

评价 SMILE 术后视觉质量与光学调制传递函数的关系

张旭¹, 王雁¹, 徐路路¹, 王伟²

引用:张旭,王雁,徐路路,等. 评价 SMILE 术后视觉质量与光学调制传递函数的关系. 国际眼科杂志 2020;20(5):834-837

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.81873684)

作者单位:¹(300020)中国天津市,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;
²(273155)中国山东省曲阜市,济宁学院物理与信息工程系

作者简介:张旭,在读博士研究生,主治医师,研究方向:屈光手术、视觉光学。

通讯作者:王雁,博士,教授,博士研究生导师,研究方向:屈光手术、视觉光学. wangyan7143@vip.sina.com

收稿日期:2019-09-26 修回日期:2020-04-09

摘要

目的:探讨飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(SMILE)术后光学调制传递函数(MTF)特点,并探究术后裸眼视力(UCVA)、对比敏感度功能(CSF)与MTF的关系。

方法:横断面选取2015-06/11在天津市眼科医院行SMILE手术矫正近视患者34例68眼,术后眼部情况稳定3mo以上且术后残余屈光度均小于 $\pm 0.50D$ 。在明视觉下,用国际标准视力表测量UCVA,用CSV-1000E测量CSF。用WaveScan测量全眼的波前像差,经Matlab编程,将像差进行公式转换成MTF,取3、6、12、18c/d四频区结果进行统计。

结果:在3、6、12、18c/d频区,CSF值分别为:63.19 \pm 3.18、110.25 \pm 5.22、57.65 \pm 3.76、16.15 \pm 1.04;MTF值分别为:0.80 \pm 0.02、0.56 \pm 0.03、0.30 \pm 0.02、0.19 \pm 0.02。在6、12、18c/d频区,UCVA与CSF具有相关性($r=0.548, 0.337, 0.324, P<0.01, =0.005, 0.007$);而在18c/d频区,CSF与MTF具有相关性($r=0.241, P=0.048$)。

结论:SMILE手术矫正后光学质量(MTF)的变化规律不同于视觉质量的变化规律,不同于视力和对比敏感度,虽然屈光系统发生像差等变化,但最终手术对全眼CSF无影响,说明视神经大脑通路对视觉质量具有补偿作用。计算MTF对评价手术后光学质量的判断具有一定的理论和临床应用价值。

关键词:飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术;近视;对比敏感度;调制传递函数

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2020.5.20

Evaluation of the relationship between visual quality and optical modulation transfer function after SMILE

Xu Zhang¹, Yan Wang¹, Lu-Lu Xu¹, Wei Wang²

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.81873684)

¹Clinical College of Ophthalmology, Tianjin Medical University; Tianjin Key Lab of Ophthalmology and Visual Science; Tianjin Eye Hospital, Tianjin 300020, China; ²Department of Physics and Information Engineering, Jining University, Qufu 273155, Shandong Province, China

Correspondence to: Yan Wang. Clinical College of Ophthalmology, Tianjin Medical University; Tianjin Key Lab of Ophthalmology and Visual Science; Tianjin Eye Hospital, Tianjin 300020, China. wangyan7143@vip.sina.com

Received:2019-09-26 Accepted:2020-04-09

Abstract

• **AIM:** To investigate the characteristics of optical modulation transfer function (MTF) of the eyes after femtosecond laser small incision lenticule extraction (SMILE), and to evaluate the relationship between visual acuity (VA), contrast sensitivity (CSF) and MTF.

• **METHODS:** From June to November, 2015, 34 myopia patients (68 eyes) who underwent SMILE surgery in Tianjin Eye Hospital were selected in cross-section. The postoperative eye condition was stable for more than 3mo after surgery. The residual diopter of the eyes after SMILE was less than $\pm 0.50D$. Under bright vision, measured VA by International standard visual acuity chart and CSF by CSV-1000E. The wavefront aberration of the whole eyes were measured by WaveScan, and MTF of the eyes were obtained by using aberration formula conversion and Matlab programming. The MTF of (3, 6, 12, 18) c/d frequency region were counted.

• **RESULTS:** CSF values in 3, 6, 12, 18 c/d frequency range were 63.19 \pm 3.18, 110.25 \pm 5.22, 57.65 \pm 3.76, 16.15 \pm 1.04; MTF values in 3, 6, 12, 18 c/d frequency range were 0.80 \pm 0.02, 0.56 \pm 0.03, 0.30 \pm 0.02, 0.19 \pm 0.02. In 6, 12, 18 c/d frequency range, visual acuity was significantly correlated with CSF ($r=0.548, 0.337, 0.324, P<0.01, =0.005, 0.007$). In 18c/d frequency range, CSF was significantly correlated with MTF ($r=0.241, P=0.048$).

• **CONCLUSION:** The change of optical quality (MTF) after SMILE was different from that of visual quality (visual acuity and contrast sensitivity). Although the aberration of refractive system changed, the SMILE surgery had no effect on CSF, which indicated that neuro-brain had a compensatory effect on visual quality. Computational MTF has certain theoretical and clinical value in evaluating the optical quality after refractive surgery.

• **KEYWORDS:** small incision lenticule extraction; myopia; contrast sensitivity; modulation transfer function

Citation: Zhang X, Wang Y, Xu LL, et al. Evaluation of the relationship between visual quality and optical modulation transfer function after SMILE. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2020;20(5): 834-837

0 引言

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 是一种较新的屈光矫正手术方式,在飞秒激光的基础上发展而来,保持了角膜上皮层和前弹力层的连接,临床研究已经证实了其具有安全、有效、稳定、可预测性好等特点^[1-2]。并且与传统的 LASIK 手术相比,研究显示 SMILE 手术导致的像差明显减小,从而显示更好的视觉效果^[3-5]。

目前国际上已经证实并开始应用现代光学理论对视觉系统的视功能做出更科学、更全面的评价^[6-7]。调制传递函数(modulation transfer function, MTF)是通过光学系统与通过前的调制度的比值,为不同空间频率的正弦条纹,用于评价光线在视网膜上所成像的对比度与原始图像的比率,表达的是对称性像差^[8]。与像差相比,MTF 描述了不同空间频率下物像对比度和光学系统成像质量的关系。因此,MTF 能够全面、客观地反映眼球整个屈光系统的光学成像质量^[9-10],并且排除了神经的因素,越来越多地应用于临床来评价成像质量。

通常临床评价视觉质量的手段主要是裸眼视力(UCVA)和对比敏感度(contrast sensitivity function, CSF),两者均同时反映眼的屈光系统和神经系统。UCVA 和 CSF 两者均考虑了视锥细胞和视觉神经系统作用的,与 UCVA 相比,CSF 提供的更多、更全面关于视功能的信息^[11-12]。在临床实践中,不同的患者术后裸眼视力相同的情况下,却有不同对比敏感度,或伴有光晕、眩光、夜间视力下降,但其机制不清。本文目的在于观察研究术后患眼的 MTF,探讨 MTF 与 UCVA、CSF 之间的相关性。

1 对象和方法

1.1 对象 选取研究对象为 2015-06/11 在天津市眼科医院接受 SMILE 手术治疗患者,最终入选患者 34 例 68 眼,患者年龄 17~40(平均 23.12±5.03)岁;男 24 例,女 10 例;术前近视球镜度为-1.75~-8.50(平均-4.98±1.58)D;散光度数为 0~4.75(平均 0.97±0.117)D。纳入标准:(1)手术顺利,术后坚持随访 3~6mo;(2)术后视力稳定,残余屈光度小于±0.50D;(3)术后无明显并发症。排除标准:(1)患有眼科其他疾病如角膜炎症活动期、圆锥角膜、青光眼、白内障,或者存在眼底病变、视神经病变等;(2)眼部手术史、外伤史;(3)患有全身缔结组织疾病或者自身免疫性疾病;(4)无法配合检查;(5)术后出现并发症,屈光度明显欠矫或过矫。所有患者均签署知情同意书,本研究获得天津医科大学眼科临床学院伦理委员会的批准,并严格遵守《赫尔辛基宣言》。

1.2 方法 所有患者均由同一位经验丰富的术者完成手术,术前常规滴 0.5%左氧氟沙星滴眼液 4 次/d,连续应用 3d,术中用 0.4%盐酸奥布卡因滴眼液 2 次进行表面麻醉。SMILE 手术应用 VisuMax® 飞秒激光系统制作角膜瓣和基质透镜,激光脉冲频率为 500kHz,能量为 115nJ,点间距为 3.0μm,光斑大小为 1.5μm,角膜帽(cap)厚度设置为 110μm,直径 7.2mm,微透镜直径为 6.2mm,基底加厚 10μm,散光过渡带为 0.1mm,在角膜上方做一宽度为 2mm 切口,透镜及小切口的侧切口角度均为 90°。激光扫描结束后,利用显微分离器掀开分离角膜帽边缘,进一步分离内部透镜上表面及下表面,然后用显微镊取出透镜。

术后滴用 0.5%左氧氟沙星滴眼液 2d,4 次/d;0.1%氟米龙滴眼液 4 次/d,每 2wk 递减 1 次,2mo 停药。

在自然光照明下,利用国际标准视力表测试距离 5m 远距离,并记录 UCVA。应用基于 Hartmann-Shack 原理的 WaveScan 波阵面测量仪(WaveScan)。文中的波阵面像差信息用 Zernike 系数来表示,均采用美国光学学会(Optical Society of America, OSA)标准。波阵面像差测量在暗室中自然放大状态下进行,每只眼睛测量 3~5 次,选取图像标准:(1)虹膜纹理清晰;(2)屈光度与显然验光接近;(3)重复性好;(4)瞳孔直径 6mm 以上。符合以上标准的 3 次结果取平均值后进行分析。利用 CSV-1000E 测试仪,自然光照明,测试距离 8 英尺(2.5m),沿着垂直方向测出 CSF,即保持空间频率不变,而对对比敏感度改变。首先选定空间频率不变,改变其对比度,由大到小逐渐降低对比敏感度,直至观察者不能分辨为止,找到测试者所能观测的最小对比敏感度,然后变换空间频率,并逐一测试,得到测试者所能观察到的最小对比敏感度。先测高频,再测量低频的空间频率。

波阵面像差的准确值计算:多次测量同一眼的波阵面像差,剔除所含误差较大的测量值,最后求剩余测量值在同一大小瞳孔下的平均值,作为所测人眼波阵面像差的准确值。

MTF 的计算方法:经 Matlab 编程,应用光学常规数理统计方法。人眼波阵面像差用 Zernike 多项式形式可表示为: $W(x,y) = \sum_k C_k Z_k(x,y)$ 式中: x,y 为坐标轴, $Z_k(x,y)$ 是 Zernike 多项式第 k 项, C_k 是对应的系数,由像差仪直接测出。由波阵面像差函数 $W(x,y)$ 构造光瞳函数 $P(x,y):P(x,y) = A(x,y) \exp[iW(x,y)]$,瞳孔直径取 3mm。由患眼的光瞳函数 $P(x,y)$ 可以求得光学传递函数 OTF。OTF 通常是复函数,由振幅部分和位相部分组成。其振幅值为 MTF。取 3、6、12、18c/d 四频区结果统计。

统计学分析:采用 SPSS20.0 统计软件进行统计学分析,进行 Pearson 相关分析。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者术后一般情况 术后所有患眼视力均达到术前最佳矫正视力,无角膜上皮雾状混浊(haze)等相关并发症。患者术后 UCVA 为 0.8~2.0(平均 1.35±0.03)。高阶像差结果:垂直彗差 C_3^{-1} 为-0.40~0.39(平均-0.03±0.026)μm;水平彗差 C_3^1 为-0.71~0.47(平均-0.08±0.031)μm;球差 C_4^0 为-0.12~0.73(平均 0.28±0.022)μm。CSF、MTF 结果见表 1。通过分析,SMILE 术后术眼 CSF 变化曲线呈倒“U”字型,即中高频 CSF 值高,低频和高频 CSF 值均降低(图 1),而 MTF 变化曲线呈现随着频率增加数值降低的趋势(图 2)。

2.2 UCVA 与 CSF 相关性分析 在 6、12、18c/d 空间频率下,患者术后 UCVA 与 CSF 相关性分析结果:在 6、12、18c/d 空间频率下,UCVA 与 CSF 具有相关性($r = 0.548, 0.337, 0.324, P < 0.01, = 0.005, 0.007$),即患者视力越好其对应的中、高频对比敏感度视力也越好;在 3c/d 空间频率下,即在低频区,UCVA 与 CSF 无相关性($r = -0.125, P = 0.308$)。

2.3 UCVA 与 MTF 相关性分析 在 3、6、12、18c/d 空间频率下,患者术后 UCVA 与 MTF 无相关性($r = 0.102, 0.141, 0.149, 0.202, P = 0.408, 0.251, 0.224, 0.099$)。

2.4 MTF 与 CSF 相关性分析 在 18c/d 空间频率下,

表1 各空间频率下 CSF 和 MTF 均值及分布范围

指标	3c/d	6c/d	12c/d	18c/d
CSF	15~120(63.19±3.18)	24~193(110.25±5.22)	12~99(57.65±3.76)	4.5~36(16.15±1.04)
MTF	0.26~0.95(0.80±0.02)	0.06~0.92(0.56±0.03)	0.01~0.81(0.30±0.02)	0.01~0.72(0.19±0.02)

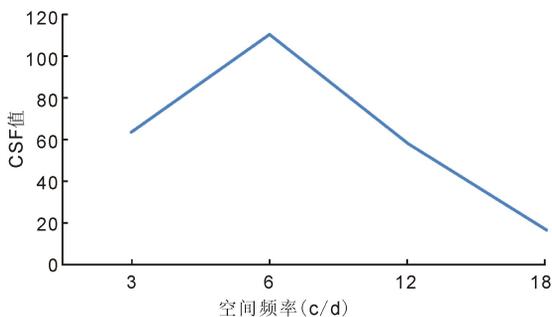


图1 各空间频率下 CSF 值。

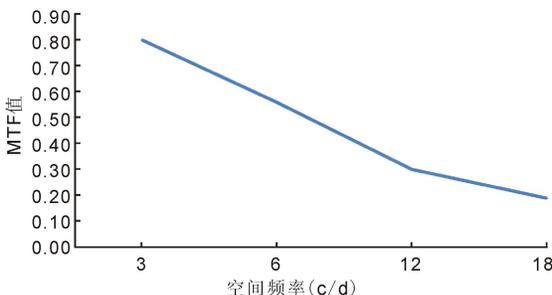


图2 各空间频率下 MTF 值。

患者术后 MTF 与 CSF 有相关性($r=0.241, P=0.048$),即在高频区成像质量越好,相应的对比敏感度视力也越好;在 3、6、12c/d 空间频率下,患者术后 MTF 与 CSF 无相关($r=-0.023, 0.150, 0.102, P=0.854, 0.222, 0.407$)。

2.5 Zernike 单项高阶像差与 MTF、CSF 相关性分析 在 3、6、12、18c/d 空间频率下,患者术后垂直彗差 C_3^{-1} 与 MTF 无相关性($r=-0.084, -0.162, -0.161, -0.147, P=0.498, 0.188, 0.190, 0.230$);水平彗差 C_3^1 与 MTF 无相关性($r=-0.156, -0.111, -0.098, -0.135, P=0.205, 0.370, 0.426, 0.273$);球差 C_4^0 与 MTF 无相关性($r=0.127, 0.040, -0.004, -0.135, P=0.205, 0.370, 0.426, 0.273$)。在 3、6、12、18 c/d 空间频率下,患者术后垂直彗差 C_3^{-1} 与 CSF 无相关性($r=-0.031, 0.048, -0.055, -0.070, P=0.801, 0.697, 0.656, 0.572$);水平彗差 C_3^1 与 CSF 无相关性($r=-0.035, -0.128, -0.122, 0.067, P=0.779, 0.297, 0.321, 0.589$);球差 C_4^0 与 CSF 无相关性($r=0.017, -0.018, -0.020, 0.049, P=0.890, 0.883, 0.874, 0.694$)。

3 讨论

视觉质量是评价手术的重要指标,视觉质量的提高也是手术的最终目的。一般来说,影响人眼的视觉质量包括两部分,一个是眼的屈光系统,通过它使外界的物体成像在视网膜上;另一个是眼的神经系统,视网膜光感受细胞接收光线刺激转化为电信号,并传输到大脑中枢系统^[13-14]。目前屈光矫正效果通常是通过视力、残余屈光度、像差等来评估。人眼的视觉质量的建立是物体发出的光经人眼光学系统成像后,再经视神经传导通路和大脑皮层视觉中枢整合后的像质综合。本文针对 SMILE 术后应用 MTF 对眼屈光系统进行评价,CSF 为全眼的视觉质量,全面评价全眼的视觉质量,而本研究重点 MTF 为屈光

系统的成像质量,并进一步分析 SMILE 术后各频段下 MTF 与 CSF 之间的关系。

像差是较屈光度更高级的屈光系统评价指标。20 世纪末 Liang 等^[15]利用 Hartmann-Shack (H-S)波前传感技术比较精确地测量了人眼波前像差,提供了一种有效地分析人眼光学系统对视觉影响的方法。本研究结果显示主要高阶像差结果与之前研究一致^[4]。SMILE 手术应用飞秒技术制作一个基质透镜,通过一个弧长 2mm 的周切口,将基质透镜取出,避免以往屈光手术中角膜瓣的丢失和移位,并提高了可预测性。高阶像差主要来源于激光切削,基质床表面越光滑,越能减少术后高阶像差的产生^[4]。SMILE 引入的球差较传统术式要小,还可能与其避免了准分子激光在切削周边角膜时,由于入射角改变导致切削效能下降有关,即余弦效应,从而避免引入过多球差等阶像差^[16-18]。

本研究应用计算法得到各个空间频率下的 MTF 值。与之前研究结果趋势一致^[9-10,12],但之前的研究对象是针对正常人或 LASIK 术后的患者,还没有针对 SMILE 术后患者的研究。SMILE 术后 MTF 变化曲线仍然呈现随着频率增加数值降低的趋势。光学传递函数(optical transfer function, OTF)是对于非相干光照明下的衍射受限系统、表征系统成像质量的指标。MTF 是 OTF 的模,即振幅,相位传递函数(phase transfer function, PTF)是 OTF 的相位^[16]。MTF 是不同空间频率的正弦条纹,通过光学系统后与通过前的调制度的比值,即评价光线在视网膜上所成像的对比度与原始图像的比率。用 Zernike 多项式来表达像差,再根据光瞳函数,可以计算出不同空间频率下的 MTF。像差项之间组合会产生补偿、抵消、加强等作用,即在 Zernike 多项式表达中,2 个不同阶的同一频角符号相同会使视觉质量提升,反正是会使视觉质量下降^[17]。因此,MTF 能够全面、客观地反映眼球整个屈光系统的光学成像质量,MTF 值越大,视觉质量越好。研究结果显示,MTF 与彗差、球差等无明显相关性,MTF 反映的是总体像差,与每个像差项无关。与传统屈光术式相比,SMILE 术后 MTF 受高阶像差的影响相对较小。

研究结果中 CSF 呈现出倒“U”字型趋势,低频区数值低,到中高频区数值高,在高频区回落,这与人眼的神经敏感性特点有关,对低频不敏感,对中高频敏感^[12]。SMILE 术后 MTF 值从低频到高频的变化不同于 CSF,反映两者变化规律是不一致的。但即使 MTF 在中、高频区有降低的趋势,CSF 还是回到了倒“U”字型,说明神经大脑对视觉质量的补偿。

从 SMILE 术后 CSF 与 UCVA 的相关性分析结果来看,除低频区外,中频区、高频区,CSF 与 UCVA 存在一定的相关性,证明视力与中、高频对比敏感度两者存在一定的内在联系。临床综合评价视觉质量的常用手段主要是测量视力和对比敏感度,两者均同时反映眼的屈光系统和神经系统。视力和对比敏感度两者均考虑了视锥细胞和

视觉神经系统作用的,与视力相比,对比敏感度提供的更多、更全面关于视功能的信息^[11-12]。不同频段的对比敏感度,反映的视功能存在差异:低频段反映的是对轮廓的分辨能力,中频段既反映了视敏度,又反映视觉对比敏感度,即物体的层次传递情况,高频部分反映物体的细节传递情况。这些是由于不同频段对应感光细胞的功能是有区别的。感光细胞对图像信号进行光电转换后,经双极细胞传递给神经节细胞(ganglion cell,GC),其中有X型GC和Y型GC,X型GC与外侧膝状体的X神经元发生联系,Y型GC与外侧膝状体的Y神经元发生联系。一般认为,X型GC对高空间频率敏感,Y型GC对低空间频率敏感。Y型GC受到光亮下降的影响较小。这提示X型GC对周围光亮变化更敏感^[14]。UCVA反映的中、高频段的视功能,SMILE术提高了中、高频段的视功能。

本研究中,SMILE术后UCVA与MTF无明显相关性。视力是综合屈光系统和神经系统的高频视觉。考虑所有患者均成功进行了SMILE屈光矫正术,手术改变了角膜表面形态,引起人眼的屈光状态的改变,但视网膜及视神经传导并未改变,甚至存在神经大脑的补偿功能。

SMILE术后MTF与CSF相关性分析结果显示:在18c/d频区MTF与CSF有一定弱相关性,在中、低频段下MTF均与CSF无明显相关性。球差和彗差是最主要的高阶像差,SMILE术后球差、彗差与MTF、CSF相关性分析结果显示,高阶像差与MTF、CSF均无明显相关性。MTF是由像差计算得来的,反应了像差的总和,像差是更高级的人眼屈光系统评价指标,对比敏感度是综合屈光系统和神经系统的各频区视觉功能。SMILE手术有效降低了患眼光学系统的像差(低阶像差为主),改善了成像质量,特别是明视觉状态下,即瞳孔直径为3mm状态下的MTF。人眼像差随瞳孔直径增大而明显增大。随着瞳孔直径缩小,像差对视网膜成像质量的影响作用减少。因此在明视觉状态下,SMILE术使像差减小,成像质量显著提高,在高频区MTF对CSF有一定影响,而中、低频区对CSF、视力影响甚微。在飞秒激光的基础上发展而来的SMILE手术作为一种较新的手术方式,与传统的LASIK手术相比,SMILE手术导致的像差明显减小,从而显示更好的视觉效果^[3-5]。手术虽然未涉及视网膜及其神经传导通路,但对于不同的新像差视网膜及神经传导通路处理作用会不相同,产生不同程度的适应性,视觉的神经系统也是影响整体视功能的重要因素,其反映视网膜、视神经和大脑中枢对图像信号进行处理传递解析的能力,也具有可塑性^[19]。

综上所述,SMILE手术可以有效地矫正屈光不正患眼,其经其矫正以后,手术眼的视力和对比敏感度的生理规律没有改变,即虽然矫正后的屈光间质像差发生了改变,但通过补偿等变化最终对视力、对比敏感度均无明显影响,说明视神经大脑通路对视觉质量具有补偿作用。算法可以获得不同空间频率的MTF,对评价手术后光学质量的判断具有一定的理论和临床应用价值。

参考文献

- 1 Agca A, Demirok A, Yildirim Y, *et al.* Refractive lenticule extraction (ReLEx) through a small incision (SMILE) for correction of myopia and myopic astigmatism: current perspectives. *Clin Ophthalmol* 2016; 10: 1905-1912
- 2 Hansen RS, Lyhne N, Grauslund J, *et al.* Small-incision lenticule extraction (SMILE): outcomes of 722 eyes treated for myopia and myopic astigmatism. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2016; 254(2): 399-405
- 3 Damgaard IB, Ang M, Mahmoud AM, *et al.* Functional Optical Zone and Centration Following SMILE and LASIK: A Prospective, Randomized, Contralateral Eye Study. *J Refract Surg* 2019; 35(4): 230-237
- 4 Gyldenkerne A, Ivarsen A, Hjortdal J. Comparison of corneal shape changes and aberrations induced by FS-LASIK and SMILE for myopia. *J Refract Surg* 2015; 31(4): 1-7
- 5 Moshirfar M, Mc Caughey MV, Reinstein DZ, *et al.* Small-incision lenticule extraction. *J Cataract Refract Surg* 2015; 41(3): 652-665
- 6 Mencucci R, Favuzza E, Caporossi O, *et al.* Comparative analysis of visual outcomes, reading skills, contrast sensitivity, and patient satisfaction with two models of trifocal diffractive intraocular lenses and an extended range of vision intraocular lens. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2018; 256(10): 1913-1922
- 7 Liu R, Zhou J, Zhao H, *et al.* Immature visual neural system in children reflected by contrast sensitivity with adaptive optics correction. *Sci Rep* 2015; 4(1): 4687-4687
- 8 姚进. 眼视光应用光学. 北京:人民卫生出版社 2015:127
- 9 王雁,杨晓艳,饶丰,等.人眼高阶像差对正常近视眼调制传递函数影响的初步分析.中华眼视光学与视觉科学杂志 2010; 12(4): 245-250
- 10 王雁,赵堪兴,饶丰,等.准分子激光原位角膜磨镶术后调制传递函数变化与视觉质量关系的研究.中华眼科杂志 2009;45(7):580-586
- 11 Chung ST, Legge GE. Comparing the Shape of Contrast Sensitivity Functions for Normal and Low Vision. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2016; 57(1): 198-207
- 12 Liu T, Wang ZQ, Wang Y, *et al.* Measurements of retinal aerial image modulation (AIM) for white light based on wave-front aberration of human eye. *Optik* 2010; 121(1):101-106
- 13 Jonnal RS, Kocaoglu OP, Zawadzki RJ, *et al.* A Review of Adaptive Optics Optical Coherence Tomography: Technical Advances, Scientific Applications, and the Future. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2016; 57(9): 51-68
- 14 蔺波,燕振国,岳红云.视觉环境与对比敏感度关系的研究进展.中国眼耳鼻喉科杂志 2011;11(4):262-264
- 15 Liang JZ, Grimm B, Goelz S, *et al.* Objective measurement of wave aberration of the human eye with the use of Hartmann-Shack wave-front sensor. *J Opt Soc Am* 1994; 11(7):1949-1957
- 16 王雁,赵堪兴.波前像差与临床视觉矫正.北京:人民卫生出版社 2011:78-88
- 17 Vinas M, Benedigarcia C, Aissati S, *et al.* Visual simulators replicate vision with multifocal lenses. *Sci Rep* 2019; 9(1):1539
- 18 Zhang Y, Shen Q, Jia Y, *et al.* Clinical Outcomes of SMILE and FS-LASIK Used to Treat Myopia: A Meta-analysis. *J Refract Surg* 2016; 32(4): 256-265
- 19 赵冠华,曹瑞丹,张磊,等.环境亮度及瞳孔直径对人眼神经对比敏感度的影响.国际眼科杂志 2016;16(12):2279-2284