的研究目前尚无定论。Levy等对35例70眼(24.4±7.7岁)超常视力者行波前像差检测,结果显示6.0mm瞳孔直径下全眼总球差值为0.110±0.077μm。Schallhom测量平均年龄为31.6±4.9岁飞行员的波前像差,发现6.0mm瞳孔直径下全眼总球差值约为0.19μm。Alcon公司也做过类似的调查研究,对年龄>5岁的超常视力者检测结果显示其总球差接近零。虽然无证据证明超常视力与零球差或少量的正性球差直接相关,但可以提供正常总球差值的参考范围依据。Piers等^[11]研究指出,IOL眼总球差为零时对比敏感度最大;Beiko^[18]通过前瞻性选择一组术前角膜球差为+0.37μm的患者,为使术后全眼球差为+0.1μm,植入球差为-0.27μm IOL,发现此组患者的对比敏感度较高。Wang等得出更为详细的全眼最佳球差值,通过对94例154眼全眼球差及视网膜成像质量的研究指出:获得较好视网膜成像质量的全眼球差分别为-0.10~0.00μm,+0.15~+0.30μm,-0.40~-0.20μm时,对应的全眼离焦分别是0.00、-0.50、+0.50D。焦深指人眼可以耐受但不引起可察觉的聚焦敏锐度降低的像距改变范围,IOL眼的焦深值增大可增加伪调节力,有助于提高近视力,改善阅读能力。研究证明焦深值在不同IOL眼的大小为:球面IOL眼>零球差IOL眼>负球差IOL眼。Jansonius等^[19]通过模型眼研究发现,保留适当正性球差,可以提高一定量焦深,有助于提高近视力,因此对于有阅读需求的老年人,可以适当预留少量全眼正性球差。

5 小结

综上所述,个体化非球面IOL选择时,术前利用iTrace视觉功能分析仪、角膜地形图仪或Pentacam眼前段分析仪等不同设备,测量出患者的角膜球差,结合术后期望的全眼球差值,选择不同球差设计的非球面IOL。目前国际上缺乏最佳矫正球差的循证医学证据,相关的实验研究也无统一定论,目前,多数眼科医师均参照此结论,术后全眼保留零或少量正性球差可获得较好的视觉质量。在我国更缺乏此类多中心、大样本、大范围的研究证据,且国外现有的研究结果在我国不一定完全适用,所以,我们亟需展开大量相关的临床研究,充分结合主观及客观指标来评估视觉质量,全面分析,进一步探讨最佳矫正球差值,为指导临床个体化选择非球面IOL提供证据。因非球面IOL材料及结构设计也各不相同,除了球差,IOL植入术后的稳定性也是应该考虑的因素,并且对手术技术要求高,应避免发生轴向位移、偏中心、倾斜等并发症。未来IOL的发展趋势及非球面IOL的个性化选择均需充分考虑上

述内容,做进一步深入研究,强调个体化、全面而合理的选择。

参考文献

- 1 Wei YH, Chen WL, Su PY, *et al.* The influence of corneal wound size on surgically induced corneal astigmatism after phacoemulsification. *Formos Med Ossid* 2012;111(5):284-289
- 2 Schuster AK, Tesarz J, Vossmerbaeumer U. The impact on vision of pheric to spherical monofocal intraocular lenses in cataract surgery: a stematic review with meta-analysis. *Ophthalmology* 2013;120(11):2166-2175
- 3 Wahba SS, Riad RF, Morkos FF, *et al.* Visual performance of the Tecnis one-piece lens ZCB00. *Clin Ophthalmol* 2011;5(3):1803-1808
- 4 Liang JZ, Grimml B, Goelz S, *et al.* Objective nleasure - men of wave aberrations of the hman eye with the use of Hammann-Shack wavefront sensor. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 1994;11(2):1949-1957
- 5 Visser N, Berendschot TT, Verbakel F, *et al.* Evaluation of the comparability and repeatability of four wavefront aberrometers. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2011;52(4):1302-1311
- 6 Zhang Z, Wang J, Niu W, *et al.* Corneal aspherieity and its related factors in 1 052 Chinese subjects. *Optom Vis Sci* 2011;88(10):1232-1239
- 7 Xing XJ, Tang X, Song H. Comparison of optical performance and stability of five different kinds of aspheric IOLs. *Zhong Hua Yan Ke Za Zhi* 2012;48(4):297-301
- 8 高富军. 不同球差人工晶状体植入术后视觉质量及最佳矫正球差分析. *中国实用眼科杂志* 2014;32(12):1428-1432
- 9 魏树瑾, 宋慧, 汤欣南, 等. 白内障人群角膜球差的测量及其在非球面人工晶状体选择中的意义. *中华眼外伤职业眼病杂志* 2014;36(4):245-249
- 10 Thiagarajan M, McClenaghan R, Anderson DF. Comparison of visual rformance with an aspheric intraocular lens and a spherical intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 2011;37(11):1993-2000
- 11 Piers PA, Manzanera S, Prieto PM, *et al.* Use of adaptative optics to determinethe optimal ocular spherical aberration. *J Cataract Refract Surg* 2007;33(10):1721-1726
- 12 Taketani F, Hara Y. Characteristics of spherical aberrations in3 aspheric intraocular lens models measured in a model eye. *J Cataract Refract Surg* 2011;37(5):931-936
- 13 Kretz FT, Tandogen T, Khorammnia R, *et al.* High order aberration and straylight evaluation after cataract surgery with implantation of an aspheric, aberration correcting monofocal intraocular lens. *Int J Ophthalmol* 2015;8(4):736-741
- 14 汤欣. 正确理解像差、合理选择非球面人工晶状体. *中华眼科杂志* 2010;46(8):673-675
- 15 Salvatore S, Lupo S, Nebbioso M, *et al.* New insight into visual function with aspherical intraocular lenses (IOLs): Tecnis ZCB00 and Acrysof SN60WF. *Ophthalmology* 2011;31(5):417-419
- 16 连慧芳, 汤欣, 宋慧. 超声乳化白内障吸除术前角膜球差对相对个性化非球面人工晶状体植入的影响. *中华眼科杂志* 2010;46(1):410-414
- 17 姚克, 汤霞靖, 徐雯, 等. 零像差设计的非球面人工晶体的临床应用. *中华眼科杂志* 2010;46(2):328-331
- 18 Beiko GH. Personalized correction of spherical aberration in eat-ayact surgery. *J Cataract Refract Surg* 2007;33(8):1455-1460
- 19 Jansonius NM, Kooijman AC. The effect of spherical and other aberrations upon the modulation transfer of the defocused human eye. *Ophthalmic Physiol Opt* 1998;18(6):504-513