

## 人眼像差补偿特性与视觉质量的关系

赵新恒 综述 王雁 张琳 审校

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

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

**【摘要】** 人眼波前像差是客观视觉质量的一种评价指标。近年来人眼波前像差之间的补偿作用与视觉质量的关系受到关注。各像差之间、角膜像差与眼内像差之间、角膜的前表面和后表面之间存在相互补偿关系, 视觉神经系统会对人眼像差做出补偿。像差补偿特性会随着年龄变化而变化, 不同分析区域下像差补偿特性也不相同。屈光手术及角膜接触镜等视觉矫正方式会改变人眼的像差补偿关系, 其导致的像差补偿关系改变可能会对视觉质量产生影响, 了解人眼的像差补偿特性与人眼视觉质量的关系非常重要。因此不仅要基于现有像差, 还要了解人眼像差的补偿特性对像差进行个性化矫正, 以提高矫正后的视觉质量。本文将人眼像差补偿特性与视觉质量关系的研究进展及意义进行综述。

**【关键词】** 眼; 像差测量; 视觉; 波前像差; 补偿; 视觉质量

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (81670884、81873684)

DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20191126-00512

### Relationship between human eye aberration compensation and visual quality

Zhao Xinheng, Wang Yan, Zhang Lin

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

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

**[Abstract]** Wavefront aberration is an evaluation index of objective visual quality. In recent years, the relationship between the wavefront aberration compensation in human eyes and the visual quality has been paid more and more attention. There is a mutual compensation relationship between various aberration terms, between corneal aberration and intraocular aberration, and between the anterior and posterior corneal surfaces, and the visual nervous system compensates human eye aberrations. The characteristics of aberration compensation change with age, and are different in analysis of different regions. Vision correction methods, such as refractive surgery and contact lenses, will change the aberration compensation relationship in human eyes, and the changes caused may have an impact on visual quality. It is important to understand the relationship between the aberration compensation characteristics in human eyes and the visual quality. Therefore, not only the existing aberrations should be taken into consideration, but also the compensation characteristics of human eye aberrations must be elucidated to make personalized correction for the aberrations and improve the visual quality after correction. The research progress and significance on the relationship between human eye aberration compensation characteristics and visual quality were reviewed in this article.

**[Key words]** Eye; Aberrometry; Vision, ocular; Wavefront aberration; Compensation; Visual quality

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (81670884, 81873684)

DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20191126-00512

人眼是一个精密的光学系统,但其并不完美。近年来,角膜屈光手术、人工晶状体植入术等手术日益广泛开展,极大程度提高了视觉效果,视觉质量更加受到重视。视觉质量的评价分为客观评价和主观评价。波前像差是一种客观视觉质量评价手段,可以较好地反映视网膜成像的清晰程度。全眼像差包

括角膜像差和眼内像差。大量研究表明,角膜像差与眼内像差之间存在相互补偿,因此全眼像差通常小于角膜像差。最新研究发现,不同像差项之间以及人眼像差与神经系统之间也存在一定的补偿。人眼像差的补偿特性使人眼成像自我优化,视觉质量可以达到较高水平。个性化的视觉矫正必须考虑人眼的

像差补偿特性,人眼的像差补偿特性对于视觉质量的研究至关重要。本文就人眼像差补偿特性与视觉质量关系的研究进展及意义进行综述。

## 1 人眼像差

波前像差是一个物理学概念,指光学系统实际波阵面与理想波阵面之间的相位差。

近视人眼的低阶像差占比较大,主要为离焦和像散,对于视觉质量的影响较大,可使用框架眼镜矫正。球差、彗差等高阶像差由于占比较小,对于视觉质量的影响较小,但在低阶像差被矫正之后,高阶像差占比增大,成为视觉质量的限制因素<sup>[1]</sup>。同时矫正高阶像差可以进一步提高视觉质量。基于波前像差视觉矫正技术的发展使通过个性化矫正高阶像差从而提升视觉质量成为可能<sup>[2]</sup>。应用框架眼镜、角膜接触镜、屈光手术、人工晶状体植入术等或可同时矫正高阶像差<sup>[3]</sup>。色像差也会对视觉质量造成一定影响<sup>[4]</sup>,但其对视觉质量的影响一般情况下小于单色像差。

Thibos 等<sup>[5]</sup>研究发现正常人眼高阶像差的均方根在零附近呈正态分布,只有球差在一正值附近呈正态分布。通常像差的均方根值越大则视觉质量越差<sup>[6]</sup>。Applegate 等<sup>[7]</sup>研究发现相同均方根值的泽尼克多项式金字塔中轴区的像差对于视觉质量影响较大,如离焦、球差。方位角越大,对于视觉质量的影响越小。近期 Young 等<sup>[8]</sup>研究发现,像差对于字母识别以及阅读等不同视觉任务的影响程度不同。

人眼的角膜像差主要来源于角膜形态的不规则,角膜形态的改变会造成人眼高阶像差较大幅度的改变<sup>[9-10]</sup>。角膜屈光手术后,各种原因可能导致角膜非球面性以及高阶像差的变化,如传统激光手术的余弦效应和人眼生物力学的改变等<sup>[11]</sup>。也有研究发现,角膜屈光手术后中央和周边角膜上皮重塑厚度不一致,也可能导致术后像差改变<sup>[12]</sup>。角膜屈光手术术中精准的光学中心定位对于视觉矫正效果也相当重要。

## 2 像差间协同效应对视觉质量的影响

一般认为,降低像差到较低水平便可获得较好的视觉质量。但近期研究发现,有时候虽然像差量值不大,但视觉质量仍然存在问题<sup>[13]</sup>。像差水平较低时,均方根与视觉质量的关联性下降,其原因可能是个体间视觉神经传导差异,也可能是视觉功能的临床测量方法并不能在低像差水平表现出相应的敏感性<sup>[14-15]</sup>。有研究发现,不同的像差相互组合且相互作用可能是造成低像差水平时视觉质量差异的原因<sup>[16-17]</sup>。一种像差可以通过补偿另一种像差从而提高成像系统的调制传递函数,而有些像差项间相互叠加使成像质量下降。Applegate 等<sup>[18]</sup>研究发现在保持像差总均方根值不变的基础上,不同像差组合对人眼视功能的影响存在差异,如一定量的球差与离焦产生相互作用,如果两者符号相同,像差之间会相互补偿,视觉质量提高;当两者符号相反时,对视觉质量的不利作用叠加,视觉质量较差,说明人眼各项像差之间存在较为复杂的耦合特性,呈现出非线性的补偿或叠加效应。屈光手术及人工晶状体

植入术等视觉矫正手术后人眼波前像差多处于较低水平,因此,对于低像差水平时像差与视觉敏感程度的关联机制及像差间协同耦合效应的研究或许是临床上进一步突破视觉极限的瓶颈。

近年来,随着人眼波前像差检查仪器和手段的成熟,以及激光角膜屈光手术系统和技术的发展,临床上不仅能够对术前和术后的低阶和高阶像差进行准确测量,而且手术系统的精度已能够满足对某些高阶像差项进行定量去除的要求。但由于人眼是典型的离轴自由曲面成像系统,根据矢量像差耦合理论,引入或消除某一项像差会对其他像差产生耦合效应。虽然认识到人眼像差特性及各项波像差间的耦合机制,但许多尚不明确,需要进一步研究。

## 3 人眼不同结构之间的补偿关系

外界光线经过泪膜、角膜、房水、瞳孔、晶状体、玻璃体到达视网膜成像。各结构光学平面的像差相互补偿,全眼像差得以优化。补偿因子目前已被用于评估角膜前、后表面像差的补偿作用以及眼内高阶像差对于角膜高阶像差的补偿机制<sup>[19]</sup>,其计算公式为:补偿因子=1-全眼像差/角膜像差。补偿因子小于0说明眼内像差与角膜像差为叠加作用,补偿因子大于0说明眼内像差与角膜像差为补偿作用。

### 3.1 角膜前、后表面像差的补偿关系

既往限于技术,只能依靠 Placido 盘采集角膜前表面形态数据获得角膜像差。最近研究发现角膜后表面对于前表面的补偿作用不可忽视。Scheimpflug 等新型摄影技术可以拍摄得到角膜前、后表面的面型,从而计算得到角膜前、后表面的像差,为角膜前、后表面像差补偿机制的研究提供了技术支持。角膜前、后表面是非旋转对称的自由曲面,角膜前、后表面像差会相互补偿,补偿关系受到分析区域、年龄、角膜屈光手术等的影响。

**3.1.1 分析区域对角膜前、后表面补偿关系的影响** 角膜中央部的像差补偿机制较明显,而角膜周边部前、后表面像差补偿效果较弱<sup>[19]</sup>。每种像差前、后表面补偿效果不一致,同一种像差在不同的分析区域下前、后表面补偿效果也不同。李晓晶等<sup>[19]</sup>研究发现,2 mm 直径范围内角膜前、后表面的球差会发生叠加,而在 6 mm 直径下分析,角膜前、后表面像差又表现为补偿作用,这可能与角膜的非球面性有关<sup>[20]</sup>。2 mm 直径下角膜前、后表面彗差表现为补偿作用,在大瞳孔时角膜前、后表面又表现为叠加作用。

**3.1.2 年龄对角膜前、后表面像差补偿关系的影响** 随着年龄的增加,角膜形态会发生改变,角膜前、后表面的像差补偿作用会减弱。Dubbelman 等<sup>[21-22]</sup>研究发现,角膜前、后表面的非球面性会随年龄发生明显改变,20 岁人角膜后表面彗差对前表面补偿作用约为 6%,随年龄增加补偿作用逐渐消失。球差的角膜前、后表面像差补偿作用较明显,白内障摘除联合人工晶状体植入术晶状体非球面性的选择需考虑年龄对角膜前、后表面像差补偿关系的影响。

**3.1.3 角膜屈光手术对角膜前、后表面像差补偿关系的影响** 由于角膜屈光手术对角膜进行切削,角膜形态会发生改变,角膜前、后表面像差补偿的平衡关系会受到影响,所以屈光

手术容易给人眼引入高阶像差<sup>[23]</sup>。对角膜前、后表面像差补偿机制的深入研究有助于我们进一步了解术后像差增加的机制,从而尽量避免像差引入,优化人眼像差,使患者术后获得更佳的视觉质量。

### 3.2 角膜像差与眼内像差的补偿关系

研究发现,全眼像差的均方根通常会小于角膜像差的均方根,因为眼内像差会对角膜像差做出补偿<sup>[24]</sup>。由于眼内像差对于角膜像差补偿的存在,使人眼光学成像效果得到优化,从而保证良好的视网膜成像质量。

人眼角膜与眼内像差的补偿在不同项的像差表现不同。Kelly 等<sup>[25]</sup>研究发现,人眼眼内球差对角膜的正球差大多可以很好地补偿<sup>[26]</sup>,但是彗差会由于人眼各光学元件相对位置的差异存在不同的补偿关系。25~45 岁人的晶状体可以对角膜前表面像差起到较好的补偿作用<sup>[27]</sup>,但是随着年龄增长,角膜前表面形态改变以及晶状体的改变使像差的补偿作用减弱,全眼像差增加,视觉质量下降<sup>[28-29]</sup>。调节对于角膜像差和眼内像差补偿机制的影响仍需进一步研究。

角膜接触镜、屈光手术以及人工晶状体植入术均会改变眼内像差与角膜像差之间的补偿关系<sup>[30]</sup>。角膜地形图和全眼波前像差引导的屈光手术目前均有开展,但 2 种术式的选择与优势存在争议<sup>[31-33]</sup>。有研究认为角膜形态存在较大的不规则性从而影响视觉质量时可以选择角膜地形图引导的屈光手术<sup>[32,34]</sup>,全眼像差较大时可以考虑全眼波前像差引导的屈光手术,但要结合具体情况进一步分析。人工晶状体植入术必须考虑眼内像差和角膜像差的补偿关系,通常用带有负球差的人工晶状体补偿角膜的正球差。目前普遍认为,人群中角膜像差的个体差异较大<sup>[35]</sup>,应根据角膜球差量值个性化选择人工晶状体的非球面性。角膜接触镜可以通过泪液透镜较好地矫正角膜前表面像差<sup>[36]</sup>,而对眼内像差不起作用。了解角膜像差与全眼像差的补偿关系对于角膜接触镜的验配也具有指导意义。

### 4 全眼像差与神经系统的补偿关系

主观视觉质量与视网膜成像质量并不完全一致。Chen 等<sup>[37]</sup>研究发现,神经系统可以对光学系统的视网膜成像做出补偿和处理,从而使视觉感受取得最佳效果。Artal 等<sup>[38]</sup>研究发现,仅将像差面旋转会导致视觉质量的改变,一定程度上证明了神经系统与光学系统的补偿关系。Sabesan 等<sup>[39]</sup>研究证明了圆锥角膜患者可以通过神经系统补偿长期存在的像差,从而减少角膜形态不规则对于主观视觉质量的影响。Rouger 等<sup>[40]</sup>近期研究发现,圆锥角膜患者的神经系统补偿可提高完成日常需要的视觉任务的能力,如精细阅读的能力。Sabesan 等<sup>[41]</sup>研究发现,矫正圆锥角膜患者的高阶像差后并不能立即使患者获得较高的主观视觉质量,原因可能是神经系统对长期存在的像差产生补偿适应。

神经系统会对光学系统成像的光学信号转化为生物电信号并在大脑视觉中枢进行分析处理,最终人脑产生对外界的主观视觉感受,神经系统对于视网膜像的处理能力所产生的对主观视觉质量的影响不可忽略。通过对比敏感度与调制传递函

数计算得到的神经对比敏感度可以较好地描述神经系统对于主观视觉质量的作用<sup>[42]</sup>。单一的评价指标难以评价不同视觉环境下的视觉表现,不同视觉任务需要不同的评价指标。

Charman 等<sup>[43]</sup>研究发现,对全眼像差进行矫正后,虽然高阶像差维持在一个较低水平,但是仍然难以使其达到较好的自然人眼水平。由于神经系统对于人眼光学系统的补偿作用,我们需要一种新的评价指标来评估视觉质量<sup>[44]</sup>,不宜仅单纯地用物理光学中光学系统成像质量的评价指标来表示<sup>[38]</sup>。在进行屈光手术优化设计以及用角膜接触镜矫正高阶像差时需要考虑神经系统的补偿作用<sup>[30,41]</sup>。

随着近些年对于视觉神经系统认识的不断加深,通过训练神经系统来提高视觉质量有着较大的应用潜力。人脑视觉神经系统对于视网膜图像的感知处理能力尚不明确,需要进一步研究视觉神经系统对于像差的补偿作用,以及眩光、光晕、低对比度视力下降等视觉缺陷与神经系统的关系,从而对临床视觉矫正做出指导。

### 5 展望

随着对人眼像差认识的深入,光学矫正的理念不断更新。未来在深入研究及大量循证医学证实之后或许可以根据各像差之间、人眼不同结构之间以及神经系统与光学系统之间的补偿特性对像差进行更加个性化地矫正,通过矫正设计的优化使患者获得最佳的视觉质量。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- [1] Schwarz C, Manzanera S, Artal P. Binocular visual performance with aberration correction as a function of light level[J/OL]. J Vis, 2014, 14(14):6[2021-04-20]. <https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2213075>. DOI:10.1167/14.14.6.
- [2] Marsack JD, Thibos LN, Applegate RA. Metrics of optical quality derived from wave aberrations predict visual performance[J]. J Vis, 2004, 4(4):322-328. DOI:10.1167/4.4.8.
- [3] Wen D, McAlinden C, Flitcroft I, et al. Postoperative efficacy, predictability, safety, and visual quality of laser corneal refractive surgery: a network meta-analysis[J]. Am J Ophthalmol, 2017, 178:65-78. DOI:10.1016/j.ajo.2017.03.013.
- [4] Artal P, Manzanera S, Piers P, et al. Visual effect of the combined correction of spherical and longitudinal chromatic aberrations[J]. Opt Express, 2010, 18(2):1637-1648. DOI:10.1364/OE.18.001637.
- [5] Thibos LN, Hong X, Bradley A, et al. Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2002, 19(12):2329-2348. DOI:10.1364/josaa.19.002329.
- [6] Li S, Xiong Y, Li J, et al. Effects of monochromatic aberration on visual acuity using adaptive optics[J]. Optom Vis Sci, 2009, 86(7):868-874. DOI:10.1097/OPX.0b013e3181adfdff.
- [7] Applegate RA, Sarver EJ, Khemsara V. Are all aberrations equal? [J]. J Refract Surg, 2002, 18(5):S556-562.
- [8] Young LK, Love GD, Smithson HE. Different aberrations raise contrast thresholds for single-letter identification in line with their effect on cross-correlation-based confusability[J/OL]. J Vis, 2013, 13(7):12[2021-04-13]. <https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2121401>. DOI:10.1167/13.7.12.
- [9] Gyltenkerne A, Ivarsen A, Hjortdal JØ. Comparison of corneal shape changes and aberrations induced by FS-LASIK and SMILE for myopia[J]. J Refract Surg, 2015, 31(4):223-229. DOI:10.3928/1081597X-20150303-01.
- [10] Vestergaard AH, Grauslund J, Ivarsen AR, et al. Efficacy, safety,

- predictability, contrast sensitivity, and aberrations after femtosecond laser lenticule extraction [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2014, 40 (3) : 403-411. DOI:10.1016/j.jcrs.2013.07.053.
- [11] Roberts C. The cornea is not a piece of plastic [J]. *J Refract Surg*, 2000, 16 (4) : 407-413.
- [12] 刘淑娟,侯杰,张乐乐,等. SMILE 手术矫治中高度近视术后角膜上皮重塑及其与屈光度的关系 [J]. *眼科新进展*, 2017, 37 (11) : 1060-1063. DOI:10.13389/j.cnki.rao.2017.0268.  
Liu SJ, Hou J, Zhang LL, et al. Corneal epithelial remodeling and its relationship with diopter after SMILE for moderate and high myopia [J]. *Rec Adv Ophthalmol*, 2017, 37 (11) : 1060-1063. DOI:10.13389/j.cnki.rao.2017.0268.
- [13] Hastings GD, Marsack JD, Nguyen LC, et al. Is an objective refraction optimised using the visual Strehl ratio better than a subjective refraction? [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2017, 37 (3) : 317-325. DOI:10.1111/opo.12363.
- [14] Cheng X, Bradley A, Thibos LN. Predicting subjective judgment of best focus with objective image quality metrics [J]. *J Vis*, 2004, 4 (4) : 310-321. DOI:10.1167/4.4.7.
- [15] Ravikumar A, Applegate RA, Shi Y, et al. Six just-noticeable differences in retinal image quality in 1 line of visual acuity: toward quantification of happy versus unhappy patients with 20/20 acuity [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2011, 37 (8) : 1523-1529. DOI:10.1016/j.jcrs.2011.02.034.
- [16] Cheng X, Bradley A, Ravikumar S, et al. Visual impact of Zernike and Seidel forms of monochromatic aberrations [J]. *Optom Vis Sci*, 2010, 87 (5) : 300-312. DOI:10.1097/OPX.0b013e3181d95217.
- [17] Koh S, Higashiura R, Maeda N. Overview of objective methods for assessing dynamic changes in optical quality [J]. *Eye Contact Lens*, 2016, 42 (5) : 333-338. DOI:10.1097/ICL.0000000000000232.
- [18] Applegate RA, Marsack JD, Ramos R, et al. Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003, 29 (8) : 1487-1495. DOI:10.1016/s0886-3350(03)00334-1.
- [19] 李晓晶,王雁,吴雅楠,等. 角膜前、后表面像差在近视及近视散光人眼中的分布特点及补偿机制的初步研究 [J]. *中华眼科杂志*, 2016, 52 (11) : 840-849. DOI:10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2016.11.008.  
Li XJ, Wang Y, Wu YN, et al. Distribution and compensation mechanism of aberrations between anterior and posterior surface of the cornea in myopia and myopic astigmatism eyes [J]. *Chin J Ophthalmol*, 2016, 52 (11) : 840-849. DOI:10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2016.11.008.
- [20] 侯杰,王雁,耿维莉,等. 近视眼角膜前、后表面不同范围非球面性及其与角膜球差的关系 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2012, 14 (6) : 352-356. DOI:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2012.06.008.  
Hou J, Wang Y, Geng WL, et al. Relationship between asphericity and spherical aberration of the human cornea with different corneal diameters [J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2012, 14 (6) : 352-356. DOI:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2012.06.008.
- [21] Dubbelman M, Sicam VA, van der Heijde RG. The contribution of the posterior surface to the coma aberration of the human cornea [J/OL]. *J Vis*, 2007, 7 (7) : 10.1-8 [2021-04-13]. <https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2193008>. DOI:10.1167/7.7.10.
- [22] Dubbelman M, Sicam VA, Van der Heijde GL. The shape of the anterior and posterior surface of the aging human cornea [J]. *Vision Res*, 2006, 46 (6-7) : 993-1001. DOI:10.1016/j.visres.2005.09.021.
- [23] 李晓晶,王雁,张琳. 2 mm 微切口 SMILE 术后近视矫治眼高阶像差的变化 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2015, 33 (2) : 142-148. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.02.010.  
Li XJ, Wang Y, Zhang L. Change of higher order aberration after 2 mm micro-incision SMILE in myopia [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2015, 33 (2) : 142-148. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.02.010.
- [24] Mrochen M, Jankov M, Bueeler M, et al. Correlation between corneal and total wavefront aberrations in myopic eyes [J]. *J Refract Surg*, 2003, 19 (2) : 104-112.
- [25] Kelly JE, Mihashi T, Howland HC. Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye [J]. *J Vis*, 2004, 4 (4) : 262-271. DOI:10.1167/4.4.2.
- [26] Calossi A. Corneal asphericity and spherical aberration [J]. *J Refract Surg*, 2007, 23 (5) : 505-514.
- [27] Artal P, Berrio E, Guirao A, et al. Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age [J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2002, 19 (1) : 137-143. DOI:10.1364/josaa.19.000137.
- [28] Marcos S. Are changes in ocular aberrations with age a significant problem for refractive surgery? [J]. *J Refract Surg*, 2002, 18 (5) : S572-578.
- [29] Jahnke M, Wirbelauer C, Pham DT. Influence of age on optical aberrations of the human eye [J]. *Ophthalmologie*, 2006, 103 (7) : 596-604. DOI:10.1007/s00347-006-1361-4.
- [30] Benito A, Redondo M, Artal P. Laser in situ keratomileusis disrupts the aberration compensation mechanism of the human eye [J]. *Am J Ophthalmol*, 2009, 147 (3) : 424-431. DOI:10.1016/j.ajo.2008.09.027.
- [31] Tan J, Simon D, Mrochen M, et al. Clinical results of topography-based customized ablations for myopia and myopic astigmatism [J]. *J Refract Surg*, 2012, 28 (11 Suppl) : S829-836. DOI:10.3928/1081597x-20121005-04.
- [32] Holland S, Lin DT, Tan JC. Topography-guided laser refractive surgery [J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2013, 24 (4) : 302-309. DOI:10.1097/ICU.0b013e3283622a59.
- [33] Feng Y, Yu J, Wang Q. Meta-analysis of wavefront-guided vs. wavefront-optimized LASIK for myopia [J]. *Optom Vis Sci*, 2011, 88 (12) : 1463-1469. DOI:10.1097/OPX.0b013e3182333a50.
- [34] Lin DT, Holland S, Tan JC, et al. Clinical results of topography-based customized ablations in highly aberrated eyes and keratoconus/ectasia with cross-linking [J]. *J Refract Surg*, 2012, 28 (11 Suppl) : S841-848. DOI:10.3928/1081597x-20121005-06.
- [35] Zhao H, Dai GM, Chen L, et al. Spherical aberrations of human astigmatic corneas [J]. *J Refract Surg*, 2011, 27 (11) : 846-848. DOI:10.3928/1081597X-20111005-05.
- [36] Rae SM, Price HC. The effect of soft contact lens wear and time from blink on wavefront aberration measurement variation [J]. *Clin Exp Optom*, 2009, 92 (3) : 274-282. DOI:10.1111/j.1444-0938.2009.00377.x.
- [37] Chen L, Artal P, Gutierrez D, et al. Neural compensation for the best aberration correction [J]. *J Vis*, 2007, 7 (10) : 9.1-9. DOI:10.1167/7.10.9.
- [38] Artal P, Chen L, Fernández EJ, et al. Neural compensation for the eye's optical aberrations [J]. *J Vis*, 2004, 4 (4) : 281-287. DOI:10.1167/4.4.4.
- [39] Sabesan R, Yoon G. Neural compensation for long-term asymmetric optical blur to improve visual performance in keratoconic eyes [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2010, 51 (7) : 3835-3839. DOI:10.1167/iovs.09-4558.
- [40] Rouger H, Benard Y, Gatinel D, et al. Visual tasks dependence of the neural compensation for the keratoconic eye's optical aberrations [J]. *J Optom*, 2010, 3 (1) : 60-65. DOI:10.3921/joptom.2010.60.
- [41] Sabesan R, Yoon G. Visual performance after correcting higher order aberrations in keratoconic eyes [J/OL]. *J Vis*, 2009, 9 (5) : 6.1-10 [2021-04-19]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4849480/>. DOI:10.1167/9.5.6.
- [42] Michael R, Guevara O, de la Paz M, et al. Neural contrast sensitivity calculated from measured total contrast sensitivity and modulation transfer function [J]. *Acta Ophthalmol*, 2011, 89 (3) : 278-283. DOI:10.1111/j.1755-3768.2009.01665.x.
- [43] Charman WN, Chateau N. The prospects for super-acuity: limits to visual performance after correction of monochromatic ocular aberration [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2003, 23 (6) : 479-493. DOI:10.1046/j.1475-1313.2003.00132.x.
- [44] Rouger H, Benard Y, Legras R. Effect of monochromatic induced aberrations on visual performance measured by adaptive optics technology [J]. *J Refract Surg*, 2010, 26 (8) : 578-587. DOI:10.3928/1081597X-20090901-01.

(收稿日期:2021-04-25 修回日期:2021-10-08)

(本文编辑:刘艳 施晓萌)