

角膜生物力学与光密度相关性研究

李跃祖, 梁刚, 张洁莹, 张媛媛, 张晓帆, 李俊

引用: 李跃祖, 梁刚, 张洁莹, 等. 角膜生物力学与光密度相关性研究. 国际眼科杂志 2020;20(2):328-331

基金项目: 国家自然科学基金(No.81560169); 云南省科技厅-昆明医科大学应用基础研究联合专项面上项目[No.2019FE001(-096)]

作者单位: (650021) 中国云南省昆明市, 云南省第二人民医院眼科 昆明医科大学第四附属医院眼科 云南省眼科疾病防治重点实验室 云南省眼部疾病临床医学研究中心 云南省眼病临床医学中心

作者简介: 李跃祖, 硕士, 初级职称, 研究方向: 眼视光学。

通讯作者: 李俊, 博士, 副主任医师, 硕士研究生导师, 研究方向: 屈光手术及眼视光学. 549150685@qq.com

收稿日期: 2019-07-31 修回日期: 2020-01-07

摘要

目的: 探究角膜生物力学与角膜光密度的相关性。

方法: 前瞻性研究。选取 2019-03/06 在云南省第二人民医院拟行角膜屈光手术术前检查的患者为研究对象。采用 Pentacam HR 眼前节分析系统进行角膜光密度测量, 以角膜顶点为中心, 分为 0~2mm、>2~6mm、>6~10mm 直径范围 3 个区域, 以角膜厚度分为前、中、后 3 层。选取 Pentacam HR 中角膜最薄点厚度值纳入研究。采用 Corvis ST 角膜生物力学分析仪测量, 相关参数包括第一次压平的长度 (AP1L) 和速率 (AP1V)、第 2 次压平的长度 (AP2L) 和速率 (AP2V)、最大凹陷时顶点距离 (PD)、曲率半径 (HCR) 和形变幅度 (DA)。运用 Pentacam & Corvis ST 生物力学联合诊断平台软件综合分析检查结果, 得出综合角膜生物力学参数 (CBI) 以及其它独立参数包括硬度参数 (SP)、综合半径 (IR)、Ambrosio 相关厚度-水平方向 (ARTh)、形变幅度比 (DAR)。各区域光密度间差异采用方差分析, 角膜生物力学各项参数与各区域光密度的相关性采用 Pearson 或 Spearman 分析。

结果: 不同直径范围、不同层面间光密度有差异 ($F = 35.101, P < 0.01$; $F = 1002.897, P < 0.01$), CBI 与独立生物力学参数中 AP2L、AP2V、PD、DA、SP、IR、ARTh、DAR 具有相关性 ($r_s = -0.502, P < 0.01$; $r_s = -0.457, P = 0.001$; $r_s = 0.428, P = 0.002$; $r_s = 0.539, P < 0.01$; $r_s = -0.687, P < 0.01$; $r_s = 0.716, P < 0.01$; $r_s = -0.728, P < 0.01$; $r_s = 0.750, P < 0.01$)。CBI 与角膜 0~2mm 范围内光密度呈正相关 ($r = 0.343, P = 0.015$)。0~2mm 范围内光密度与独立生物力学参数中 AP2L、IR、ARTh、DAR 有相关性 ($r_s = -0.298, P = 0.035$; $r_s = 0.368, P = 0.009$; $r_s = -0.419, P = 0.002$; $r_s = 0.493, P < 0.01$)。

结论: 角膜中央区域光密度与角膜生物力学具有显著的关联, 临床中可以通过光密度和生物力学对角膜健康状况进行综合评价。

关键词: 角膜生物力学; 角膜光密度; 相关性

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2020.2.32

Correlation between corneal biomechanics and corneal densitometry

Yue-Zu Li, Gang Liang, Jie-Ying Zhang, Yuan-Yuan Zhang, Xiao-Fan Zhang, Jun Li

Foundation items: Nation Natural Science Foundation of China(No.81560169); The Association Foundation Program of Yunnan Provincial Science and Technology Department with Kunming Medical University [No.2019FE001(-096)]

Department of Ophthalmology, the Second People's Hospital of Yunnan Province; Department of Ophthalmology, the 4th Affiliated Hospital, Kunming Medical University; Key Laboratory of Yunnan Province for the Prevention and Treatment of Ophthalmology; Clinical Research Center for Ocular Diseases of Yunnan Province; Yunnan Province Medical Center of Ocular Disease, Kunming 650021, Yunnan Province, China

Correspondence to: Jun Li. Department of Ophthalmology, the Second People's Hospital of Yunnan Province; Department of Ophthalmology, the 4th Affiliated Hospital, Kunming Medical University; Key Laboratory of Yunnan Province for the Prevention and Treatment of Ophthalmology; Clinical Research Center for Ocular Diseases of Yunnan Province; Yunnan Province Medical Center of Ocular Disease, Kunming 650021, Yunnan Province, China. 549150685@qq.com

Received: 2019-07-31 Accepted: 2020-01-07

Abstract

• AIM: To explore the correlation between corneal biomechanics and corneal densitometry.

• METHODS: Prospective study. Patients who examined before corneal refractive surgery in the Second People's Hospital of Yunnan Province from March 2019 to June 2019 were selected as research objects. Pentacam HR system was used to evaluate corneal densitometry. The corneal was divided into three areas around the corneal apex with diameters of 0-2mm, >2-6mm, >6-10mm, and the corneal thickness was divided into anterior, middle and posterior layers. The thinnest point thickness of cornea in Pentacam HR was selected to be included in the study. Corvis ST was used to measure the biomechanical parameters, including the first applanation length (AP1L) and applanation velocity (AP1V), the second applanation length (AP2L) and applanation velocity (AP2V), the highest concavity peak distance (PD), highest concavity radius (HCR) and deformation amplitude (DA). Pentacam & Corvis ST comprehensive diagnostic platform software was used to comprehensively analyze the examination results and obtain comprehensive corneal biomechanical parameters (CBI), as well as other

independent parameters including stiffness parameters (SP), integrated radius (IR), Ambrosio relational thickness-horizonal (ARTh) and deformation amplitude ratio (DAR). Variance analysis was used for the difference of corneal densitometry in each region, the correlation between corneal biomechanical parameters and corneal densitometry was analyzed by Pearson or Spearman.

• **RESULTS:** The difference of optical density between different diameter ranges and different layers was statistically significant ($F=35.101, P<0.01$; $F=1002.897, P<0.01$), CBI was correlated with AP2L, AP2V, PD, DA, SP, IR, ARTh and DAR in the independent biomechanical parameters ($r_s = -0.502, P<0.01$; $r_s = -0.457, P=0.001$; $r_s = 0.428, P=0.002$; $r_s = 0.539, P<0.01$; $r_s = -0.687, P<0.01$; $r_s = 0.716, P<0.01$; $r_s = -0.728, P<0.01$; $r_s = 0.750, P<0.01$). CBI was positively correlated with optical density within the range of 0-2mm ($r = 0.343, P = 0.015$). The corneal densitometry within a range of 0-2mm is correlated with AP2L, IR, ARTh and DAR in independent biomechanical parameters ($r_s = -0.298, P=0.035$; $r_s = 0.368, P=0.009$; $r_s = -0.419, P=0.002$; $r_s = 0.493, P<0.01$).

• **CONCLUSION:** There is a correlation between corneal biomechanics and corneal densitometry in the central region of cornea, which has a more significant correlation with the biomechanics.

• **KEYWORDS:** corneal biomechanics; corneal densitometry; correlation

Citation: Li YZ, Liang G, Zhang JY, et al. Correlation between corneal biomechanics and corneal densitometry. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2020;20(2):328-331

0 引言

角膜作为眼球组织结构的一部分,起到保护眼内组织,应对眼内容物压力,维持眼球形态的作用,同时是眼球的主要屈光介质,承担了眼屈光系统中43D左右的屈光力。角膜特有的生物力学特性和光学特性,均基于角膜各层组织结构的完整和功能的正常,其中角膜基质层厚度占角膜厚度的90%,主要由I型胶原纤维和细胞外基质组成,其规则有序的排列可使98%的入射光线通透,使角膜呈相对透明状态,同时赋予了角膜弹性、张力及硬度的生物力学特性^[1]。目前多有单独针对角膜光密度、角膜生物力学的研究,认为两项指标均可以作为评价角膜健康状况、辅助疾病诊断的有效参考,但缺乏关于角膜生物力学与角膜光密度之间相互关系的研究。

Pentacam HR眼前节分析系统和可视化角膜生物力学分析仪 Corvis ST 均采用 Scheimpflug 图像采集技术,是临床中检查角膜形态,定量评价全角膜光密度,分析角膜生物力学的常用设备^[2-3]。近年来,将两项检查相结合分析的 Corvis ST & Pentacam 生物力学联合诊断平台(CP联合诊断平台)软件,可以同时同一患者的眼前节数据(包括角膜光密度)和生物力学数据进行综合分析,在以往单独 Corvis 角膜生物力学所提供的角膜压平宽度、时间、压陷幅度等指标的基础上,进一步为临床提供了直观的角膜生物力学指数(CBI)值。Vinciguerra 等^[4]研究显示,CBI 值对圆锥角膜诊断的敏感度和特异度可达98%以上。本研究旨

在借助此设备,探讨角膜光密度与角膜生物力学间的关系,并以此提高临床工作中相关疾病的诊疗技术。

1 对象和方法

1.1 **对象** 前瞻性研究。选取2019-03/06在我院眼科屈光中心检查的健康人群为研究对象。纳入标准:(1)年龄18~40岁;(2)除屈光不正外无其他眼部疾病的健康人群;(3)软性角膜接触镜停戴2wk以上、硬性角膜接触镜停戴4wk以上、角膜塑形镜停戴3mo以上;(4)角膜厚度500~600 μ m,眼压10~21mmHg,等效球镜-3.00~-8.00D。排除标准:(1)患有眼科其他疾病如青光眼、白内障、圆锥角膜、角膜炎症活动期或者存在眼底病变、视神经病变等;(2)角膜云翳、瘢痕、白斑;(3)有眼部手术史、外伤史;(4)患有全身结缔组织疾病、代谢性疾病以及自身免疫性疾病;(5)无法配合检查者。最终纳入患者26例50眼,其中男15例28眼,女11例22眼,年龄18~40(平均22.96 \pm 6.62)岁。本次研究经云南省第二人民医院伦理委员会审批通过,且所有受检者均已签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 **角膜光密度检测** 运用 Pentacam 三维眼前节分析诊断系统中光密度分析软件进行测量分析,此设备采用360°旋转式 Scheimpflug 摄像扫描原理,利用光学原理对角膜密度进行综合测量,重复测量3次,以从 Pentacam 三维眼前节分析诊断系统上获取成像质量最佳的图像进行数据采集。选取以角膜顶点为中心 ≤ 2 mm、 $>2 \sim 6$ mm、 $>6 \sim 10$ mm直径范围的角膜光密度平均值。设备还可得到的10~12mm直径范围角膜光密度值,但此范围测量值受到角膜直径、眼睑情况、测量误差等因素影响变异度较大,故不对其进行分析。依据不同的厚度层面将角膜分3层分析,前层为距离角膜前表面120 μ m的层面,后层为距离角膜后表面60 μ m的层面,中间层为前后层之间的组织。角膜光密度值用灰度值0~100表示,0为完全透明,100为完全混浊不透光。同时选取 Pentacam 中角膜最薄点厚度值纳入研究。

1.2.2 **角膜生物力学检查** Corvis ST 采用气冲印压技术引起角膜压陷形变,借助超高速 Scheimpflug 图像采集技术,实时动态记录角膜中央水平截面的形变全过程,经系统软件分析后获得角膜形变参数。重复测量3次,选取质量最好的一次作为最终测量结果,结果参数包括:第一次压平的长度(AP1L)和速率(APIV)、第2次压平的长度(AP2L)和速率(AP2V)、最大形变时顶点距离(PD)、曲率半径(HCR)和形变幅度(DA)。以上检查均在同一暗室内进行,且全部过程中所有受检者头部及设备扫描头均用同一块黑色遮光布完全遮盖,由同一名熟练技术人员进行操作。

1.2.3 **CP联合诊断平台分析** CP联合诊断平台可以将 Corvis ST 与 Pentacam HR 的检测数据传输至同一台计算机,通过综合分析软件,得出综合分析数据,其中反映角膜生物力学参数包括:CBI 以及其它独立参数包括硬度参数(SP)、综合半径(IR)、Ambrosio 相关厚度-水平方向(ARTh)、形变幅度比(DAR)。

统计学分析:采用统计学软件 SPSS19.0 进行分析。连续变量经单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验其正态性,符合正态分布的计量资料用均数 \pm 标准差表示,不服从正态分布的计量资料以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示。角膜光密度参数与

生物力学参数间相关性采用 Pearson 相关性或 Spearman 相关性分析。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 角膜厚度及各区域角膜光密度值 患者平均角膜厚度为 $544.90 \pm 25.89 \mu\text{m}$ 。0~2mm、>2~6mm、>6~10mm 各区域范围内光密度分别为 18.95 ± 0.84 、 17.00 ± 0.59 、 17.04 ± 2.06 ，各区域间光密度值差异有统计学意义 ($F = 35.101, P < 0.01$)；前、中、后各层光密度分别为 26.66 ± 2.18 、 16.20 ± 1.25 、 13.36 ± 1.01 ，各层次间光密度值差异有统计学意义 ($F = 1002.897, P < 0.01$)。

2.2 角膜生物力学指标 CBI 与独立生物力学参数 AP2L、AP2V、PD、DA、SP、IR、ARTh、DAR 有相关性 (均 $P < 0.05$, 表 1), 提示 CBI 值大小受多个独立生物力学参数共同影响。

2.3 CBI 与角膜光密度指标相关性分析 CBI 与 0~2mm 范围内角膜光密度值呈正相关 ($r = 0.343, P < 0.05$), 与其他区域和各层次光密度均无相关 ($P > 0.05$, 表 2)。

2.4 0~2mm 范围内光密度与生物力学参数相关性 0~2mm 范围内光密度与独立生物力学参数中的 AP2L、IR、ARTh、DAR 有相关性 ($r_s = -0.298, 0.368, -0.419, 0.493, P = 0.035, 0.009, 0.002, < 0.01$), 与 AP1L、AP1V、AP2V、PD、HCR、DA、SP 无相关性 ($r_s = -0.175, 0.065, -0.057, -0.030, -0.243, 0.132, -0.085, P = 0.225, 0.653, 0.693, 0.838, 0.089, 0.360, 0.559$, 表 3)。表明 AP2L、IR、ARTh、DAR 是 0~2mm 范围内光密度与 CBI 的共同影响因素, 二者通过这几项独立的生物力学指标而产生相关性。

3 讨论

角膜独特的生物力学取决于各层组织独特的结构特性, 其中基质层由致密排列有序的胶原纤维束薄板组成, 其厚度占角膜的 90%, 其中所含有的水份、胶原纤维、黏蛋白、糖蛋白等成分使角膜成为一种既坚韧又富于弹性的软组织结构^[5]。Elsheikh 等^[6]在人类供体眼中显示, 上皮对角膜硬度的贡献远低于基质的贡献, 基质层作为决定角膜生物力学性质的主要结构。有学者^[7-8]对圆锥角膜患者的观察发现, 在进行了角膜胶原交联术后, 角膜的生物力学发生了显著变化。另外在对多种角膜屈光手术的研究中^[9-11], 也发现在屈光手术后, 由于角膜基质的减少以及基质胶原的改变, 术后生物力学参数下降, 进一步说明基质层中的胶原纤维对角膜生物力学起着至关重要的作用。

Pentacam 系统通过对角膜 Scheimpflug 图像进行分析, 采用灰度值对角膜的透明性进行定量、定位评价, 使角膜光密度指标成为一种评价角膜健康状况的有效指标^[2]。角膜基质内胶原纤维整齐排列, 以及完整的角膜上皮和内皮细胞是保持角膜透明的重要因素, 其中胶原纤维的致密排列在角膜透明度中起到极其重要的作用^[12]。病理状态下, 角膜基质细胞由静止状态转变为活化状态, 分化为成纤维细胞和肌成纤维细胞, 导致透明度下降^[13], 表现在 Pentacam 光密度检测中即为光密度值增加。

角膜基质在角膜生物力学和角膜光密度方面均扮演着重要角色, 那么两种指标之间是否存在相互联系呢? Özyol 等^[14]运用 Pentacam 对糖尿病患者角膜光密度的观察显示, 糖尿病患者角膜中心 0~2mm 范围及前层光密度

表 1 CBI 与各独立生物力学参数相关性分析

独立生物力学参数	$\bar{x} \pm s$	CBI 0.02(0, 0.41)	
		r_s	P
AP1L(mm)	2.34±0.27	-0.042	0.771
AP1V(m/s)	0.12(0.11, 0.13)	0.191	0.185
AP2L(mm)	2.00±0.28	-0.502	<0.01
AP2V(m/s)	-0.24±0.03	-0.457	0.001
PD(mm)	4.71±0.28	0.428	0.002
HCR(mm)	6.58±0.70	-0.197	0.169
DA(mm)	0.95±0.09	0.539	<0.01
SP	113±15.03	-0.687	<0.01
IR	8.02±0.83	0.716	<0.01
ARTh	477.15±79.26	-0.728	<0.01
DAR	4.19±0.38	0.750	<0.01

表 2 CBI 与光密度相关性分析

区域	CBI	
	r	P
0~2mm	0.343	0.015
>2~6mm	0.065	0.652
>6~10mm	-0.084	0.563
前层	-0.074	0.608
中层	0.080	0.579
后层	0.129	0.372

表 3 0~2mm 光密度与各独立生物力学参数相关性分析

参数	0~2mm 光密度	
	r_s	P
AP1L	-0.175	0.225
AP1V	0.065	0.653
AP2L	-0.298	0.035
AP2V	-0.057	0.693
PD	-0.030	0.838
HCR	-0.243	0.089
DA	0.132	0.360
SP	-0.085	0.559
IR	0.368	0.009
ARTh	-0.419	0.002
DAR	0.493	<0.01

明显高于正常人, 并且光密度值随糖尿病病程延长而增加, 认为角膜光密度的变化可以被当作评估角膜病理生理超微结构变化的反应指标。同样是以糖尿病患者为研究对象的一项研究中, Pérez-Rico 等^[15]对运用 Corvis ST 对糖尿病患者角膜生物力学的研究表明, 糖尿病患者角膜生物力学参数中的众多指标与正常人具有显著差异。两项研究均认为, 其研究结果差异性的产生均与糖尿病患者角膜中糖基化终产物的累积导致的基质胶原结构变化, 角膜细胞活化和胶原纤维重排等一系列反应有关。

多项运用 Pentacam 对圆锥角膜光密度的研究^[16-18]发现, 圆锥角膜光密度高于正常人群, 亚临床圆锥角膜患者, 即使裂隙灯下未发现明显的角膜混浊等体征, 其角膜光密度也高于正常角膜, 尤其在角膜中央区域, 具有更高的光密度值。对于圆锥角膜生物力学的研究中^[19-21]也发现, 圆锥角膜的生物力学发生了明显的改变, 其硬度、粘滞力

等指标均较正常角膜明显降低。可见,在角膜相关疾病中,角膜光密度及其生物力学均发生了变化,均可以作为评价疾病的有效指标,且两项指标的变化存在部分共同的影响因素,然而这些研究均从单一角度进行研究,对角膜生物力学与光密度之间的关系未进行深入观察。本次研究结果显示,CBI值与角膜光密度的各项指标中的0~2mm范围内光密度具有相关性,此范围内的光密度与Corvis ST中AP2L、IR、ARTh、DAR具有相关性,由此,我们推断0~2mm范围内的光密度大小主要是与以上4项指标相互联系从而与CBI值大小产生相关性,尤其与IR、ARTh、DAR具有更高的相关性。在Corvis ST指标中,IR值越大,说明角膜抵抗形变能力越差,硬度越低。本次研究中0~2mm范围内光密度与IR呈正相关,也说明了当此范围内胶原纤维排列紊乱或发生其他结构变化时,角膜的硬度将降低。0~2mm范围内光密度与ARTh呈负相关。ARTh越小,说明角膜厚度由中央向周边的变化越快。Smolek^[22]认为,角膜中央的胶原纤维板层数量及排列较周边角膜少且松散,Boote等^[23]研究也显示角膜中央与角膜周边的胶原纤维分布不同,接近角膜周边的胶原纤维的排列方向以及直径和胶原之间的距离大于角膜中央部分的胶原纤维,排列规则均匀的角膜基质的胶原纤维之间可以互相抵消散射光线。故角膜中央厚度与周边厚度相差越大时,中央区域表现出更高的光密度值。0~2mm范围内光密度与DAR呈正相关,DAR为顶点和2mm位置之间的形变幅度比值,越大表面角膜受外力后中央发生形变越大,本次研究发现二者呈正相关,进一步说明中央基质胶原排列相对紊乱及松散在导致光密度增加的同时,中央区域硬度将更低,将发生更大的形变。

通常认为由于角膜前部基质细胞密度大于后部基质,故角膜前1/3基质抗张能力明显大于后2/3^[24]。本次研究显示,角膜前中后三层光密度逐渐降低,从光学角度验证了角膜基质细胞分布的特点,而这三层光密度值与生物力学指标之间没有显著相关性,说明角膜生物力学并非仅仅依靠某一层面的作用,而是通过各层组织间相互联系产生,其力学具有非线弹性的特性^[3],并且前层与后层光密度值分别只代表前120 μm 和后60 μm 的位置,不足以说明该位置范围内的总体水平。本次研究结果中的光密度值,在各区域各层面上与武志清等^[25]、Otri等^[2]观察结果均有明显差距,既往研究中多认为是由于不同研究对象的种族和地域差异造成。然而我们发现在既往关于光密度的检测时,多描述为在暗室中进行,对暗室环境实际光照度未给予明确描述,这可能是造成各研究结果中光密度值差异的一个因素。本次研究运用设备标配的遮光布,严格对检查过程进行遮光处理,所以患者检查时均处于相同的接近黑暗的环境中。

综上所述,本研究证实在角膜生物力学与光密度之间存在相关性,尤其是角膜中央区域光密度与生物力学具有更显著的关联,临床中可以通过对光密度和生物力学两方面对角膜健康状况进行综合评价,对角膜疾病提供多方面的诊断治疗参考。

参考文献

- 赵堪兴, 杨培增. 眼科学. 北京:人民卫生出版社 2013;23
- Otri AM, Fares U, Al-Aqaba MA, et al. Corneal densitometry as an indicator of corneal health. *Ophthalmology* 2012;119(3):501-508

- Kling S, Hafezi F. Corneal biomechanics—a review. *Ophthalmic Physiol Opt* 2017;37:240-252
- Vinciguerra R, Ambrósio R, Elsheikh A, et al. Detection of Keratoconus With a New Biomechanical Index. *J Refract Surg* 2016;32(12):803-810
- 许雅利, 邵雪丽, 金婉卿, 等. 角膜生物力学测量方法及临床应用. *国际眼科杂志* 2018;18(6):1055-1058
- Elsheikh A, Alhasso D, Rama P. Assessment of the epithelium's contribution to corneal biomechanics. *Exp Eye Res* 2008;86(2):445-451
- Vinciguerra R, Tzamalís A, Romano V, et al. Assessment of the Association Between *In Vivo* Corneal Biomechanical Changes After Corneal Cross-linking and Depth of Demarcation Line. *J Refract Surg* 2019;35(3):202-206
- Roberts CJ, Dupps WJ. Biomechanics of corneal ectasia and biomechanical treatments. *J Cataract Refract Surg* 2014;40(6):991-998
- Li H, Wang Y, Dou R, et al. Intraocular Pressure Changes and Relationship With Corneal Biomechanics After SMILE and FS-LASIK. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2016;57(10):4180-4186
- Khamar P, Shetty R, Vaishnav R, et al. Biomechanics of LASIK Flap and SMILE Cap: A Prospective, Clinical Study. *J Refract Surg* 2019;35(5):324-332
- Wu Z, Wang Y, Zhang J, et al. Comparison of corneal biomechanics after microincision lenticule extraction and small incision lenticule extraction. *Br J Ophthalmol* 2017;101(5):650-654
- Meek KM, Knupp C. Corneal structure and transparency. *Prog Retin Eye Res* 2015;49:1-16
- Toricelli AA, Wilson SE. Cellular and extracellular matrix modulation of corneal stromal opacity. *Exp Eye Res* 2014;129:151-160
- Özyol P, Özyol E. Assessment of Corneal Backward Light Scattering in Diabetic Patients. *Eye Contact Lens* 2018;44(1):S92-S96
- Pérez-Rico C, Gutiérrez-Ortiz C, González-Mesa A, et al. Effect of diabetes mellitus on Corvis ST measurement process. *Acta Ophthalmol* 2015;93(3):e193-198
- Lopes B, Ramos I, Ambrósio R. Corneal densitometry in keratoconus. *Cornea* 2014;33(12):1282-1286
- Koc M, Tekin K, Tekin MI, et al. A early finding of keratoconus: Increase in corneal densitometry. *Cornea* 2014;37(5):580-586
- 杨丹, 谷天瀑, 李颖, 等. 圆锥角膜的光密度分析. *眼科新进展* 2017;37(5):450-454
- 田磊, 王丽强, 孟晓丽, 等. 应用可视化角膜生物力学分析仪评估不同阶段圆锥角膜生物力学特征. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2014;16(5):268-273
- 吴元, 李晓丽, 晏晓明, 等. 基于 Corvis ST 的角膜生物力学参数在圆锥角膜诊断中的价值. *中华实验眼科杂志* 2018;36(2):130-134
- Fuchsluger TA, Brettl S, Geerling G, et al. Biomechanical assessment of healthy and keratoconic corneas (with/without crosslinking) using dynamic ultrahigh-speed Scheimpflug technology and the relevance of the parameter(A1L-A2L). *Br J Ophthalmol* 2019;103(4):558-564
- Smolek MK. Interlamellar cohesive strength in the vertical meridian of human eye bank corneas. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1993;34(10):2962-2969
- Boote C, Kamma-Lorger CS, Hayes S, et al. Quantification of collagen organization in the peripheral human cornea at micron-scale resolution. *Biophys J* 2011;101(1):33-42
- 张丰菊. 应加强角膜屈光术后角膜扩张的防范. *中华医学杂志* 2010;90(7):436-438
- 武志清, 王雁, 张琳, 等. 健康人眼角膜光密度分析及与眼内散射光的相关性研究. *中华眼科杂志* 2014;50(1):20-26