

近视眼角膜生物力学特性与角膜高阶像差的相关性

张耀花 王雁 窦瑞 危平辉

300020 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 天津市眼科学与视觉科学重点实验室

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

DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2018.05.009

【摘要】 **目的** 探讨近视患者角膜生物力学特性与角膜高阶像差(HOAs)的相关性。**方法** 采用回顾性病例观察研究。收集 2015 年 1—10 月在天津市眼科医院屈光手术中心就诊的近视及近视散光患者 263 例 263 眼的病例资料,均取右眼进行分析。应用可视化角膜生物力学分析仪(Corvis ST)对患者的角膜形变参数,包括第 1 次压平时间(A1T)、第 1 次压平长度(A1L)、第 1 次压平速度(A1V)、第 2 次压平时间(A2T)、第 2 次压平长度(A2L)、第 2 次压平速度(A2V)、产生最大压陷的时间(HCT)、最大压陷时的变形幅度(HCDA)、最大压陷时的峰距(HCPD)、最大压陷时的反向曲率半径(HCR)和非接触式眼压(IOPnct)等进行测量和分析;应用 Pentacam 眼前节分析系统测量中央角膜厚度(CCT)和 6 mm 直径范围的角膜前表面、后表面和全角膜垂直彗差、水平彗差、y 向三叶草像差、x 向三叶草像差、初级球差、总均方根(总 RMS)、HOAs 均方根(HOAs RMS)等 HOAs。应用 Pearson 线性相关分析和多元逐步线性回归模型进行数据分析。**结果** 近视眼的角膜生物力学特性与角膜 HOAs 间存在相关性;A1L 与角膜前表面的初级球差、HOAs RMS,后表面的总 RMS、HOAs RMS 以及全角膜的 HOAs RMS 间均呈负相关(均 $P < 0.05$);HCR 与角膜前表面、全角膜总 RMS 均呈负相关(均 $P < 0.05$)。A2V 与多种像差均相关。多元逐步线性回归模型分析显示,角膜前表面像差和全角膜像差与角膜生物力学参数间的相关性较弱,角膜后表面像差与角膜生物力学参数间的相关性相对较强。**结论** 近视眼的角膜生物力学特性与角膜 HOAs 间存在相关性,角膜生物力学特性的变化主要与角膜后表面像差相关联,其或许有助于我们对早期圆锥角膜或扩张性角膜疾患的早期诊断。

【关键词】 角膜生物力学特性; 像差; 视觉质量

基金项目: 国家自然科学基金项目(81670884、81470658)

Correlation analysis between corneal biomechanical properties and high-order aberration in myopia Zhang Yaohua, Wang Yan, Dou Rui, Wei Pinghui

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

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

【Abstract】 **Objective** To investigate the correlations between corneal biomechanical properties and corneal high-order aberrations (HOAs) in myopic eyes. **Methods** In this retrospective study, 263 right eyes with myopia or myopic astigmatism were enrolled from January to October 2015 in Tianjin Eye Hospital. The values of first applanation time (A1T), first applanation length (A1L), first applanation velocity (A1V), second applanation time (A2T), second applanation length (A2L), second applanation velocity (A2V), highest concavity time (HCT), highest concavity deformation amplitude (HCDA), highest concavity peak distance (HCPD), highest concavity radius (HCR) and non-contact intraocular pressure (IOPnct) were measured using the corneal visualization Scheimpflug technology (Corvis ST). The central corneal thickness (CCT) and wavefront aberrations of the anterior, posterior surface, and the total cornea were measured with Pentacam. Pearson correlation and stepwise multivariate linear regression analysis were applied to analyze the correlations between biomechanical properties and corneal HOAs. This study follows the Helsinki declaration. The experiment was approved by the Ethic Committee of Tianjin Eye Hospital. Informed consent was signed from each patient. **Results** There was a correlation between biomechanical properties and corneal HOAs. Negative correlations were found between A1L and the spherical aberration, HOAs RMS of anterior surface, total RMS and HOAs RMS of the posterior surface and HOAs RMS of the total cornea ($P < 0.05$). HCRs were negatively correlated with total RMS of the total cornea and the anterior surface ($P < 0.05$). The A2V was correlated with various aberrations. Multiple stepwise linear regression model analysis showed that, the correlation between the aberrations of anterior surface and biomechanical parameters, and the correlations between the total corneal aberration and biomechanical parameters were weak, the correlations between the aberrations of posterior surface and

biomechanical parameters were strong. **Conclusions** There is a correlation between the biomechanical properties and corneal HOAs. The changes of the corneal biomechanical properties are mainly associated with the posterior corneal aberrations, which may contribute to the early diagnosis of subclinical keratoconus or dilated corneal disease.

[**Key words**] Corneal biomechanical properties; Aberration; Visual quality

[**Fund program**] National Natural Science Foundation of China (81670884, 81470658)

随着屈光手术的逐步发展,如今的角膜屈光手术具有良好的安全性、有效性和长期稳定性^[1],使得越来越多的人选择其来矫正视力,然而术后暗视力下降、眩光、光晕等视觉质量问题也随之而来。研究显示,波前像差与视觉质量密切相关^[2]。角膜组织是生物黏弹性材料,其生物力学特性是维持角膜正常形态的基础;而角膜像差由角膜的自身的形状以及表面存在的不规则性所决定,有研究表明,部分像差与中央角膜厚度(corneal central thickness, CCT)存在相关性^[3],角膜像散和球差与眼压间也有明显的相关性^[3-5],提示我们角膜像差可能与其生物力学特性有关。目前,近视眼角膜生物力学特性与高阶像差(high-order aberrations, HOAs)的关系尚不清楚。本研究对近视眼角膜生物力学特性和 HOAs 的相关性进行探讨。

1 资料与方法

1.1 一般资料

采用回顾性病例观察研究。收集 2015 年 1—10 月在天津市眼科医院屈光手术中心就诊的行角膜屈光手术的近视及近视散光患者 263 例 263 眼的病例资料,均选取右眼进行分析,其中男 132 例 132 眼,女 131 例 131 眼;年龄 18 岁~46 岁,平均(23.24±5.79)岁;等效球镜度(spherical equivalent, SE)为-9.25~-1.13 D,平均(-5.38±1.67)D; CCT 为 475~614 μm,平均(538.83±28.77) μm; Km 为 39.50~47.30 D,平均(43.15±1.32)D。纳入标准:年龄≥18 岁;角膜形态正常,角膜透明无云翳或斑翳;2 年内屈光度数稳定(每年屈光度变化量≤0.5 D);停戴软性角膜接触镜≥2 周,停戴硬性角膜接触镜≥1 个月;接受 Pentacam 三维眼前节分析诊断系统和可视化角膜生物力学分析仪(corneal visualization scheimpflug technology, Corvis ST)检查者。排除标准:有眼部活动性疾病者;曾有眼部手术史或外伤史者;患全身结缔组织疾病或自身免疫性疾病者;术后有干眼、泪膜异常及其他严重的并发症者。本研究遵守赫尔辛基宣言,并获得天津市眼科医院伦理委员会认证和批准(批文号:TJYYLL-2014-21),所有患者术前均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 Corvis ST 检查 Corvis ST 采用气冲冲压技术

引起角膜压陷形变,同时借助 Scheimpflug 高速相机(4 330 帧/s)实时动态记录角膜中央水平截面的形变全过程,经系统软件分析后慢动作显示在控制板上,从而获得角膜形变参数。角膜形变参数包括:第 1 次压平时间(first applanation time, A1T)、第 1 次压平长度(first applanation length, A1L)、第 1 次压平速度(first applanation velocity, A1V)、第 2 次压平时间(second applanation time, A2T)、第 2 次压平长度(second applanation length, A2L)、第 2 次压平速度(second applanation velocity, A2V)、产生最大压陷的时间(highest concavity time, HCT)、最大压陷时的变形幅度(highest concavity deformation amplitude, HCDA)、最大压陷时的峰距(highest concavity peak distance, HCPD)、最大压陷时的反向曲率半径(highest concavity radius, HCR)和非接触式眼压(non-contact intraocular pressure, IOPnct)等,保留每眼 3 次测量质量“OK”的结果,取平均值用于计算和分析。

1.2.2 Pentacam 眼前节分析系统检查 Pentacam 眼前节分析系统采用 360° 旋转式 Scheimpflug 摄像扫描原理,对角膜前表面、后表面的形态参数进行测量和获取。于暗室环境中,受检者双眼自然睁开注视指示灯,检查者每次对焦完毕开始扫描时嘱受检者尽量睁大双眼,以保证角膜不被睫毛或者眼睑遮挡。测量 CCT 和 6 mm 直径范围的角膜 HOAs,重复测量,选取成像质量最佳的图像进行数据采集。应用 Pentacam 眼前节分析系统测量 6 mm 直径范围的角膜前表面、后表面和全角膜垂直彗差、水平彗差、y 向三叶草像差、x 向三叶草像差、初级球差、总均方根(总 RMS)、HOAs 均方根(RMS HOAs)等 HOAs。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 23.0 统计学软件进行统计分析。本研究检测数据经 Kolmogorov-Smirnov 检验证实呈正态分布,以 $\bar{x} \pm s$ 表示。应用 Pearson 或 Spearman 分析法进行数据间相关性检验;采用多元逐步线性回归模型分析建立角膜生物力学参数与角膜像差的回归方程。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 近视眼角膜生物力学参数特点

Corvis ST 测得的近视眼角膜生物力学参数如下: A1T 为 7.01 ~ 8.07 ms, 平均(7.43±0.21)ms; A1L 为 1.64 ~ 1.89 mm, 平均(1.81±0.05)mm; A1V 为 0.10 ~ 0.18 m/s, 平均(0.15±0.01)m/s; A2T 为 21.09 ~ 22.58 ms, 平均(21.83±0.30)ms; A2L 为 1.10 ~ 2.17 mm, 平均(1.77±0.20)mm; A2V 为 -0.25 ~ -0.57 m/s, 平均(-0.38±0.05)m/s; HCT 为 15.36 ~ 17.56 ms, 平均(16.53±0.35)ms; HCPD 为 2.46 ~ 5.55 mm, 平均(4.64±0.68)mm; HCR 为 5.99 ~ 11.12 mm, 平均(7.79±0.75)mm; HCDA 为 0.81 ~ 1.28 mm, 平均(1.03±0.08)mm; IOPnct 为 8.83 ~ 18.33 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa), 平均(12.96±2.06)mmHg。

SE 与 A2L 和 A2V 均呈正相关($r = 0.141, P = 0.022; r = 0.151, P = 0.014$), 与 CCT、HCPD 和 HCDA 均呈负相关($r = -0.125, P = 0.042; r = -0.130, P = 0.035; r = -0.154, P = 0.012$); IOPnct 与 CCT、A1T、

A2V 和 HCR 均呈正相关($r = 0.265, r = 0.915, r = 0.438, r = 0.238$; 均 $P < 0.001$), 与 A1V、A2T、HCT、HCPD 和 HCDA 均呈负相关($r = -0.410, P < 0.001; r = -0.794, P < 0.001; r = -0.263, P < 0.001; r = -0.181, P = 0.003; r = -0.690, P < 0.001$); CCT 与 A1T、A1L、A2L、A2V 和 HCR 均呈正相关($r = 0.245, 0.276, 0.282, 0.272, 0.344$, 均 $P < 0.001$), 与 HCDA 呈负相关($r = -0.186, P = 0.002$)。

2.2 近视眼 HOAs 的特点

在 6 mm 角膜直径下, 角膜前表面像差、角膜后表面像差和全角膜像差见表 1。角膜前表面球差值均为正值, 后表面球差值均为负值, 全角膜的球差值小于前表面的球差值。SE 与角膜前表面水平彗差和全角膜水平彗差均呈负相关($r = -0.161, P = 0.009; r = -0.145, P = 0.019$) (表 1)。

表 1 角膜前表面像差、角膜后表面像差和全角膜像差 (μm)

像差	角膜前表面	范围	角膜后表面	范围	全角膜	范围
垂直彗差	-0.07±0.16	-0.51 ~ 0.40	-0.01±0.03	-0.10 ~ 0.07	-0.08±0.17	-0.52 ~ 0.39
水平彗差	-0.06±0.08	-0.26 ~ 0.20	0.01±0.02	-0.04 ~ 0.05	-0.06±0.09	-0.26 ~ 0.19
y 向三叶草像差	-0.03±0.09	-0.30 ~ 0.20	-0.04±0.04	-0.18 ~ 0.08	-0.08±0.10	-0.38 ~ 0.22
x 向三叶草像差	-0.03±0.07	-0.23 ~ 0.21	0.02±0.04	-0.11 ~ 0.16	-0.01±0.08	-0.24 ~ 0.22
初级球差	0.24±0.07	0.06 ~ 0.42	-0.15±0.02	-0.22 ~ -0.10	0.19±0.07	0.02 ~ 0.39
总 RMS	1.70±0.52	0.62 ~ 3.36	0.82±0.13	0.53 ~ 1.27	1.48±0.51	0.41 ~ 3.19
HOAs RMS	0.36±0.07	0.22 ~ 0.66	0.19±0.03	0.13 ~ 0.28	0.37±0.09	0.20 ~ 1.06

注: RMS: 均方根; HOAs: 高阶像差

2.3 近视眼角膜生物力学特性与 HOAs 的相关性分析

采用多元逐步线性回归模型分析角膜生物力学参数与角膜像差间的相关性, 可得到角膜前表面、后表面和全角膜像差的回归方程, 可以看出角膜前表面和全角膜的像差与生物力学参数间的相关性较弱, 角膜后表面像差与生物力学参数间的相关性相对较强 (表 2~4)。

表 2 近视眼角膜前表面像差回归方程

前表面像差	回归方程	F 值	P 值	调整后 R ²
垂直彗差	-1.003+0.148 A1L	5.848	0.016	0.018
水平彗差	-0.518+0.140 A1L	5.217	0.023	0.016
y 向三叶草像差	-0.321+0.134 HCPD+0.124 CCT	4.682	0.010	0.027
x 向三叶草像差	-0.135-0.185 A2V	9.221	0.003	0.030
初级球差	0.429+0.162 IOPnct+0.148 A2L-0.134	5.932	0.001	0.053
总 RMS	3.653-0.236 HCR+0.171 A2V	5.197	0.023	0.052
HOAs RMS	1.158-0.256 A1L+0.161 A2V	12.490	0.000	0.081

注: A1L: 第 1 次压平长度; HCPD: 最大压陷时的峰距; CCT: 中央角膜厚度; A2V: 第 2 次压平速度; IOPnct: 非接触式眼压; A2L: 第 2 次压平长度; RMS: 均方根; HCR: 最大压陷时反向曲率半径; HOAs: 高阶像差 (多元逐步线性回归)

表 3 近视眼角膜后表面像差回归方程

后表面像差	回归方程	F 值	P 值	调整后 R ²
垂直彗差	0.028+0.147 A2V	5.740	0.017	0.018
水平彗差	0.039-0.182 HCR	8.939	0.003	0.029
y 向三叶草像差	0.062-0.130 CCT	4.511	0.035	0.013
初级球差	-0.505+0.480 A1L-0.192 A1V-0.116 A2L	26.571	0.000	0.226
总 RMS	2.498-0.371 A1L+0.122 A1V	21.669	0.000	0.136
HOAs RMS	-0.431-0.369 A1L+0.479 A2T+0.365 IOPnct	21.917	0.000	0.193

注: A2V: 第 2 次压平速度; HCR: 最大压陷时反向曲率半径; CCT: 中央角膜厚度; A1L: 第 1 次压平长度; A1V: 第 1 次压平速度; A2L: 第 2 次压平长度; RMS: 均方根; HOAs: 高阶像差; A2T: 第 2 次压平时间; IOPnct: 非接触式眼压 (多元逐步线性回归)

表 4 近视眼全角膜像差回归方程

全角膜像差	回归方程	F 值	P 值	调整后 R ²
垂直彗差	-1.227+0.173 A1L	8.038	0.005	0.026
x 向三叶草像差	-0.035-0.360 A2V-0.192 HCDA	9.584	0.000	0.061
初级球差	-0.359+0.195 A1T+0.122 A2L	8.424	0.000	0.054
总 RMS	-0.294-0.175 HCR+0.148 A1T	4.964	0.008	0.029
HOAs RMS	1.039-0.196 A1L	10.470	0.001	0.035

注: A1L: 第 1 次压平长度; A2V: 第 2 次压平速度; HCDA: 最大压陷时的变形幅度; A1T: 第 1 次压平时间; A2L: 第 2 次压平长度; RMS: 均方根; HCR: 最大压陷时的反向曲率半径; HOAs: 高阶像差 (多元逐步线性回归)

3 讨论

角膜是典型的非均质、各向异性的黏弹性组织器官, Corvis ST 可以测量角膜在气流脉冲下的动态形变过程, 从而通过角膜的形变参数间接而客观地反映角膜的张力、硬性、弹性和黏滞性等特点^[6]。波前像差又名波阵面像差, 是光线通过非理想状态的屈光介质时传输光程发生的改变, 其变形的出射波阵面与理想的球面之间形成的光程差^[7]。人眼像差主要由角膜像差和内部(主要是晶状体)像差组成, 而角膜像差又受很多因素的影响, 如年龄、角膜曲率、屈光度等^[8-9]。有关角膜曲率、屈光度和非球面系数(Q 值)等与像差间关系的研究已有很多^[10], 但是目前对于近视眼角膜生物力学特性与 HOAs 的关系尚不清楚。并且已有研究表明, 生物力学特性差的角膜, 屈光手术后的视觉质量变化更大, 而像差对人眼视觉质量的影响较为复杂, 3 阶和 4 阶像差对视觉质量的影响最大^[11-13], 故本研究中就近视眼角膜生物力学特性与 HOAs 的相关性进行研究, 以期对临床做出指导。

目前, 对于 CCT 和眼压与角膜 HOAs 的相关性尚无定论^[3,13]。本研究中通过多元逐步线性回归模型建立多个角膜生物力学参数与 HOAs 的回归方程, 可以看出近视眼的角膜生物力学特性与角膜 HOAs 间存在相关性: (1) A1L 与角膜前表面的初级球差、HOAs RMS、后表面的总 RMS、HOAs RMS 以及全角膜的 HOAs RMS 均呈负相关, 考虑是由于角膜达到第一次压平状态时角膜前表面压平长度越长, 表明角膜对外力的抵抗作用越强, 在外力作用下越不容易发生形变, 从而像差越小。A1L 越长的角膜, 力学特性越好, 角膜越不容易变形, 角膜前表面的球差越偏负, 而角膜后表面的球差越偏正, 考虑为角膜前、后表面像差补偿所致。(2) HCR 与角膜前表面和全角膜总 RMS 均呈负相关, 分析认为角膜达到最大压陷时角膜前表面曲率半径越大, 角膜越扁平, 表明角膜在外力作用下变形幅度越小, 从而像差越小。(3) 眼压增高时, 角膜前表面初级球差和后表面 HOAs RMS 均增大。刘丽清等^[14]认为眼压对角膜存在生物力学作用, 不同角膜部位随着眼压的增加向外扩张的程度不同, 从而使角膜前部形态发生改变, 对像差产生影响。(4) A2V 与多种像差均相关。已有研究表明, 亚临床期圆锥角膜患者的 HOAs 明显增加^[15-16], 并且魏升升等^[6]研究发现 A2V 与后表面最大高度间有明显的相关性, Ali 等^[17]研究也发现, 圆锥角膜患者的 A2V 与正常眼间有明显差异, 故考虑角膜生物力学的改变可能会影响像差发生

变化。研究表明, 角膜形态正常的患者, 其生物力学参数已经发生改变^[18]。本研究也发现角膜前表面和全角膜的像差与生物力学参数间的相关性较弱, 角膜后表面像差与生物力学参数间的相关性相对较强, 考虑角膜生物力学特性减弱后, 角膜在眼压作用下的形态改变主要先发生在角膜后表面, 并且有研究表明, 圆锥角膜的扩张首先发生于后表面^[19], 故角膜生物力学参数变化对于后表面的像差影响较大, Chen 等^[20]也表示圆锥角膜的角膜后表面像差显著高于正常角膜, 这或许有助于我们对早期圆锥角膜或扩张性角膜疾病的早期诊断。

以往研究认为, 角膜生物力学特性与 CCT 高度相关, CCT 越厚, 角膜对外力的抵抗作用越强, 在外力作用下越不容易发生形变^[21]。Qu 等^[3]也发现 CCT 与许多像差存在相关性, 但是像差的影响因素颇为复杂, 作用机制也尚需探讨。本研究中发现随着 CCT 的增加, 角膜前表面 y 向三叶草像差偏向正向, 而角膜后表面 y 向三叶草像差向负向发展, 具体机制尚不清楚, 需进一步研究; 而全角膜像差与 CCT 不相关。

通过对 Corvis ST 测得的各项参数做相关分析可以发现: (1) CCT 与 A1T、A1L、A2L、A2V 和 HCR 均呈正相关, 与窦瑞等^[22]的研究结果一致; CCT 与 HCDA 呈负相关, 陈开建等^[23]研究也发现高角膜厚度组 DA 值明显低于低角膜厚度组和中角膜厚度组。(2) IOPnct 与 CCT、A1T、A2V 和 HCR 均呈正相关, 与 A1V、A2T、HCT、HCPD 和 HCDA 均呈负相关, 也与窦瑞等^[22]的研究结果一致。所以, 较高眼压可能会掩盖异常角膜生物力学特性使 HCDA 测量结果正常^[13]。(3) 屈光度与 A2L 和 A2V 均呈正相关, 与 CCT、HCPD 和 HCDA 均呈负相关, Wang 等^[24]对研究对象按照屈光度数进行分组后发现, 高度近视与中度近视相比有更大的角膜变形幅度, 与本研究结果一致。

同时在本研究的像差分析中还可以看出, 角膜前表面、后表面和全表面 HOAs 中, 球差均为最大, 显示其对 HOAs 的贡献最大。角膜前表面球差值均为正值, 后表面球差值均为负值, 全角膜的球差值小于前表面的球差值, 考虑前表面与后表面球差间有补偿作用^[14]。彗差主要反映人眼屈光特性中的非对称性, 垂直彗差大于水平彗差, 考虑可能与上睑压迫有关^[25]。

综上所述, 角膜组织具有复杂的生物力学特性, 近视眼的角膜生物力学特性与角膜 HOAs 间存在相关性, 角膜生物力学特性的变化主要与角膜后表面像差相关联, 这或许有助于我们对早期圆锥角膜或扩张性角膜疾患的早期诊断和术前筛查, 个性化选择手术方

式以优化患者术后的视觉质量。但是像差受多种因素的影响,角膜生物力学特性只是其中一方面的因素,生物力学特性对像差影响的机制尚需进一步研究。

参考文献

- [1] Blum M, Flach A, Kunert KS, et al. Five-year results of refractive lenticule extraction[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2014, 40(9): 1425-1429. DOI: 10.1016/j.jcrs.2014.01.034.
- [2] Maeda N. Wavefront technology in ophthalmology [J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2001, 12(4): 294-299.
- [3] Qu J, Lu F, Wu J, et al. Wavefront aberration and its association with intraocular pressure and central corneal thickness in myopic eyes[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2007, 33(8): 1447-1454. DOI: 10.1016/j.jcrs.2007.04.012.
- [4] Mierdel P, Krinke HE, Pollack K, et al. Diurnal fluctuation of higher order ocular aberrations; correlation with intraocular pressure and corneal thickness[J]. *J Refract Surg*, 2004, 20(3): 236-242.
- [5] Ninn-Pedersen K. Relationships between preoperative astigmatism and corneal optical power, axial length, intraocular pressure, gender, and patient age[J]. *J Refract Surg*, 1996, 12(4): 472-482.
- [6] 魏升升, 李勇, 李晶, 等. 圆锥角膜与健康角膜生物力学的对比研究[J]. *中华眼科杂志*, 2016, 52(9): 669-673. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2016.09.007.
Wei SS, Li Y, Li J, et al. Corneal biomechanical properties in keratoconic and normal eyes[J]. *Chin J Ophthalmol* 2016, 52(9): 669-673. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2016.09.007.
- [7] 王雁. 波前像差与临床视觉矫正[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 109-118.
- [8] Nemeth G, Hassan Z, Szalai E, et al. Analysis of age-dependence of the anterior and posterior cornea with scheinplflug imaging[J]. *J Refract Surg*, 2013, 29(5): 326-331. DOI: 10.3928/1081597X-20130301-01.
- [9] Liang J, Williams DR. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 1997, 14(11): 2873-2883.
- [10] 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.
- [11] Wu W, Wang Y. The correlation analysis between corneal biomechanical properties and the surgically induced corneal high-order aberrations after small incision lenticule extraction and femtosecond laser in situ keratomileusis[J/OL]. *J Ophthalmol*, 2015, 2015: 758196 [2017-03-13]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4592923/>. DOI: 10.1155/2015/758196.
- [12] 王雁. 重视更新视觉新理念以不断提升角膜屈光手术后视觉质量[J]. *中华眼科杂志*, 2016, 52(1): 10-14. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2016.01.005.
Wang Y. Update the concepts on visual correction and enhance the visual quality after corneal refractive surgery[J]. *Chin J Ophthalmol*, 2016, 52(1): 10-14. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2016.01.005.
- [13] Wang L, Dai E, Koch DD, et al. Optical aberrations of the human anterior cornea[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003, 29(8): 1514-1521.
- [14] 刘丽清, 王雁, 杨福利, 等. 近视眼角膜高阶像差的特征及影响因素[J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2012, 14(10): 592-596. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2012.10.005.
- [15] Liu LQ, Wang Y, Yang FL, et al. An investigation on the characteristics and related factors of corneal higher-order aberration[J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2012, 14(10): 592-596. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2012.10.005.
- [16] Bühren J, Kook D, Yoon G, et al. Detection of subclinical keratoconus by using corneal anterior and posterior surface aberrations and thickness spatial profiles[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2010, 51(7): 3424-3432. DOI: 10.1167/iovs.09-4960.
- [17] Reddy JC, Rapuano CJ, Cater JR, et al. Comparative evaluation of dual Scheimpflug imaging parameters in keratoconus, early keratoconus, and normal eyes[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2014, 40(4): 582-592. DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.08.061.
- [18] Ali NQ, Patel DV, McGhee CN. Biomechanical responses of healthy and keratoconic corneas measured using a noncontact scheinplflug-based tonometer[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2014, 55(6): 3651-3659. DOI: 10.1167/iovs.13-13715.
- [19] Galletti JC, Pförtner T, Bonthoux FF. Improved keratoconus detection by ocular response analyzer testing after consideration of corneal thickness as a confounding factor[J]. *J Refract Surg*, 2012, 28(3): 202-208. DOI: 10.3928/1081597X-201210103-03.
- [20] Piñero DP, Alió JL, Alesón A, et al. Corneal volume, pachymetry, and correlation of anterior and posterior corneal shape in subclinical and different stages of clinical keratoconus[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2010, 36(5): 814-825. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.11.012.
- [21] Chen M, Yoon G. Posterior corneal aberrations and their compensation effects on anterior corneal aberrations in keratoconic eyes[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2008, 49(12): 5645-5652. DOI: 10.1167/iovs.08-1874.
- [22] Çevik SG, Kıvanç SA, Akova-Budak B, et al. Relationship among corneal biomechanics, anterior segment parameters, and geometric corneal parameters[J/OL]. *J Ophthalmol*, 2016, 2016: 8418613 [2017-04-06]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5099453/>. DOI: 10.1155/2016/8418613.
- [23] 窦瑞, 王雁, 李华. 单纯近视患者 Corvis ST 测定的角膜形变参数与角膜形态学参数的相关性[J]. *中华实验眼科杂志*, 2016, 34(9): 829-836. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.09.012.
Dou R, Wang Y, Li H. Correlations between the deformation parameters measured by Corvis ST and corneal morphology parameters in myopic patients[J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2016, 34(9): 829-836. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.09.012.
- [24] 陈开建, 阙秋霞, 白继, 等. Corvis 眼压测量及其与角膜生物力学特性的相关性[J]. *中华实验眼科杂志*, 2016, 34(2): 166-169. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.02.015.
Chen KJ, Kan QX, Bai J, et al. Corvis measurement of intraocular pressure and its relationship with corneal biomechanical properties[J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2016, 34(2): 166-169. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.02.015.
- [25] Wang J, Li Y, Jin Y, et al. Corneal biomechanical properties in myopic eyes measured by a dynamic scheinplflug analyzer[J/OL]. *J Ophthalmol*, 2015, 2015: 161869 [2017-03-13]. <https://www.hindawi.com/journals/joph/2015/161869/>. DOI: 10.1155/2015/161869.
- [26] 祖培培, 王雁, 王璐, 等. 近视眼角膜高阶像差特征及与全眼高阶像差的关系[J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2013, 15(3): 137-141. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2013.03.003.
Zu PP, Wang Y, Wang L, et al. The characteristics of corneal higher-order aberrations in myopia and the correlation between corneal and ocular higher-order aberrations[J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2013, 15(3): 137-141. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2013.03.003.

(收稿日期: 2017-06-23 修回日期: 2018-03-20)

(本文编辑: 刘艳)

读者 · 作者 · 编者

欢迎订阅《中华实验眼科杂志》

《中华实验眼科杂志》为中国科技论文统计源期刊、中国中文核心期刊,月刊,80面,每月10日出版,每期定价16元,邮发代号:36-13,国内外公开发售,欢迎到各地邮局或直接与本编辑部联系订阅。联系电话:0371-87160872。

(本刊编辑部)