

·论著·

·生物力学·

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

田磊 王丽强 孟晓丽 吴莹 黄一飞

【摘要】 目的 应用可视化角膜生物力学分析仪(Corvis ST)比较圆锥角膜和正常角膜的生物力学特征,探讨角膜生物力学参数在圆锥角膜诊断中的作用及其相关影响因素。方法 病例对照研究。选取圆锥角膜患者 65 例(90 眼)(圆锥角膜组),并按照 Amsler-Krumeich 分级法分为轻度圆锥角膜 46 眼、中度圆锥角膜 23 眼和重度圆锥角膜 21 眼;选取正常角膜对照者 90 例(90 眼)作为正常角膜组。分别应用 Pentacam 眼前节分析系统测量眼前节形态参数;应用 Corvis ST 测量角膜生物力学参数。采用独立样本 t 检验、Wilcoxon 秩和检验、ANOVA、非参数检验对比各组眼前节形态参数及生物力学参数并分析各参数间的相关性,绘制受检者工作特征(ROC)曲线。结果 除前房角、第一压平长度、最大压陷时间和最大压陷屈膝峰间距外,圆锥角膜组其余眼前节形态参数和角膜生物力学参数与正常角膜组均有明显差异。ROC 曲线分析显示,所测量的生物力学参数中,角膜最大压陷深度对于圆锥角膜的诊断效率最高(曲线下面积 0.865、敏感度 84.5%、特异度 75.6%、截断点 1.14 mm),并且随着圆锥角膜严重程度的升级其诊断效率逐渐提高。在 2 组中角膜最大压陷深度与眼内压、中央角膜厚度和角膜中央 3 mm 内体积呈负相关(正常角膜组和圆锥角膜组,眼内压: $r=-0.707$ 、 -0.213 ;中央角膜厚度: $r=-0.219$ 、 -0.357 ;角膜中央:3 mm 内体积 $r=-0.212$ 、 -0.27 ; P 值均 <0.05)。结论 Corvis ST 能够有效测量角膜生物力学特征,其测量参数中角膜最大压陷深度对于圆锥角膜具有诊断意义,但其与眼内压和角膜厚度呈负相关,临床应用中需特别注意相关影响因素。

【关键词】 生物力学; 圆锥角膜; 可视化角膜生物力学分析仪; 最大压陷深度

Assessment of corneal biomechanical properties using corneal visualization Scheimpflug technology at different stages of keratoconus

Tian Lei, Wang Liqiang, Meng Xiaoli, Wu Ying, Huang Yifei. Department of Ophthalmology, Chinese PLA General Hospital, Medical School of Chinese PLA, Beijing 100853, China
Corresponding author: Huang Yifei, Email: huangyf301@gmail.com

【Abstract】 **Objective** To compare the corneal biomechanical properties of the corneas of keratoconic eyes and normal eyes using corneal visualization Scheimpflug technology (Corvis ST), and to investigate the role of corneal biomechanical parameters in the diagnosis of keratoconus. **Methods** Ninety keratoconic eyes from 65 patients and 90 normal eyes from 90 participants were enrolled in this comparative study. Based on the Amsler-Krumeich keratoconus stages, the keratoconic eyes were divided into a mild group (46 eyes), moderate group (23 eyes) and severe group (21 eyes). Tomography and biomechanical parameters of all eyes were obtained with the Pentacam and Corvis ST, respectively. All parameters were compared between the keratoconic and normal groups. The correlation between deformation amplitude and anterior segment parameters was also analyzed. An independent t test, Wilcoxon rank sum test, ANOVA, nonparameter test were used. The receiver operating characteristic (ROC) curves were plotted to distinguish keratoconus from the normal cornea. **Results** The tomography and biomechanical parameters of the keratoconic eyes were significantly different from those of normal eyes except for the anterior chamber angle, first applanation length, highest concavity time, and peak distance. The deformation amplitude (area under the curve: 0.865) was the best predictive parameter, with a sensitivity of 84.5%, specificity of 75.6% and cut-off point of 1.14 mm. The diagnostic efficiency of the deformation amplitude increased with an increase

DOI:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.05.003

基金项目:国家自然科学基金(81271052)

作者单位:100853 北京,中国人民解放军总医院 中国人民解放军医学院

通信作者:黄一飞,Email:huangyf301@gmail.com

in the severity of keratoconus. In both the normal and keratoconic groups, the deformation amplitude was negatively correlated with intraocular pressure, central corneal thickness, and corneal volume at 3 mm. The respective r values of the deformation amplitudes of the normal and keratoconic groups in regard to: intraocular pressure, -0.707 and -0.213 ; central corneal thickness, -0.219 and -0.357 ; and corneal volume at 3 mm, -0.212 and -0.27 . All P values were <0.05 . **Conclusion** Corvis ST offers an alternative method for measuring corneal biomechanical properties. The deformation amplitude has a high sensitivity for the diagnosis of keratoconus. The negative correlations with intraocular pressure and central corneal thickness deserve clinical attention.

【Key words】 Biomechanics; Keratoconus; Corneal visualization Scheimpflug technology; Deformation amplitude

圆锥角膜是一种不伴有炎症反应的以角膜基质层进行性变薄、向前突出,引起不规则近视散光 and 不同程度矫正视力下降为特征的疾病^[1]。其 90% 为双眼发病,病程进展往往不对称,且多为青少年发病^[2-3]。在疾病进展过程中,角膜前弹力层断裂,胶原纤维和胶原纤维间物质组成紊乱,比例失调。角膜中蛋白激酶和其他分解代谢酶含量水平增加,蛋白激酶抑制物含量水平降低,使得角膜交联结构破坏、角膜基质减少,导致角膜生物力学性能不稳定,机械强度减弱^[4-5]。因此通过评估角膜生物力学性能辅助诊断圆锥角膜成为最近研究的热点。

现在临床中在体生物力学的测量设备主要是眼反应分析仪(Ocular Response Analyzer,ORA,美国 Reichert 公司)。2005 年 Luce^[6]第一次介绍了 ORA 的应用方法,其测量的主要生物力学参数是角膜滞后量(corneal hysteresis,CH)和角膜阻力因子(corneal resistance factor,CRF)。一些研究应用 ORA 对比了正常角膜和圆锥角膜的生物力学性能,发现后者具有较低的 CH 值^[7-8]。然而,CH 和 CRF 是通过专有算法分析测量波形推导出的参数,并且 ORA 不能实时动态显示角膜形变过程。因此,进一步研究用于测量角膜生物力学性能的技术是必要的。

近期,基于 Scheimpflug 高速摄像技术研发的可视化角膜生物力学分析仪(corneal visualization Scheimpflug technology,Corvis ST,德国 Oculus 公司)已应用于临床。该仪器能够实时动态记录角膜受压形变及形态还原的整个过程,并分析角膜形变过程中的生物力学性能变化情况^[9]。

本研究应用 Corvis ST 测量并比较圆锥角膜和正常角膜的生物力学性能,探讨各生物力学参数与圆锥角膜的关系及对圆锥角膜诊断的效率。

1 对象与方法

1.1 对象

2012 年 8 月至 2013 年 10 月就诊于我院的圆

锥角膜患者 65 例(90 眼)(圆锥角膜组)和拟行近视激光手术患者及志愿者共 90 例(90 眼)(正常角膜组)。因为圆锥角膜多为双眼不对称性发病的特点,故双眼诊断为圆锥角膜的患者则双眼入选;正常角膜组均以右眼入选。圆锥角膜诊断标准:除去角膜地形图的特征性表现外还至少有一项以下临床体征:Vogt 条纹、Fleischer 环、角膜顶部瘢痕、角膜顶部变薄(裂隙灯)^[10-11]。基于 Amsler-Krumeich 分级法将圆锥角膜患者按照严重程度分为轻度圆锥角膜 46 眼(I 级)、中度圆锥角膜 23 眼(II 级)和重度圆锥角膜 21 眼(III 级/IV 级)^[12-13]。圆锥角膜组平均年龄为(25.4±6.1)岁(18~40 岁);正常角膜组平均年龄为(26.6±6.2)岁(19~42 岁),2 组年龄差异无统计学意义。

所有入选者均排除眼部其他疾病及外伤、手术史,排除患有能够影响眼部的全身系统性疾病患者,软性角膜接触镜配戴者需停戴 2 周以上,硬性角膜接触镜配戴者需停戴 1 个月以上。本实验于 2012 年 8 月通过本院伦理委员会认证,所有入选者均签署了知情同意书。

1.2 检查项目

所有患者均经过系统的眼科检查,包括裸眼及矫正视力检查、主觉验光、裂隙灯显微镜检查、眼底检查。Pentacam 眼前节分析仪测量角膜曲率,角膜散光度,中央角膜厚度,角膜中央 3、5、7 和 10 mm 直径范围内角膜体积,前房深度、前房体积和前房角度数,Corvis ST 测量角膜生物力学参数和眼内压。

1.3 Corvis ST 检查

Corvis ST(软件版本 1.00r30)采用气冲印压技术引起角膜压陷形变,同时采用 Scheimpflug 高速相机记录角膜中央水平截面的全程动态形变过程,然后经专业软件分析后慢动作显示在控制面板上(见图 1)。Corvis ST 配备的 Scheimpflug 高速相机最高采集速率为每秒钟 4 330 张图像,采集宽度为水

平 8 mm 直径, 图像分辨率为 640×480 像素^[14]。Corvis ST 在 31 ms 的采集时间内记录了 140 张角膜形变过程的图像。

Corvis ST 记录下角膜的整个形变过程, 并特别监测分析了形变过程中的双向压平和最大压陷状态(见图 2), 因此能够获得反映角膜生物力学特征相关的参数, 包括: 达到第一和第二压平状态的时间、角膜的压平长度和瞬时速度, 并分别记录为第一/第二压平时间、第一/第二压平长度、第一/第二压平速度; 达到最大压陷深度状态的时间、角膜最大压陷的曲率半径、最大压陷时 2 个屈膝峰之间的距离和最大压陷深度, 并且 Corvis ST 根据第一压平状态测量了眼内压。Hong 等^[14]应用 Goldmann 眼压计和 Corvis ST 测量正常志愿者和青光眼患者眼内压, 发现 2 种测量方法所得结果差异无统计学意义, 并且应用 Corvis ST 测量, 观察者内和观察者之间的测量一致性良好。Corvis ST 根据角膜中央水平截面图测量了该截面角膜中央厚度^[15], 因为 Corvis ST 仅提供了角膜中央水平截面厚度, 故本研究中应用 Pentacam 眼前节分析仪测量的角膜厚度作为统计值。

1.4 统计学方法

病例对照研究。结果应用 SPSS 17.0 软件进行统计学分析及绘图。Kolmogorov-Smirnov 检验测量结果是否为正态分布, 正态分布数据采用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 偏态分布数据计算中位数和变异范围。圆锥角膜组和正常角膜组, 组间参数比较应用独立样本 *t* 检验或 Wilcoxon 秩和检验。圆锥角膜不同严重程度组比较

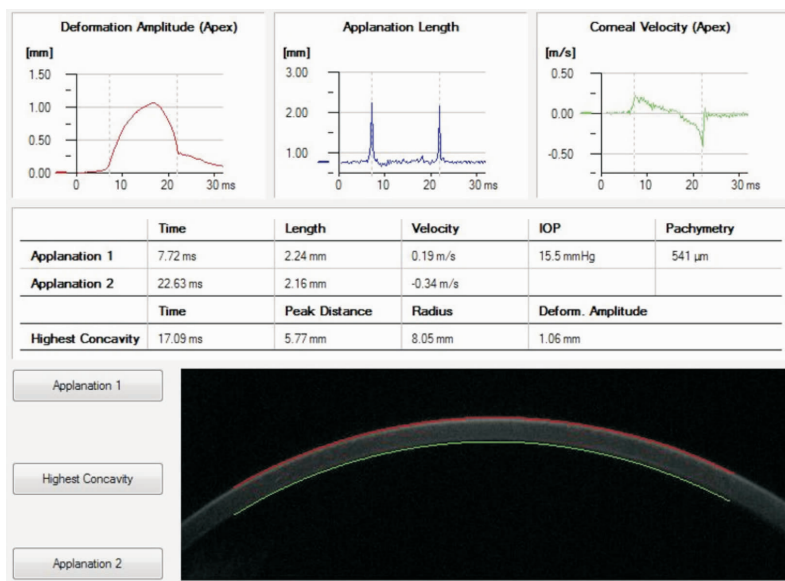
应用单因素方差分析(ANOVA), 进一步两两比较采用最小显著差法(LSD); 如果不满足正态性等前提条件, 采用非参数检验法。绘制角膜生物力学参数受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线。应用一元线性相关和多元线性回归法分析最大压陷深度与各眼前节形态参数及眼内压的相关性。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

各组间眼前节形态参数和生物力学参数结果见表 1。

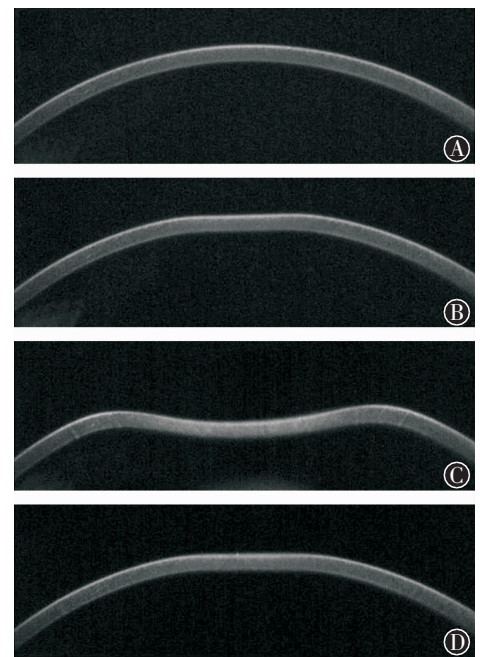
ROC 曲线分析显示, 所测量的生物力学参数中, 最大压陷深度对于圆锥角膜的诊断效率最高, 并且随着圆锥角膜严重程度的升级其诊断效率逐渐提高, 但是其余生物力学参数对于圆锥角膜的诊断效率均较差(曲线下面积均 < 0.77) (最大压陷屈膝峰间距和最大压陷曲率两参数, 因为数据测量的重复性差且与手动测量值相差较大, 故未作 ROC 曲线分析)。角膜最大压陷深度对于圆锥角膜的诊断效率见表 2。图 3 是最大压陷深度对于圆锥角膜及不同严重程度圆锥角膜诊断效率 ROC 曲线。

圆锥角膜组最大压陷深度均值为 (1.30 ± 0.20) mm $(0.86 \sim 1.96$ mm); 正常角膜组为 (1.08 ± 0.10) mm $(0.87 \sim 1.33$ mm), 2 组间差异有统计学意义($t = -9.59, P < 0.01$)。



显示参数包括: 眼内压、水平截面中央角膜厚度和角膜生物力学特征参数: 第一/第二压平状态时间、角膜压平长度和瞬时速度、最大凹陷时间、最大凹陷时角膜曲率半径、两屈膝峰间距和最大形变幅度

图 1 动态角膜生物力学测量仪 Corvis ST 软件控制界面



A, 角膜自然凸起形态; B, 气冲印压角膜向内压陷, 达到第一压平状态; C, 角膜继续受压凹陷, 达到最大压陷状态; D, 角膜从最大压陷恢复到初始状态过程, 达到第二压平状态

图 2 Corvis ST 检查中角膜形变过程示意图

表 1 正常角膜与圆锥角膜眼前节及生物力学参数比较[正态分布, $\bar{x} \pm s$ (变异范围); 偏态分布, 中位数 (变异范围)]

参数	正常角膜 (90 眼)	圆锥角膜 Amsler-Krumeich 分级			圆锥角膜 (90 眼)	F 值	P 值
		轻度圆锥角膜 (46 眼)	中度圆锥角膜 (23 眼)	重度圆锥角膜 (21 眼)			
眼前节参数							
角膜平均曲率(diopters)	43.70±1.51 (38.90~48.80)	44.38±1.93 (39.70~47.90)	50.10±1.54 (48.00~52.80)	59.15±5.70 (53.00~69.30)	49.29±6.73 (39.70~69.3)	250.188	<0.01
角膜散光度(diopters)	0.9 (0.00~3.70)	2.6 (0.10~7.60)	3.51±1.57 (0.70~11.60)	4.46±3.22 (0.70~12.00)	2.9 (0.10~12.00)	30.806	<0.01
中央角膜厚度(μm)	545.5±28.8 (486~629)	495.1±47.0 (330~558)	462.7±39.2 (378~524)	414.7±74.5 (270~573)	468.1±61.6 (270~573)	67.218	<0.01
角膜 3 mm 直径体积(mm ³)	3.9 (3.50~4.60)	3.64±0.31 (2.70~4.10)	3.50±0.23 (3.10~4.00)	3.25±0.47 (2.40~4.10)	3.51±0.37 (2.40~4.10)	44.035	<0.01
角膜 5 mm 直径体积(mm ³)	11.52±0.60 (10.30~13.30)	10.87±0.82 (8.90~12.60)	10.72±0.58 (9.80~12.30)	10.32±1.10 (8.10~12.40)	10.71±0.87 (8.10~12.60)	21.403	<0.01
角膜 7 mm 直径体积(mm ³)	24.77±1.30 (22.20~28.70)	23.73±1.68 (20.80~27.80)	23.70±1.18 (21.70~26.40)	23.46±2.01 (19.20~26.70)	23.66±1.64 (19.20~27.80)	8.565	<0.01
角膜 10 mm 直径体积(mm ³)	60.91±3.35 (54.80~70.90)	58.42±4.06 (51.10~69.10)	59.26±3.14 (54.30~66.10)	60.18±4.04 (55.00~68.60)	59.04±3.84 (51.10~69.10)	5.208	<0.01
前房角(°)	37.03±7.42 (21.70~63.60)	35.76±6.12 (18.20~47.40)	35.00±4.78 (28.60~44.40)	35.75±6.53 (25.40~51.40)	35.56±5.85 (18.20~51.40)	0.784	>0.05
前房深度(mm)	3.12±0.33 (2.20~4.03)	3.30±0.36 (2.69~4.11)	3.48±0.35 (2.83~4.25)	3.85±0.38 (3.21~4.81)	3.48±0.42 (2.69~4.81)	28.238	<0.01
前房体积(mm ³)	180.0±35.2 (92~276)	197.7±40.8 (115~283)	183.4±30.1 (124~243)	207.9±37.7 (118~275)	196.4±38.2 (115~283)	4.758	<0.01
眼内压(mmHg)	14.3±2.8 (9~21)	12.7±2.1 (8~16)	11.2±1.5 (9~14)	11.8±2.8 (7~21)	12.1±2.9 (7~21)	14.05	<0.01
生物力学参数							
第一压平时间(ms)	7.41±0.41 (6.81~8.58)	7.07±0.44 (5.69~7.82)	6.95±0.18 (6.63~7.28)	6.93±0.43 (5.91~8.09)	7.00±0.39 (5.69~8.09)	16.486	<0.01
第一压平长度(mm)	1.77±0.26 (1.34~2.28)	1.81±0.27 (1.29~2.35)	1.73±0.31 (1.11~2.34)	1.52±0.31 (0.98~2.10)	1.72±0.31 (0.98~2.35)	5.535	<0.01
第一压平速度(m/s)	0.15±0.03 (0.08~0.24)	0.16±0.04 (0.04~0.26)	0.16±0.04 (0.11~0.24)	0.16±0.04 (0.09~0.24)	0.16 (0.04~0.26)	2.008	>0.05
第二压平时间(ms)	22.07±0.49 (20.85~23.30)	22.30±0.59 (20.52~23.84)	22.30±0.60 (21.36~23.69)	22.46±0.70 (20.85~23.49)	22.34±0.62 (20.52~23.84)	3.925	<0.01
第二压平长度(mm)	1.59±0.46 (1.01~2.86)	1.51±0.50 (0.82~2.77)	1.40±0.57 (0.94~2.47)	1.88±0.48 (0.60~2.58)	1.52±0.50 (0.60~2.77)	8.536	<0.01
第二压平速度(m/s)	-0.39±0.08 (-0.62~-0.23)	-0.48±0.19 (-1.01~-0.10)	-0.54±0.11 (-0.82~-0.41)	-0.58±0.16 (-0.88~-0.30)	-0.52±0.17 (-1.01~-0.1)	17.864	<0.01
最大压陷时间(ms)	16.70±0.50 (15.25~18.25)	16.73±0.55 (15.71~17.79)	16.74±0.54 (15.48~17.56)	16.54±0.137 (11.32~17.56)	16.63 (11.32~17.79)	0.446	>0.05
最大压陷曲率(mm)	7.39±1.03 (4.10~10.75)	5.76±0.99 (2.75~7.57)	5.07±0.74 (3.71~6.17)	7.74±0.96 (3.08~6.86)	5.35±1.01 (2.75~7.57)	71.932	<0.01
最大压陷屈膝峰间距(mm)	5.19±0.50 (2.60~5.99)	5.20±0.79 (2.32~6.72)	5.18±0.47 (4.44~6.08)	5.16±0.49 (4.39~5.95)	5.19±0.65 (2.32~6.72)	0.03	>0.05
最大压陷深度(mm)	1.08±0.10 (0.87~1.33)	1.24±0.20 (0.86~1.59)	1.28±0.11 (1.04~1.60)	1.46±0.19 (1.14~1.96)	1.28 (0.86~1.96)	48.003	<0.01

表 2 最大压陷深度对于不同程度圆锥角膜诊断效率 ROC 曲线分析

分级	眼数	截断点(mm)	敏感度(%)	特异度(%)	曲线下面积	P 值
总体	90	1.14	84.5	75.6	0.865	<0.01
轻度圆锥角膜	46	1.15	73.9	76.7	0.788	<0.01
中度圆锥角膜	23	1.22	87.0	88.9	0.919	<0.01
重度圆锥角膜	21	1.26	90.5	94.4	0.975	<0.01

图 4 为角膜最大压陷深度分布范围百分比柱状图。图中可见圆锥角膜组的最大压陷深度分布范围向右移位,表明圆锥角膜组的最大压陷深度较正常角膜组高,但是可以观察到 2 组中最大压陷深度在 1.1~1.4 mm 之间存在明显的重叠区间。

圆锥角膜组和正常角膜组中最大压陷深度与

眼内压(见图 5)、中央角膜厚度和中央角膜 3 mm 直径内体积均呈现负相关性。多元线性回归分析发现正常角膜组眼内压对最大压陷深度影响最大而圆锥角膜组中央角膜厚度和角膜 3 mm 直径内体积对最大压陷深度的影响比眼内压贡献更大(见表 3)。

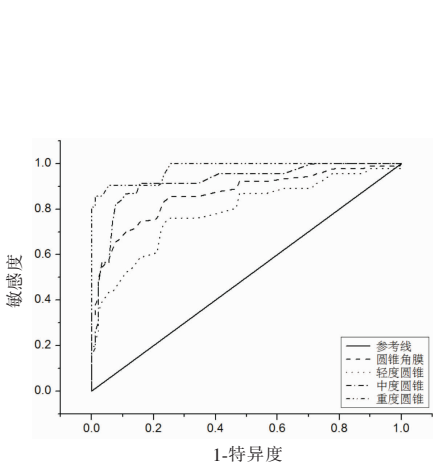


图 3 最大压陷深度对于圆锥角膜及轻度、中度和重度圆锥角膜诊断效率的 ROC 曲线图

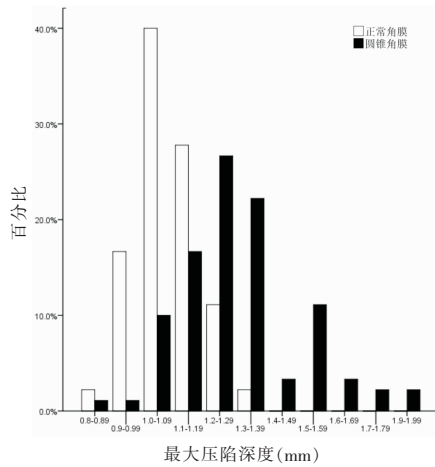


图 4 正常角膜和圆锥角膜最大压陷深度范围百分比分布柱状图

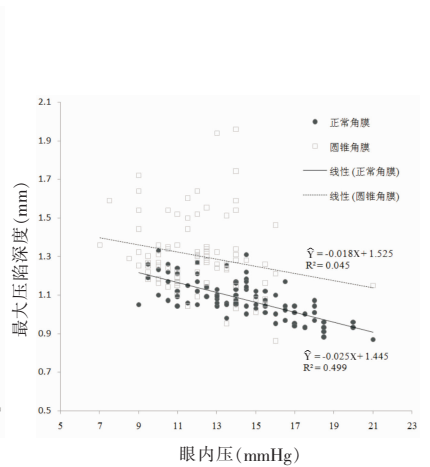


图 5 正常角膜和圆锥角膜最大压陷深度与眼内压相关性散点图

表 3 最大压陷深度与眼前节参数和眼压的相关性分析

眼前节参数和眼内压	正常角膜		圆锥角膜	
	r 值	P 值	r 值	P 值
一元线性分析				
角膜平均曲率(D)	-0.091	>0.05	0.431	<0.01
角膜散光度(D)	-0.102	>0.05	0.176	>0.05
中央角膜厚度(μm)	-0.219	<0.05	-0.357	<0.01
角膜 3 mm 直径体积(mm ³)	-0.212	<0.05	-0.270	<0.01
角膜 5 mm 直径体积(mm ³)	-0.207	>0.05	-0.122	>0.05
角膜 7 mm 直径体积(mm ³)	-0.198	>0.05	0.018	>0.05
角膜 10 mm 直径体积(mm ³)	-0.201	>0.05	0.112	>0.05
前房角(°)	0.047	>0.05	-0.187	>0.05
前房深度(mm)	0.059	>0.05	0.180	>0.05
前房体积(mm ³)	0.072	>0.05	-0.006	>0.05
眼内压(mmHg)	-0.707	<0.01	-0.213	0.044
多元线性回归				
中央角膜厚度(μm)	0.000	>0.05	-0.006	<0.01
角膜 3 mm 直径体积(mm ³)	0.069	>0.05	0.830	<0.01
眼内压(mmHg)	-0.260	<0.01	-0.013	>0.05

3 讨论

圆锥角膜是一种局部角膜扩张性疾病，可导致角膜光学性能严重下降，视力不对称性缓慢下降，是角膜屈光手术中绝对禁忌证，所以准确的术前诊断尤为重要。虽然临床上成熟期和进展期圆锥角膜诊断并不困难，但对于亚临床和初期圆锥角膜的诊断还是一个难题^[6]。目前，诊断圆锥角膜的辅助方法主要是角膜地形图和角膜断层摄影术^[7]，但是这 2 种方法均容易受到泪膜、眼表疾病及角膜接触镜配戴的影响，对于早期圆锥角膜的诊断具有一定的局限性，而角膜生物力学特征改变可能在典型角膜形态学改变之前发生。基于 Scheimpflug 高速成像技术的 Corvis ST 能够全程可视化动态观察角膜形变全过程。由于该仪器尚未广泛应用，所以相关的临床数据有限。本研究对比了正常角膜和圆锥角膜的眼前节形态参数及生物力学特征，以期得到圆锥角膜生

物力学诊断新的参考依据。

正常角膜与圆锥角膜、不同严重程度圆锥角膜相比，大多数眼前节形态参数存在明显统计学差异。圆锥角膜组的角膜曲率和散光、前房深度和体积明显高于正常角膜组，而角膜厚度和体积、前房角明显小于正常角膜组。Ortiz 等^[18]也报道了类似的实验结果。

在角膜第一和第二压平状态时，圆锥角膜组角膜顶点的瞬时速度明显比正常角膜组快，且随着圆锥角膜严重程度的增加速度相应增加，这可能是由于圆锥角膜组角膜厚度薄，且重度圆锥角膜厚度更薄中央角膜体积更少，导致在形变过程中对外界气压和眼内压的抵抗力弱，使得角膜更容易形变造成的^[9]。达到第一压平的时间，圆锥角膜组比正常组短，且重度圆锥角膜时间最短，考虑这是由于圆锥角膜组具有更大的角膜曲率和更弱的角膜抵抗力导致的。由于圆锥角膜的基质胶原纤维较脆弱，更容易变形，角膜更薄且比正常角膜基质少，而且圆锥角膜组眼内压更低，所以导致圆锥角膜的最大压陷深度比正常角膜大。

尽管大多数生物力学参数在 2 组之间都有明显的统计学差异，但是只有最大压陷深度对于圆锥角膜有较好的诊断效率。ROC 曲线分析显示，应用最大压陷深度诊断圆锥角膜时，当临界值取 1.14 mm 时，曲线下面积最大为 0.865，对于圆锥角膜诊断的敏感度为 84.5%，特异度为 75.6%。最大压陷深度对于重度圆锥角膜的诊断敏感度和特异度分别达到 90.5%和 94.4%，但是对于轻度圆锥角膜的诊断效率还不高，敏感度和特异度分别 73.9%和 76.7%。本研究发现，最大压陷深度是角膜生物力学的直接反映参数。然而，圆锥角膜组与正常角膜组中最大压陷深

度存在明显的重叠范围(1.1~1.4 mm),这就限制了其鉴别圆锥角膜的精确度。因此,新的生物力学指标可以同角膜地形图或角膜断层摄影术联合应用,来提高圆锥角膜的诊断敏感性。

通过线性相关分析发现,在 2 组中最大压陷深度与眼内压、中央角膜厚度和角膜中央 3 mm 范围内体积均呈现负相关性。圆锥角膜组中央角膜厚度和中央区角膜体积比正常角膜组少,能够提供角膜强度的有效胶原纤维就相对较少,这就使得角膜的机械强度减弱,导致角膜压陷过程当中最大压陷深度增大。先前也有关于角膜厚度对最大压陷深度影响的相似报道^[9,20]。Leung 等^[21]研究 144 例正常角膜和青光眼角膜生物力学特征,发现更高的眼内压和更厚的角膜使得角膜最大压陷深度减小。眼内压对于最大压陷深度有较大的影响效果,所以在应用最大压陷深度去评估角膜生物力学特征时,需要特别注意眼内压的影响。Ambrósio 等^[15]基于线性回归分析计算得到新参数 Corvis Comboll,该参数通过统计学方法减少了眼内压对最大压陷深度的影响,ROC 曲线分析发现该参数能够更好地区分圆锥角膜与正常角膜。

目前 Corvis ST 的软件版本还不够成熟,所有测量参数均为形变原始状态的显示,且受眼内压等相关因素影响较大,希望设备软件的进一步完善和更新能通过原始参数分析推导出受外界因素影响较小并且能够直接反映角膜生物力学性能的参数。

综上所述,Corvis ST 可在体测量角膜生物力学性能,其测量参数中最大压陷深度可以作为一个新的参数辅助诊断圆锥角膜,但是其受到眼内压和角膜厚度等相关因素的影响。

参考文献:

[1] Rabinowitz YS. Keratoconus[J]. *Surv Ophthalmol*,1998,42:297-319.
 [2] McMahon TT, Szczotka-Flynn L, Barr JT, et al. A new method for grading the severity of keratoconus; the Keratoconus Severity Score (KSS)[J]. *Cornea*,2006,25:794-800.
 [3] Shirayama-Suzuki M, Amano S, Honda N, et al. Longitudinal analysis of corneal topography in suspected keratoconus[J]. *Br J Ophthalmol*,2009,93:815-819.
 [4] Meek KM, Tuft SJ, Huang Y, et al. Changes in collagen orientation and distribution in keratoconus corneas[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*,2005,46:1948-1956.
 [5] Gefen A, Shalom R, Elad D, et al. Biomechanical analysis of the keratoconic cornea[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*,2009,2:224-236.
 [6] Luce DA. Determining in vivo biomechanical properties of the

cornea with an ocular response analyzer[J]. *J Cataract Refract Surg*,2005,31:156-162.
 [7] Saad A, Lteif Y, Azan E, et al. Biomechanical properties of keratoconus suspect eyes[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*,2010,51:2912-2916.
 [8] Shah S, Laiquzzaman M, Bhojwani R, et al. Assessment of the biomechanical properties of the cornea with the ocular response analyzer in normal and keratoconic eyes[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*,2007,48:3026-3031.
 [9] Hon Y, Lam AK. Corneal deformation measurement using Scheimpflug noncontact tonometry[J]. *Optom Vis Sci*,2013,90:e1-8.
 [10] Zadnik K, Barr JT, Edrington TB, et al. Baseline findings in the Collaborative Longitudinal Evaluation of Keratoconus (CLEK) Study[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*,1998,39:2537-2546.
 [11] de Sanctis U, Loiacono C, Richiardi L, et al. Sensitivity and specificity of posterior corneal elevation measured by Pentacam in discriminating keratoconus/subclinical keratoconus [J]. *Ophthalmology*,2008,115:1534-1539.
 [12] Liu R, Chu RY, Zhou XT, et al. A compare study on cornea biomechanical properties in normal and keratoconic eyes[J]. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi*,2009,45:509-513.
 [13] Choi JA, Kim MS. Progression of keratoconus by longitudinal assessment with corneal topography[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*,2012,53:927-935.
 [14] Hong J, Xu J, Wei A, et al. A new tonometer—the Corvis ST tonometer: clinical comparison with noncontact and Goldmann applanation tonometers[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*,2013,54:659-665.
 [15] Ambrósio RJ CDL, Ramos IC SRT, Pimentel LN RCJ, et al. Corneal biomechanical assessment using dynamic ultra high-speed Scheimpflug technology noncontact tonometry (UHS-ST NCT): preliminary results. Presented at ASCRSASOA, San Diego, CA, March 25-29, 2011. Available at: <http://www.optomes.com.tr/TR/dosya/1-604/h/corvisstascrs2011final.pdf>. Accessed February 15,2012.
 [16] Ucakhan OO, Cetinkor V, Ozkan M, et al. Evaluation of Scheimpflug imaging parameters in subclinical keratoconus, keratoconus, and normal eyes[J]. *J Cataract Refract Surg*,2011,37:1116-1124.
 [17] Konstantopoulos A, Hossain P, Anderson DF. Recent advances in ophthalmic anterior segment imaging: a new era for ophthalmic diagnosis[J]. *Br J Ophthalmol*,2007,91:551-557.
 [18] Ortiz D, Pinero D, Shabayek MH, et al. Corneal biomechanical properties in normal, post-laser in situ keratomileusis, and keratoconic eyes[J]. *J Cataract Refract Surg*,2007,33:1371-1375.
 [19] Wolffsohn JS, Safeen S, Shah S, et al. Changes of corneal biomechanics with keratoconus[J]. *Cornea*,2012,31:849-854.
 [20] Dorrnsoro C, Pascual D, Perez-Merino P, et al. Dynamic OCT measurement of corneal deformation by an air puff in normal and cross-linked corneas[J]. *Biomed Opt Express*,2012,3:473-487.
 [21] Leung CK, Ye C, Weinreb RN. An ultra-high-speed Scheimpflug camera for evaluation of corneal deformation response and its impact on IOP measurement[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*,2013,54:2885-2892.

(收稿日期:2014-03-19)

(本文编辑:毛文明,季魏红)