

基于 Corvis ST 的角膜生物力学参数在圆锥角膜诊断中的价值

吴元 李晓丽 晏晓明 荣蓓 李海丽

100034 北京大学第一医院眼科(吴元、晏晓明、荣蓓、李海丽);300020 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 天津市眼科研究所(李晓丽)

通信作者:李海丽,Email:lihaili2013@sina.cn

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2018.02.011

【摘要】 **目的** 应用可视化角膜生物力学分析仪(Corvis ST)对圆锥角膜与正常角膜生物力学参数的差异进行比较分析,探讨基于 Corvis ST 的角膜生物力学参数在圆锥角膜诊断中的价值。**方法** 本研究为前瞻性病例对照研究。连续收集 2015 年 10—12 月于北京大学第一医院门诊就诊的圆锥角膜患者 17 例 24 眼作为圆锥角膜组,同期招募正常志愿者 40 人 40 眼为正常对照组。应用 Corvis ST 测量 2 个组人群的角膜生物力学参数并进行比较;绘制受试者工作特征(ROC)曲线,分析各参数对圆锥角膜的诊断效率及其特异度与敏感度;将各参数作为自变量,建立 Logistic 回归模型,对圆锥角膜的诊断进行多因素分析。**结果** 除第一次压平速度(Vin)、第二次压平时间(A2T)和最大压陷时间(HCT)这 3 个参数外,圆锥角膜组最大压陷深度(HCDA)、第二次压平速度(Vout)、两峰间距(PD)均高于正常对照组,第一次压平时间(A1T)、第一次压平长度(A1L)、第二次压平长度(A2L)、最大压陷时角膜曲率半径(HCR)均低于正常对照组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。ROC 曲线分析显示,多种生物力学参数均对圆锥角膜具有诊断意义,其中,HCR 的诊断效率最高,曲线下面积为 0.927,敏感度为 95.8%,特异度为 82.5%;HCR($OR = 0.205$)和中央角膜厚度(CCT)($OR = 0.970$)2 个参数作为自变量进入回归模型,建立圆锥角膜诊断的预测模型如下:Logistic(P) = $23.47 - 1.59 \times HCR - 0.30 \times CCT$,该模型可进一步提高圆锥角膜诊断的敏感性(达到 95.8%)和特异性(达到 95.0%)。**结论** Corvis ST 可有效测量角膜生物力学特性。HCR 等多种参数对圆锥角膜具有诊断意义,可考虑作为诊断/筛查圆锥角膜的辅助检测指标。

【关键词】 可视化角膜生物力学分析仪;圆锥角膜;角膜生物力学

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11372011)

Research of diagnostic value of corneal biomechanical parameters based on Corvis ST in keratoconus Wu Yuan, Li Xiaoli, Yan Xiaoming, Rong Bei, Li Haili

Peking University First Hospital, Beijing 100034, China (Wu Y, Yan XM, Rong B, Li HL); Clinical College of Ophthalmology, Tianjin Medical University, Tianjin Eye Hospital, Tianjin Key Lab of Ophthalmology and Visual Science, Tianjin Ophthalmic Research Institute, Tianjin 300020, China (Li XL)

【Abstract】 **Objective** To compare the corneal biomechanical properties between keratoconic eyes and normal eyes by using corneal visualization Scheimpflug technology (Corvis ST), and to evaluate the diagnostic value of corneal biomechanical parameters based on Corvis ST in keratoconus. **Methods** A prospective cases-control study was performed. Twenty-four keratoconic eyes from 17 patients and 40 normal eyes (right eye) from 40 participants were enrolled from October to December in Peking University First Hospital. Anterior segment parameters and refractive diopters were obtained with Topography (TMS-4) and mydriatic refraction. Biomechanical parameters were assessed with Corvis ST. Independent sample *t*-test and Wilcoxon rank sum test were used to compare the parameters of the two groups. The receiver operating characteristic (ROC) curves were plotted to distinguish keratoconus from the normal cornea. Diagnostic efficacies of all parameters were analyzed and some parameters were used as independent variables to establish a Logistic regression model. **Results** Maximum deformation amplitude of highest concavity (HCDA), maximum corneal velocity during the second applanation (Vout) and distance between both non-deformed peaks (PD) in the keratoconus group were higher than those in the normal control group, and first applanation time (A1T), cord length of first applanation (A1L), cord length of second applanation (A2L), radius value of central concave curvature at highest concavity (HCR) were lower than those in the normal control group, with significant differences between the two groups (all at $P < 0.05$). Maximum corneal velocity during the first applanation (Vin), second applanation time (A2T) and time taken to reach highest concavity (HCT) were insignificantly different

between the two groups (all at $P > 0.05$). Many parameters had diagnostic values in keratoconus assessed by ROC analysis. HCR was the most efficient parameter showed by ROC evaluation (area under the curve was 0.927, sensitivity was 95.8%, specificity was 82.5%). The Logistic model were established with two independent variables, HCR ($OR = 0.205$) and central corneal thickness (CCT) ($OR = 0.970$). The forecast model of keratoconus diagnosis was established as follows: Logistic (P) = $23.47 - 1.59 \times HCR - 0.30 \times CCT$. Diagnostic sensitivity and specificity were enhanced by using this model, the sensitivity was 95.8%, and the specificity was 95.0%. **Conclusions** It is useful to evaluate the corneal biomechanical properties with Corvis ST. HCR is an efficient auxiliary testing index of diagnosis or screening of keratoconus.

[Key words] Corneal visualization Scheimpflug technology; Keratoconus; Corneal biomechanics

Fund program: National Natural Science Foundation of China (11372011)

圆锥角膜是一种非炎症性、进展性、以角膜局限扩张为特征的疾病,表现为中央或旁中央角膜基质变薄,呈锥状前突,产生不规则散光导致视力下降^[1]。圆锥角膜的病因尚未完全明确,目前认为是多因素综合作用的结果,包括家族遗传、胶原发育障碍、内分泌与细胞代谢紊乱、变态反应、免疫缺陷等^[2]。各种原因和机制共同导致角膜机械抵抗力下降,角膜进行性变薄,角膜生物力学性能下降^[3],从而导致圆锥角膜的发生。目前对圆锥角膜的诊断标准建立在疾病症状体征结合角膜形态学评估相结合的体系上,并未涉及疾病的核心特点——角膜生物力学特性的改变。可视化角膜生物力学分析仪(corneal visualization Scheimpflug technology, Corvis ST)是一种联合 Scheimpflug 高速摄像和气冲印压技术测量角膜生物力学的新设备。能实时动态记录角膜受压形变的整个过程,生成形变参数以反映角膜的生物力学特性。以 Corvis ST 对圆锥角膜样本进行测试并分析,有望从角膜生物力学特性改变方面揭示疾病的发生和发展规律,改变目前对圆锥角膜诊断过于依赖形态学诊断的现状并促进该病临床诊断的发展。本研究中以 Corvis ST 为研究工具,探讨其在圆锥角膜诊断中的价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究为前瞻性病例对照研究。连续收集 2015 年 10—12 月就诊于北京大学第一医院眼科门诊的圆锥角膜患者 17 例 24 眼为圆锥角膜组,年龄 17~38 岁,平均(25.3±6.6)岁;同期招募正常志愿者 40 人 40 眼为正常对照组,年龄 22~41 岁,平均(27.9±4.5)岁。纳入标准:(1)圆锥角膜组纳入标准 参照 Rabinowitz-McDonnell 诊断标准^[4],同时有典型体征及角膜地形图典型特征者。典型体征为裂隙灯显微镜下检查中以下体征至少 1 项阳性:角膜基质变薄、锥状向前膨隆、Fleischer 环、Vogt 线、上皮或上皮下角痕;角膜地形图典型体征为:角膜前表面中央屈光度数 >

46.5 D;角膜中心下方 3 mm 处与上方 3 mm 处屈光度差值 >1.26 D;双眼角膜中央前表面屈光度差值 >0.92 D。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双眼纳入圆锥角膜组。(2)正常对照组纳入标准 无任何眼部疾病(除外屈光不正),无眼部手术及外伤史,角膜透明,最佳矫正视力 ≥ 1.0 。排除标准:(1)患有圆锥角膜和屈光不正以外的其他眼科疾病;(2)患有其他影响眼部的系统性疾病,如胶原病等。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 4 周以上。本研究经北京大学第一医院伦理委员会审核批准(批文号:2015[876]),所有入选者均签署知情同意书。

1.2 方法

所有被检者均进行系统的眼科检查,包括裸眼视力及最佳矫正视力、扩瞳验光、裂隙灯显微镜、小瞳孔查眼底、角膜地形图(TMS-4)和 Corvis ST 检查。

Corvis ST(德国 Oculus 公司)通过自动喷出的脉冲气流对角膜实现 2 次压平,并经 Scheimpflug 高速相机记录下角膜的整个形变过程(图 1),获得反映角膜生物力学特征的 10 个参数:第一次压平时间(first applanation time, A1T)、第一次压平长度(cord length of first applanation, A1L)、第一次压平速度(maximum corneal velocity during the first applanation, Vin)、第二次压平时间(second applanation time, A2T)、第二次压平长度(cord length of second applanation, A2L)、第二次压平速度(maximum corneal velocity during the second applanation, Vout)、最大压陷时间(time taken to reach highest concavity, HCT)、最大压陷深度(maximum deformation amplitude of highest concavity, HCDA)、最大压陷时角膜曲率半径(radius value of central concave curvature at highest concavity, HCR)、最大压陷时两峰间距(distance between both non-deformed peaks, PD),并显示在控制面板上。另外,Corvis ST 还可测量角膜中央厚度(central corneal thickness, CCT)和眼压^[5-6]。

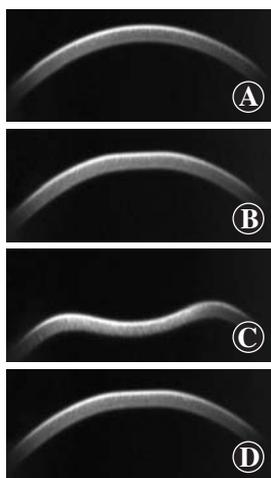


图 1 角膜变形过程 A: 原始状态 B:第一次压平状态 C:最大压陷状态 D:第二次压平状态

表 2 圆锥角膜组与正常对照组角膜生物力学参数比较

组别	眼数	A1T [#] ($\bar{x}\pm s, ms$)	A1L [*] [$M(Q_1, Q_3), mm$]	Vin [*] [$M(Q_1, Q_3), m/s$]	A2T [*] [$M(Q_1, Q_3), m/s$]	A2L [*] [$M(Q_1, Q_3), mm$]
圆锥角膜组	24	6.95±0.22	1.65(1.13, 1.79)	0.16(0.14, 0.23)	21.98(16.89, 22.82)	1.48(1.13, 1.86)
正常对照组	40	7.39±0.38	1.77(1.28, 1.89)	0.15(0.07, 0.19)	21.81(16.42, 22.64)	1.79(0.99, 2.06)
t 值/Z 值		5.816	-4.872	-1.690	-1.051	-3.888
P 值		<0.05	<0.05	>0.05	>0.05	<0.05

组别	眼数	Vout [#] ($\bar{x}\pm s, m/s$)	HCT [#] [$M(Q_1, Q_3), m/s$]	HCDA [#] ($\bar{x}\pm s, mm$)	HCR [#] ($\bar{x}\pm s, mm$)	PD [#] [$M(Q_1, Q_3), mm$]
圆锥角膜组	24	0.53±0.19	16.85(15.29, 22.33)	1.33±0.16	4.37±1.17	4.95(2.46, 6.31)
正常对照组	40	0.35±0.09	16.89(14.84, 22.94)	1.08±0.14	6.75±1.36	4.52(1.92, 6.27)
t 值/Z 值		4.326	-0.257	-6.501	7.136	-2.941
P 值		<0.05	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05

注: A1T:第一次压平时间; A1L:第一次压平长度; Vin:第一次压平速度; A2T:第二次压平时间; A2L:第二次压平长度; Vout:第二次压平速度; HCT:最大压陷时间; HCDA:最大压陷深度; HCR:最大压陷时角膜曲率半径; PD:最大压陷时两峰间距(#:独立样本 t 检验; *: Wilcoxon 秩和检验)

1.3 统计学方法

采用 SPSS 19.0 统计学软件进行统计分析。正态分布数据采用 $\bar{x}\pm s$ 进行统计描述, 采用独立样本 t 检验对成组数据进行统计分析, 偏态分布数据计算中位数和变异范围进行统计描述, 应用 Wilcoxon 秩和检验进行统计分析。绘制受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析各力学参数对圆锥角膜的诊断效率及其特异度与敏感度; 对所有生物力学参数, 以及 Corvis ST 测出的角膜厚度、眼压等指标作为自变量, 用逐步回归法建立 Logistic 回归模型。以回归方程所得 Logistic (P) 为新变量, 求出最佳诊断界值。P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 2 个组眼前节参数及角膜生物力学参数差异分析

圆锥角膜组等效球镜度和角膜曲率均高于正常对照组, CCT 和眼压均低于正常对照组, 差异均有统计学意义 (均 P<0.05) (表 1)。圆锥角膜组 HCDA、Vout、PD 均高于正常对照组, 而 A1T、A1L、A2L、HCR 均低于正常对照组, 差异均有统计学意义 (均 P<0.05) (表 2)。

表 1 圆锥角膜组与正常对照组眼前节参数比较

组别	眼数	CCT (μm)	眼压 (mmHg)	等效球镜度 (D)	角膜曲率 (D)
圆锥角膜组	24	446.2±56.3	9.43±2.16	-12.9±5.4	50.98±4.54
正常对照组	40	534.3±36.3	13.80±4.02	-3.5±2.5	43.93±1.44
t 值		-7.796	-5.476	-7.003	8.480
P 值		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

注: CCT: 中央角膜厚度 (独立样本 t 检验) (1 mmHg=0.133 kPa)

2.2 ROC 曲线分析

所测量的生物力学参数中, HCR 对圆锥角膜的诊断效率最高, 曲线下面积超过 0.9; 其次为角膜 HCDA、A1L、A1T、A2L 和 Vout, 对于圆锥角膜的诊断效率较高, 曲线下面积均超过 0.8 (表 3, 图 2)。其他生物力学参数对于圆锥角膜的诊断效率均较低, 曲线下面积均<0.8。

表 3 各生物力学参数对圆锥角膜诊断的曲线下面积及敏感度、特异度

参数	曲线下面积	敏感度	特异度	截断点	诊断圆锥角膜的条件
HCR	0.927	95.8%	82.5%	6.015 mm	<6.015 mm
HCDA	0.887	91.7%	82.5%	1.13 mm	>1.13 mm
A1L	0.856	70.8%	95.5%	1.695 mm	<1.695 mm
A2L	0.804	79.2%	78.8%	1.375 mm	<1.375 mm
A1T	0.838	91.7%	65.0%	7.215 mm	<7.215 mm
Vout	0.806	66.7%	84.8%	0.43 m/s	>0.43 m/s

注: HCR:最大压陷时角膜曲率半径; HCDA:最大压陷深度; A1L:第一次压平长度; A2L:第二次压平长度; A1T:第一次压平时间; Vout:第二次压平速度

2.3 角膜生物力学参数对圆锥角膜诊断的多因素分析

应用逐步回归法对由 Corvis ST 测得的所有角膜生物力学参数、眼压和角膜厚度进行多因素分析, 发现 HCR 和 CCT 是圆锥角膜确诊的独立危险因素 (表 4)。

表 4 角膜生物力学参数对圆锥角膜诊断的 Logistics 回归分析结果

因素	β 值	SE	Wald	P 值	Exp(β)	95% CI
HCR	-1.59	0.551	8.289	0.004	0.205	0.069-0.603
CCT	-0.30	0.013	5.165	0.023	0.970	0.945-0.996
常量	23.47	7.221	10.567	0.001	1.56×10 ¹⁰	

注: HCR:最大压陷时角膜曲率半径; CCT:中央角膜厚度

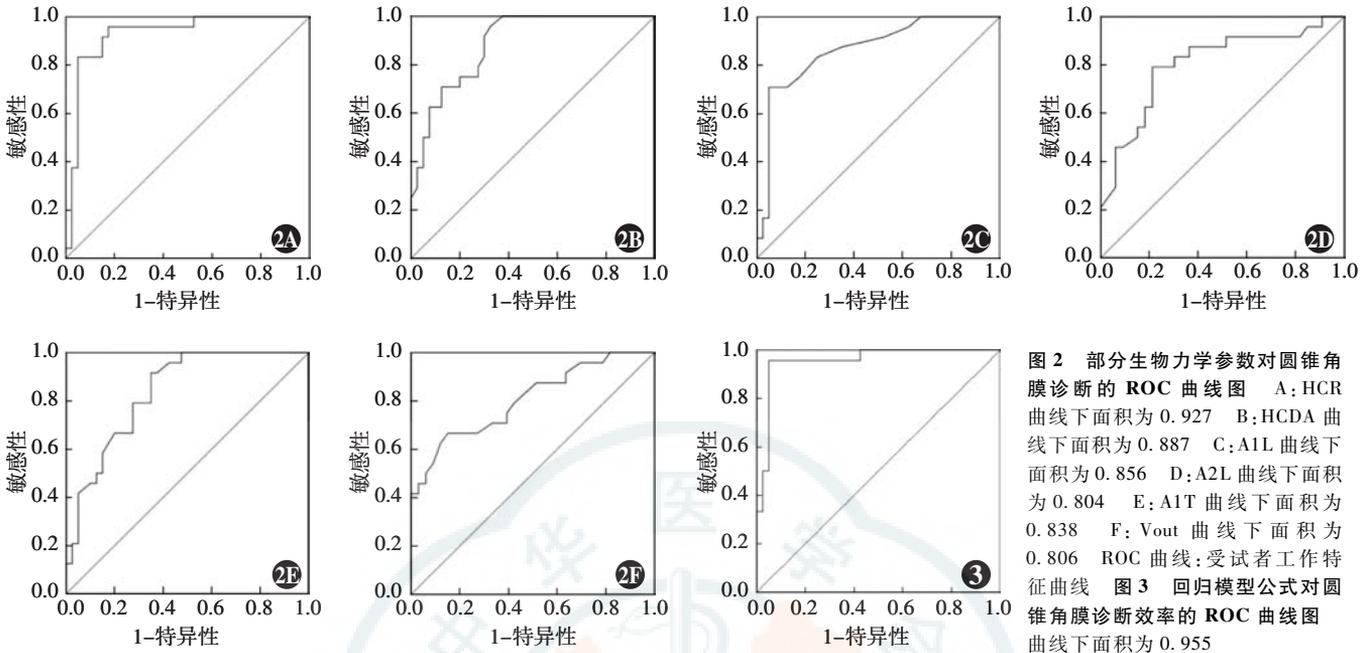


图 2 部分生物力学参数对圆锥角膜诊断的 ROC 曲线图 A: HCR 曲线下面积为 0.927 B: HCDA 曲线下面积为 0.887 C: A1L 曲线下面积为 0.856 D: A2L 曲线下面积为 0.804 E: A1T 曲线下面积为 0.838 F: Vout 曲线下面积为 0.806 ROC 曲线: 受试者工作特征曲线 图 3 回归模型公式对圆锥角膜诊断效率的 ROC 曲线图 曲线下面积为 0.955

以回归分析结果筛选出的主要影响因素 HCR 和 CCT 建立圆锥角膜诊断的预测模型如下: $\text{Logistic}(P) = 23.47 - 1.59 \times \text{HCR} - 0.30 \times \text{CCT}$ 。以此回归公式得出的预测值对圆锥角膜诊断进行 ROC 曲线分析, 曲线下面积达 0.955, 敏感度达 95.8%, 特异度达 95.0% (图 3)。

3 讨论

圆锥角膜是角膜扩张症中的常见类型, 其发病率约为 1/2 000, 一般在青春期发病, 对家庭和社会造成的危害较大^[7]。该病表现为角膜中央扩张, 角膜光学性能随之下降。如不及时干预, 随着病情发展, 可出现角膜混浊、角膜上皮及上皮下瘢痕、急性角膜水肿等, 最终需行角膜移植术。另一方面, 进展期或临床前期圆锥角膜是角膜屈光手术的潜在威胁, 随着角膜屈光手术的普及和开展, 对圆锥角膜及时、准确的诊断越来越重要^[8]。

人类认识圆锥角膜的历史超过 150 年, 过去的诊断方式主要靠症状和典型的临床体征。近年来, 角膜地形图和角膜断层摄影等技术的发展大大改变了该病的诊断方式, 形成了以临床症状、体征结合特征性角膜地形图参数改变的诊断体系^[9]。典型的圆锥角膜仅靠症状、体征即可诊断, 表现为渐进性视力下降且矫正不提高, 裂隙灯显微镜检查可发现下列全部或部分体征: 角膜基质变薄、Vogt 条栅、Fleischer 环、角膜上皮或上皮下瘢痕^[4]。对于未出现圆锥角膜典型体征或体征不明显的患者, 可以辅助角膜地形图或角膜断层摄影进行角膜形态的评估, 并进行诊断。Rabinowitz^[4]研

究总结了圆锥角膜的地形图特点: (1) 角膜屈光力增加并被同心圆状的低屈光力区域环绕; (2) 角膜上下屈光力不对称; (3) 水平子午线上下的最高曲率半径子午线斜向交汇, 并据此提出基于角膜地形图检查得出的 3 个指标——角膜中央曲率、上下方屈光度差值和双眼角膜屈光力差值作为判定圆锥角膜的标准^[4]。

尽管圆锥角膜的发病机制较为复杂, 但目前均认为, 角膜生物力学性质的改变是圆锥角膜发生的根本原因^[3]。既往的检测条件有限, 对于角膜的生物力学测量均采用角膜轴向拉伸实验、角膜膨胀实验和离体全眼球测量方法^[10-11], 无法应用于临床。因此, 圆锥角膜的诊断体系中一直缺乏生物力学性质的评估。Corvis ST 的问世有望改变这一现状, 该设备将精确计量的脉冲空气投射到角膜表面, 引起角膜形变, 并通过高速摄影记录形变的过程。全过程可分为 3 个时期: 第一阶段是角膜从自然状态到内向凹陷的内向运动期, 并经历第一次压平, 相关的力学参数为 A1T、A1L 和 Vin; 第二阶段是在最大凹陷状态的短暂震荡期, 此时产生的相关力学参数为 HCDA、HCT、HCR 和 PD; 第三阶段是从其最大的压陷状态恢复到自然状态的外向运动期, 并经历第二次压平状态, 此阶段产生的生物力学参数为 A2T、A2L 和 Vout^[12]。

本研究发现, 圆锥角膜患者的角膜力学性质较正常人发生了明显改变。角膜基质层由 I 型和 IV 型胶原纤维组成, 含有许多规律平行排列的板层结构, 是角膜生物力学性能的主要承载者^[13]。在圆锥角膜患眼, 角膜胶原纤维生物力学性质减弱, 发生角膜变薄、角膜

黏弹性降低、角膜对外力的抵抗能力下降等现象。因此,圆锥角膜患者角膜在外力的作用下更易发生变形,并且角膜变形时间缩短、变形的幅度和范围增加,具体体现为 Corvis ST 各个生物力学参数发生改变。

本研究中,圆锥角膜患者的生物力学参数的多数指标与正常人相比差异有统计学意义。有关压平时间的指标,如 A2T、HCT 虽然也发生改变,但是与正常对照组相比差异无统计学意义,提示我们时间指标的生物力学效力可能不如关于瞬时形态和压平速度的指标。A1T、HCT 和 A2T 是 3 个时间指标,后两者分别指经历 1 次压平状态和 2 次压平状态之后,三者之间依次有累计效应。后两参数受混杂因素较多,可能在小样本量下难以精确反映出角膜的生物力学变化。本研究中,圆锥角膜组与正常对照组之间的 V_{in} 虽然存在差异,但差异无统计学意义,与其他研究的结果略有不同^[14],分析差异产生的可能原因为存在测量误差。有研究指出,Corvis ST 测量的生物力学参数中除了眼压、角膜厚度、HCDA、A1T 等少数指标外,其余的指标可重复性较差^[15]。本研究样本量偏小,在部分指标上可能存在测量变异带来的误差。

本研究中发现,部分生物力学参数对于诊断圆锥角膜具有良好的效能。其中,HCR 对于诊断圆锥角膜的 ROC 曲线下面积达到 0.947,准确性较高,可以考虑纳入其作为圆锥角膜诊断的新标准。HCDA、A1L、A2L、A1T 和 V_{out} 等指标对圆锥角膜诊断的 ROC 曲线下面积也均为 0.8 以上,可以作为诊断圆锥角膜的辅助指标。

本研究中还发现,联合 HCR 和 CCT 可将圆锥角膜的诊断准确率进一步提升,ROC 曲线下面积为 0.955。同时通过回归拟合,进一步发现曲率半径是影响圆锥角膜诊断的重要参数,HCR 每减少 1 mm,圆锥角膜诊断成立的可能性增加约 4 倍。

综上所述,Corvis ST 可以很好地显示角膜的生物力学特性并反映圆锥角膜生物力学性质减弱的特点,部分参数可有效诊断出圆锥角膜,联合角膜厚度可使诊断的准确率进一步提高,可考虑将其作为圆锥角膜诊断和筛查的标准。

本研究中样本量偏小,加上 Corvis ST 测量的参数稳定性不强,进一步的研究中,需要我们扩大样本量以验证上述参数的诊断效率。另外,本研究患者入组采用了基于角膜地形图参数改变的诊断标准,故无法对角膜地形图参数和生物力学参数二者之间的关系做进一步的分析。角膜地形图参数和生物力学参数的一致性需要进行进一步的研究以明确。

作者声明 本研究与 Corvis ST 的生产厂家及销售商无任何利益关系

参考文献

- [1] Georgiou T, Funnell CL, Cassels-Brown A, et al. Influence of ethnic origin on the incidence of keratoconus and associated atopic disease in Asians and white patients[J]. *Eye (Lond)*, 2004, 18(4): 379-383. DOI:10.1038/sj.eye.6700652.
- [2] Baum J. On the location of the cone and the etiology of keratoconus [J]. *Cornea*, 1995, 14(2): 142-143.
- [3] Tian L, Ko MW, Wang LK, et al. Assessment of ocular biomechanics using dynamic ultra high-speed Scheimpflug imaging in keratoconic and normal eyes [J]. *J Refract Surg*, 2014, 30(11): 785-791. DOI:10.3928/1081597X-20140930-01.
- [4] Rabinowitz YS. Keratoconus [J]. *Surv Ophthalmol*, 1998, 42(4): 297-319.
- [5] Hon Y, Lam AK. Corneal deformation measurement using Scheimpflug noncontact tonometry [J/OL]. *Optom Vis Sci*, 2013, 90(1): e1-8 [2017-04-20]. <https://insights.ovid.com/pubmed?pmid=23238261>. DOI:10.1097/OPX.0b013e318279eb87.
- [6] Savini G, Barboni P, Carbonelli M, et al. Repeatability of automatic measurements by a new Scheimpflug camera combined with Placido topography [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2011, 37(10): 1809-1816. DOI:10.1016/j.jcrs.2011.04.033.
- [7] Gomes JA, Tan D, Rapuano CJ, et al. Global consensus on keratoconus and ectatic diseases [J]. *Cornea*, 2015, 34(4): 359-369. DOI:10.1097/ICO.0000000000000408.
- [8] McMonnies CW. Screening for keratoconus suspects among candidates for refractive surgery [J]. *Clin Exp Optom*, 2014, 97(6): 492-498. DOI:10.1111/cxo.12169.
- [9] Belin MW, Villavicencio OF, Ambrósio RR. Tomographic parameters for the detection of keratoconus; suggestions for screening and treatment parameters [J]. *Eye Contact Lens*, 2014, 40(6): 326-330. DOI:10.1097/ICL.0000000000000077.
- [10] Hayes S, Boote C, Tuft SJ, et al. A study of corneal thickness, shape and collagen organisation in keratoconus using videokeratography and X-ray scattering techniques [J]. *Exp Eye Res*, 2007, 84(3): 423-434. DOI:10.1016/j.exer.2006.10.014.
- [11] Elsheikh A, Alhasso D, Rama P. Biomechanical properties of human and porcine corneas [J]. *Exp Eye Res*, 2008, 86(5): 783-790. DOI:10.1016/j.exer.2008.02.006.
- [12] Hassan Z, Modis L, Szalai E, et al. Examination of ocular biomechanics with a new Scheimpflug technology after corneal refractive surgery [J]. *Cont Lens Anterior Eye*, 2014, 37(5): 337-341. DOI:10.1016/j.clae.2014.05.001.
- [13] Aghamohammadzadeh H, Newton RH, Meek KM. X-ray scattering used to map the preferred collagen orientation in the human cornea and limbus [J]. *Structure*, 2004, 12(2): 249-256. DOI:10.1016/j.str.2004.01.002.
- [14] 田磊,王丽强,孟晓丽,等.应用可视化角膜生物力学分析评估不同阶段圆锥角膜生物力学特征 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2014, 16(5): 268-273. DOI:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.05.003.
- [15] Tian L, Wang LQ, Meng XL, et al. Assessment of corneal biomechanical properties using corneal visualization Scheimpflug technology at different stages of keratoconus [J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2014, 16(5): 268-273. DOI:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.05.003.
- [15] Nemeth G, Hassan Z, Csutak A, et al. Repeatability of ocular biomechanical data measurements with a Scheimpflug-based noncontact device on normal corneas [J]. *J Refract Surg*, 2013, 29(8): 558-563. DOI:10.3928/1081597X-20130719-06.

(收稿日期:2017-06-20 修回日期:2018-01-02)

(本文编辑:刘艳)