

# 近视眼飞秒激光小切口角膜透镜取出术前后角膜体积变化与角膜生物力学改变的关联性

危平辉 王雁 李华 窦瑞 张佳媚 赵伟 李浏洋

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

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

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.02.011

**【摘要】** **背景** 单纯研究中央角膜厚度(CCT)与角膜生物学特性的关系无法全面阐明角膜结构变化对角膜生物力学的影响。角膜体积(CV)是角膜形态结构的主要特征性参数之一,能更全面地反映角膜整体的厚度及组织分布情况,但目前相关研究鲜见报道。**目的** 分析飞秒激光小切口角膜透镜取出术(SMILE)术后 CV 变化与角膜生物力学改变的关系。**方法** 采用前瞻性系列病例观察研究方法,纳入 2014 年 6 月至 2015 年 7 月于天津市眼科医院行 SMILE 手术的近视及近视散光患者 67 例 67 眼,均选取右眼的测定结果进行分析。术前及术后 3 个月分别采用 Pentacam 眼前节分析系统测量术眼角膜 3、3~5、5~7 和 7~10 mm 环形区的角膜体积(CV3、CV3-5、CV5-7、CV7-10);采用眼反应分析仪(ORA)系统测量术眼角膜生物力学指标,包括角膜滞后量(CH)及角膜阻力因子(CRF),计算手术前后 CV、CH 值和 CRF 值变化量( $\Delta$ );对术前 CV 与 CRF 值和 CH 值之间的关系进行评估,并对  $\Delta$ CV 与  $\Delta$ CH 和  $\Delta$ CRF 之间的关联性进行评价。**结果** SMILE 术后 3 个月术眼 CV3、CV3-5 和 CV5-7 值较术前均明显下降,差异均有统计学意义( $t=36.24, 20.38, 16.17$ , 均  $P<0.001$ );术前及术后 3 个月术眼的 CH 值分别为  $(10.06 \pm 1.11)$  mmHg 和  $(8.10 \pm 1.05)$  mmHg ( $1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$ ),CRF 分别为  $(10.40 \pm 1.38)$  mmHg 和  $(6.91 \pm 1.19)$  mmHg,术眼术后 CH 值和 CRF 值均较术前下降,差异均有统计学意义( $t=16.71, 27.41$ , 均  $P<0.001$ )。术前术眼角膜不同区域 CV 值与 CH 值和 CRF 值均呈正相关,其中 CV3 与 CH 值和 CRF 值均呈中等正相关( $r=0.571, 0.569$ , 均  $P<0.001$ ),术后 3 个月  $\Delta$ CV3 与  $\Delta$ CH 呈弱正相关( $r=0.394, P<0.001$ ),与  $\Delta$ CRF 呈中等正相关( $r=0.501, P<0.001$ )。**结论** CV 从中央区到周边区逐渐增加。术后 CV 与 CH 和 CRF 均呈正相关,CV3 可能是角膜屈光术后角膜生物力学特性改变的评估参数之一。

**【关键词】** 生物测量;角膜;体积;角膜生物力学;角膜滞后量;角膜阻力因子;飞秒激光小切口角膜透镜取出术

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (81470658、81670884);天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目 (14JCZDJC35900);天津市自然科学基金项目 (16JCQNJC12600)

**Association between corneal volume change and corneal biomechanical property before and after small incision lenticule extraction in myopia** Wei Pinghui, Wang Yan, Li Hua, Dou Rui, Zhang Jiamei, Zhao Wei, Li Liuyang

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

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

**[Abstract]** **Background** The relationship between corneal central thickness (CCT) and corneal biomechanical property does not reflect the effective amount of ablated tissue because CCT measures only the change in a single point. Corneal volume (CV) is a representative parameter of corneal morphology, and it can fully reflect corneal thickness and tissue distribution. **Objective** This study was to investigate the correlation between volumetric corneal changes and corneal biomechanical properties after small incision lenticule extraction (SMILE). **Methods** A prospective series cases-observational study was carried out. This study protocol was approved by Ethic Committee of Tianjin Eye Hospital, and written informed consent was obtained from each patient prior to entering the cohort. Sixty-seven right eyes of 67 myopia or myopic astigmatism patients who received SMILE in Tianjin Eye Hospital from June 2014 to July 2015 were included in this study. Before and 3 months after surgery, the CV at 3, 3-5, 5-7 and 7-10 mm (CV3, CV3-5, CV5-7, CV7-10) was measured by Pentacam anterior segment analysis system, and corneal hysteresis (CH) and corneal resistance factor (CRF) were

obtained by ocular response analyzer (ORA). The changes of CV ( $\Delta CV$ ), CH ( $\Delta CH$ ) and CRF ( $\Delta CRF$ ) were calculated, and the correlations between  $\Delta CV$  and  $\Delta CH$  or  $\Delta CRF$  were analyzed. **Results** CV3, CV3-5 and CV5-7 values after SMILE were significantly lower than those before SMILE ( $t=36.24, 20.38, 16.17$ , all at  $P<0.001$ ). The CH values before and after SMILE were  $(10.06 \pm 1.11)$  mmHg and  $(8.10 \pm 1.05)$  mmHg ( $1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$ ), and the CRF values before and after SMILE were  $(10.40 \pm 1.38)$  mmHg and  $(6.91 \pm 1.19)$  mmHg, respectively, showing significant reduces after SMILE than before SMILE ( $t = 16.71, 27.41$ , both at  $P<0.001$ ). Positive correlations were seen between the CV values at different corneal areas and CH value or CRF value. Moderate positive correlations were found between CV3 and CH or CRF ( $r=0.571, 0.569$ ; both at  $P<0.001$ ) before surgery, and 3 months after surgery, a weak positive correlation was seen between  $\Delta CV3$  and  $\Delta CH$  ( $r = 0.394, P<0.001$ ) or a moderate positive correlation between  $\Delta CV3$  and  $\Delta CRF$  ( $r=0.501, P<0.001$ ). **Conclusions** The CV value is gradually increased from the central cornea to periphery cornea. The CV change is associated with CH and CRF changes after SMILE, and CV3 probably is a useful parameter for the evaluation of corneal biomechanics after refractive surgery.

**[Key words]** Biometry; Cornea; Volume; Corneal biomechanics; Corneal hysteresis; Corneal resistance factor; Small incision lenticule extraction

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (81470658, 81670884); Tianjin Applied Basic and Frontier Technology Research Key Project (14JCZDJC35900); Tianjin Natural Science Foundation (16JCQNJC12600)

飞秒激光小切口角膜透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 是目前新型的角膜屈光手术方式之一,其基本原理是应用飞秒激光在角膜基质层制作一透镜,使角膜变平、变薄以矫正屈光不正,在这个过程中伴随着角膜厚度和体积的变化。角膜厚度和角膜体积 (corneal volume, CV) 是角膜形态结构的主要特征性参数<sup>[1]</sup>, 目前的研究多从中央角膜厚度 (central cornea thickness, CCT) 和残余基质厚度的角度对 SMILE 术后角膜生物力学特性变化的机制进行分析<sup>[2-4]</sup>, 但无法全面分析角膜结构特性对角膜生物力学的影响。本研究中分析 SMILE 术后 CV 变化与角膜生物力学特性之间的相关性,以评估 SMILE 手术后 CV 的变化对角膜生物力学特性的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

采用前瞻性系列病例观察研究方法,纳入 2014 年 6 月至 2015 年 7 月于天津市眼科医院行 SMILE 手术的近视及近视合并散光患者 67 例 67 眼,均选取右眼进行分析,其中男 32 例 32 眼,女 35 例 35 眼;年龄 18 ~ 37 岁,平均  $(24.48 \pm 5.46)$  岁,术前患者基线特征见表 1。纳入标准:年龄  $\geq 18$  岁;最佳矫正视力 (best corrected visual acuity, BCVA)  $\geq 0.8$ , 球镜度  $\leq -10.00 \text{ D}$ , 柱镜度  $< 6.00 \text{ D}$ ; 2 年内近视度数变化量  $\leq 0.5 \text{ D}$ ; 角膜透明;停戴软性角膜接触镜  $\geq 2$  周,停戴硬性角膜接触镜  $\geq 4$  周;术前角膜厚度  $\geq 480 \mu\text{m}$ 。排除标准:有眼部活动性疾病或眼部手术和外伤史者;角膜地形图提示圆锥角膜及隐匿性圆锥角膜者;精神性疾

病患者。本研究方案经天津市眼科医院伦理委员会批准 (批准文号: TJYYLL-2014-19), 所有患者术前均签署知情同意书。

表 1 纳入患者的基线特征

参数	眼数	$\bar{x} \pm s$	标准误	范围
年龄 (岁)	67	$24.48 \pm 5.46$	0.67	18 ~ 37
角膜平均曲率 (D)	67	$43.56 \pm 1.22$	0.15	40.4 ~ 46.2
等效球镜度 (D)	67	$-5.47 \pm 1.59$	0.14	-8.87 ~ -1.62
透镜厚度 ( $\mu\text{m}$ )	67	$97.80 \pm 23.91$	2.19	53 ~ 141
残余基质厚度 ( $\mu\text{m}$ )	67	$339.37 \pm 38.60$	3.54	255 ~ 426

### 1.2 方法

**1.2.1 术前常规检查** 所有患者术前均行常规眼部检查,包括裸眼视力 (uncorrected visual acuity, UCVA)、BCVA、主觉验光检查、非接触式眼压测量、裂隙灯显微镜检查、扩瞳后直接检眼镜眼底检查等。采用眼反应分析仪 (ocular response analyzer, ORA) (美国 Reichert 公司) 测定患者的角膜生物力学特性,包括角膜滞后量 (corneal hysteresis, CH) 及角膜阻力因子 (corneal resistance factor, CRF)。

**1.2.2 角膜地形图测定 CV 和 CCT** 采用 Pentacam 眼前节图像分析系统 (德国 Oculus 公司) 进行分析,利用  $360^\circ$  旋转式 Scheimpflug 摄像扫描原理测量和分析 25 000 ~ 138 000 个角膜数据点,获得眼前节的三维立体图像,检查时间少于 2 s。检查方法:于暗室环境中,被检者双眼自然睁开并注视前方指示灯,检查者对焦完

毕开始扫描,检查时要求患者尽量睁大双眼,以保证角膜不被遮挡从而影响数据结果,选取成像质量>95%、分析直径>9 mm 的测量结果进行分析。取 CV 和 CCT 作为测量指标。为排除不同直径下 CV 重复计算对结果的干扰,本研究分析 CV 时将角膜分为 4 个区:中央区为角膜中央 3 mm CV(CV3),旁中央区为 3~5 mm 环形区 CV(CV3-5),过渡区为 5~7 mm 环形区 CV(CV5-7),周边区为 7~10 mm 环形区 CV(CV7-10)。

### 1.2.3 手术方法

所有患者的手术均由同一医师完成。术前用生理盐水冲洗术眼结膜囊,眼周消毒,用质量分数 0.5% 盐酸奥布卡因滴眼液点眼行表面麻醉,患者取仰卧位,嘱患者注视固视灯,用负压吸引环压平以固定眼球,对准角膜中心后采用 Visual Max 飞秒激光器(德国 Carl Zeiss 公司)进行扫描切割,频率为 500 kHz,能量为 110~150 nJ,光学区直径设定为 6.5 mm,角膜帽直径为 7.5 mm,角膜帽厚度均为 120 μm。SMILE 的切口位于上方角膜,透镜扫描顺序依次为基质内透镜后表面、透镜边缘、透镜前表面、SMILE 术式小切口。透镜后表面采用由外到内的螺旋型扫描方式,透镜的前表面采用由内向外螺旋型扫描方式。完成扫描后用显微分离器将透镜前表面和上方角膜组织分离,然后分离透镜后表面,将透镜游离后用显微镊取出,用平衡盐溶液冲洗角膜基质床。术毕立即点用质量分数 0.3% 氧氟沙星滴眼液联合质量分数 0.5% 酮咯酸氨丁三醇滴眼液。术后第 1 天起用 0.3% 氧氟沙星滴眼液连续 3 D,每天 4 次;质量分数 0.1% 氟米龙滴眼液每天 4 次,每 2 周递减 1 次,2 个月后减量至停药。

1.2.4 术后随访 术后 3 个月测定术眼角膜 CH 值、CRF 值、CCT 值以及 CV3、CV3-5、CV5-7 和 CV7-10 值。

### 1.3 统计学方法

采用 SPSS 20.0 统计学软件(美国 SPSS 公司)进行统计分析。本研究中测试指标的数据资料经 Kolmogorov-Smirnov 检验服从正态分布,以  $\bar{x} \pm s$  表达。采用术眼手术前后自身对照研究设计,术眼术前与术后 3 个月间不同角膜区的 CV 值、CH 值和 CRF 值的差异比较均采用配对 *t* 检验, $P < 0.05$  为差异有统计学意义。采用 Pearson 直线相关分析法评估术前 CV 与 CRF 值和 CH 值之间的相关关系以及术后  $\Delta CV$  与  $\Delta CH$  和  $\Delta CRF$  之间的关系,对相关系数进行假设检验, $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 SMILE 手术前后 CV 变化

术前不同直径范围内的 CV 值明显不同,由小到大依次为 CV3、CV3-5、CV5-7 和 CV7-10。与术前相比,术后 3 个月时 CV3、CV3-5 和 CV5-7 值均明显下降,差异均有统计学意义( $t = 36.24, 20.38, 16.17$ , 均  $P < 0.001$ );术后 3 个月各区域 CV 变化量由小到大依次为 CV7-10、CV3、CV5-7 和 CV3-5(表 2)。

表 2 SMILE 手术前后 CCT 及 CV 变化( $\bar{x} \pm s$ )

时间	眼数	CCT(μm)	CV3(mm <sup>3</sup> )	CV3-5(mm <sup>3</sup> )	CV5-7(mm <sup>3</sup> )	CV7-10(mm <sup>3</sup> )
术前	67	553.13±27.73	3.99±0.21	7.72±0.38	13.51±0.68	37.04±1.91
术后 3 个月	67	470.71±35.67	3.46±0.25	7.08±0.48	12.92±0.75	36.91±1.88
差值		82.42±22.96	0.54±0.16	0.65±0.35	0.59±0.39	0.13±0.78
<i>t</i> 值		39.15	36.24	20.38	16.17	1.83
<i>P</i> 值		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.07

注:SMILE:飞秒激光小切口角膜透镜取出术;CCT:中央角膜厚度;CV3:3 mm 角膜体积;CV3-5:3~5 mm 环形区角膜体积;CV5-7:5~7 mm 环形区角膜体积;CV7-10:7~10 mm 环形区角膜体积(配对 *t* 检验)

### 2.2 SMILE 手术前后角膜 CH 值和 CRF 值变化

术后 3 个月,术眼角膜 CH 值和 CRF 值均较术前下降,差异均有统计学意义( $t = 16.71, 27.41$ , 均  $P < 0.001$ )(表 3)。

表 3 术眼 SMILE 手术前后 CH 和 CRF 变化( $\bar{x} \pm s$ , mmHg)

参数	眼数	CH	CRF
术前	67	10.06±1.11	10.40±1.38
术后 3 个月	67	8.10±1.05	6.91±1.19
差值		1.97±0.96	3.48±1.04
<i>t</i> 值		16.71	27.41
<i>P</i> 值		<0.001	<0.001

注:SMILE:飞秒激光小切口角膜透镜取出术;CH:角膜滞后量;CRF:角膜阻力因子(配对 *t* 检验) 1 mmHg=0.133 kPa

### 2.3 术眼 CV 与 CH 值和 CRF 值的关系

术前 CCT、CV3、CV3-5、CV5-7 和 CV7-10 与 CH 值和 CRF 值均呈正相关(均  $P < 0.05$ ),其中 CV3 与 CH 值和 CRF 值均呈中等正相关( $r = 0.571, 0.569$ , 均  $P < 0.001$ ),CCT 与 CH 值和 CRF 值均呈中等正相关( $r = 0.582, 0.583$ , 均  $P < 0.001$ )(表 3,图 1)。手术前后  $\Delta CV3$ 、 $\Delta CV3-5$  与  $\Delta CH$  和  $\Delta CRF$  均呈正相关(均  $P < 0.05$ ); $\Delta CV3$  与  $\Delta CH$  和  $\Delta CRF$  间分别呈弱正相关和中等正相关( $r = 0.394, 0.501$ , 均  $P < 0.001$ )(图 1), $\Delta CCT$  与  $\Delta CH$  和  $\Delta CRF$  间分别呈弱的正相关和中等正相关( $r = 0.435, 0.522$ , 均  $P < 0.001$ )(表 4)。

表 4 CV 与 CH 值和 CRF 值相关性分析

参数	CRF		CH		参数	ΔCRF		ΔCH	
	r 值	P 值	r 值	P 值		r 值	P 值	r 值	P 值
CV3 (mm <sup>3</sup> )	0.569	<0.001	0.571	<0.001	ΔCV3 (mm <sup>3</sup> )	0.501	<0.001	0.394	<0.001
CV3-5 (mm <sup>3</sup> )	0.567	<0.001	0.574	<0.001	ΔCV3-5 (mm <sup>3</sup> )	0.359	<0.001	0.269	0.003
CV5-7 (mm <sup>3</sup> )	0.530	<0.001	0.551	<0.001	ΔCV5-7 (mm <sup>3</sup> )	0.150	0.104	0.124	0.178
CV7-10 (mm <sup>3</sup> )	0.436	<0.001	0.492	<0.001	ΔCV7-10 (mm <sup>3</sup> )	0.135	0.143	0.134	0.146
CCT (μm)	0.583	<0.001	0.582	<0.001	ΔCCT (μm)	0.522	<0.001	0.435	<0.001

注:CV:角膜体积;CH:角膜滞后量;CRF:角膜阻力因子;ΔCRF:角膜阻力因子变化量;ΔCH:角膜滞后量变化量;CV3:3 mm 环形区角膜体积;CV3-5:3~5 mm 环形区角膜体积;CV5-7:5~7 mm 环形区角膜体积;CV7-10:7~10 mm 环形区角膜体积(Pearson 直线相关分析)

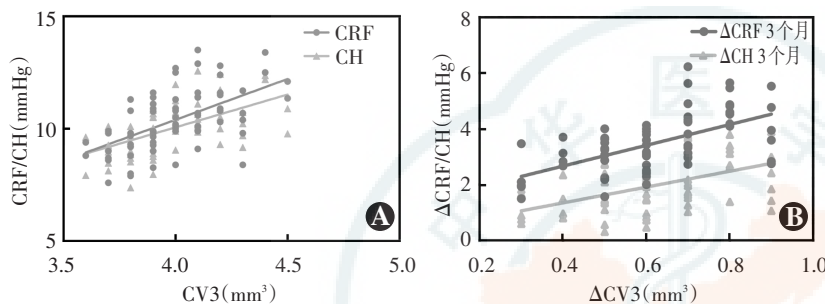


图 1 CV 与 CH 值和 CRF 值相关性分析 (Pearson 直线相关分析) A: CV3 与 CH 值和 CRF 值的相关性 (r=0.569, 0.571, 均 P<0.001) B: ΔCV3 与 ΔCH 值和 ΔCRF 值的相关性 (r=0.394, 0.501, 均 P<0.001) 注: CRF: 角膜阻力因子; CH: 角膜滞后量; CV3: 3 mm 环形区角膜体积; ΔCRF: 角膜阻力因子变化量; ΔCH: 角膜滞后量变化量; ΔCV3: 3 mm 环形区角膜体积变化量

### 3 讨论

作为角膜的结构参数之一, CV 不仅能反映角膜厚度的变化, 还能对角膜形态学的变化进行量化分析<sup>[5]</sup>。研究表明, 准分子激光角膜原位磨镶术中角膜组织的切削量, 即 ΔCV 可能是角膜屈光手术后发生角膜后扩张的危险因素之一<sup>[6-7]</sup>。角膜后扩张是角膜屈光手术后少见但是严重的并发症, 术后角膜生物力学指标的下降是角膜后扩张的危险因素之一<sup>[2, 8-9]</sup>。目前, 鲜见针对 SMILE 手术前后 CV 变化对角膜生物力学特性影响的研究。本研究就 SMILE 手术前后 CV 变化及与角膜生物力学特性变化间的相关性进行研究, 为临床工作提供依据。

近年来关于 CV 的研究逐渐增多, Suzuki 等<sup>[5]</sup>及 Doganay 等<sup>[10]</sup>就白内障超声乳化摘出术后 CV 的变化进行研究, 认为 CV 可作为白内障超声乳化术后角膜内皮细胞功能损伤程度的评价指标。研究表明, 与正常角膜相比, 圆锥角膜患者 CV 值下降, 因此临床上可用 CV 并结合其他参数来提高圆锥角膜诊断的敏感性和特异性, CV 或许是角膜屈光手术术前适应证筛查的指标<sup>[11-15]</sup>。目前, 在体角膜生物力学特性测量多采用 ORA, 其所测量的 2 个参数 CH 和 CRF 在反映角膜生物力学特性上的重复性和可操作性较好<sup>[16-17]</sup>。

Gatinel 等<sup>[18]</sup>应用几何学模型来估算准分子激光角膜屈光手术后 CV 的变化, 得出估算 CV 变化的公式:  $V = D * (S/9)^4$ , 其中 D 为等效球镜度, S 为光学区直径, 该公式只能用于分析一定光学区和曲率半径内的 CV 变化, 不适用于大样本人群的统计分析。Pentacan 三维眼前节分析诊断系统应用 Scheimpflug 光学原理进行断层扫描, 通过获取眼前节的三维图像可获得 CV 值, 其测量的准确性好<sup>[19-20]</sup>, 重复性可达 ±0.3 mm<sup>3</sup><sup>[9]</sup>。为排除不同直径范围 CV 的重复计算对测量结果的干扰, 本研究将 CV 分为 CV3、CV3-5、CV5-7 和 CV7-10, 通过分析 SMILE 手术前后 CV 的变化, 发现从中央区到周边区 CV 值逐渐增加。Ambrósio 等<sup>[11]</sup>研究发现, 圆锥角膜患者 CV 值平均较正常对照组小 0.943 mm<sup>3</sup>, 且圆锥角膜 CV 值从中央到周边的变化趋势较正常人更陡。本研究中发现, SMILE 术后 3 个月 CV3、CV3-5 以及 CV5-7 值较术前均下降, 而 CV7-10 值手术前后比较差异无统计学意义, 这主要是因为本研究中光学区直径均在 7 mm 以内, 术后基质纤维断裂主要发生在角膜 7 mm 区域内, 而 7-10 mm 的基质纤维并未发生离断, 未离断的基质纤维可维持角膜基质间的拉力, 因此 CV 无明显变化。

本研究中还发现, SMILE 术后 3 个月时 ΔCV3-5 平均比 ΔCV3 约大 0.11 mm<sup>3</sup>, 这与激光切削原理不符。Munnerlyn 等<sup>[21]</sup>研究表明, 准分子激光矫正近视时最大切削深度位于切削中心附近, 角膜周边区域激光斑与角膜平面呈一定的角度, 使得激光斑变成椭圆, 导致角膜周边角膜切削的组织较中央少, 因此理论上 ΔCV3 应大于 ΔCV3-5, 考虑这可能与术后角膜基质层生物力学特性的变化有关<sup>[22]</sup>。SMILE 术中在基质层制作透镜后, 角膜帽与残余基质间的胶原纤维被切断, 该区域两侧的胶原纤维回缩, 层间黏合力下降, 生物力

学特性性能降低,中央区角膜基质贴合较周边松弛,使得测得的 CV 值偏小。

通过线性相关分析发现,本组术眼在 SMILE 术前的 CH 和 CRF 与不同区域内 CV 均呈正相关,这主要是因为随着 CV 增加,角膜所含胶原纤维成分和细胞外基质成分随之增加,能够提供角膜强度的有效胶原纤维较多,使角膜的机械强度增加,受气流压迫时产生的形变减小<sup>[1]</sup>。术后 3 个月时,  $\Delta$ CH 和  $\Delta$ CRF 与  $\Delta$ CV3、 $\Delta$ CV3-5、 $\Delta$ CCT 均呈正相关,其中与  $\Delta$ CV3 的关联强度接近  $\Delta$ CCT。ORA 激光探测器主要监测中央角膜 3 mm 的角膜形变,研究显示仅  $\Delta$ CV3、 $\Delta$ CV3-5 与  $\Delta$ CH 和  $\Delta$ CRF 呈正相关,间接反映出 CV 与角膜生物力学特性相关性的准确性<sup>[16]</sup>。Franco 等<sup>[23]</sup> 研究指出,CCT 是角膜屈光手术适应证筛查的主要指标,也是术后判断发生角膜后扩张可能性的指标之一,但 CCT 仅能反映中央角膜一个点的变化,而 CV 可从整体上对术后角膜组织变化进行量化分析,能更全面地反映角膜屈光术后角膜的整体形态,特别是中央 3 mm 区域。因此在评估角膜屈光手术适应证时,除 CCT 外还应考虑 CV 变化,特别是 CV3 的变化。

综上所述,术前 CV 从中央区到周边区逐渐增加,SMILE 术后除周边区域外,其他各区域内 CV 值均下降,SMILE 术后角膜中央区角膜帽与基质床间贴合可能不如周边紧密;术前 CV 与 CH 和 CRF 均呈正相关,术后  $\Delta$ CV3、 $\Delta$ CV3-5 与  $\Delta$ CH 和  $\Delta$ CRF 均呈正相关,因此 CV3 可能是角膜屈光手术前后角膜生物力学特性评估的重要参数。

## 参考文献

- [1] Viswanathan D, Kumar NL, Males JJ, et al. Relationship of structural characteristics to biomechanical profile in normal, keratoconic, and crosslinked eyes[J]. *Cornea*, 2015, 34(7): 791-796. DOI: 10.1097/ICO.0000000000000434.
- [2] Wu D, Wang Y, Zhang L, et al. Corneal biomechanical effects: small-incision lenticule extraction versus femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2014, 40(6): 954-962. DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.07.056.
- [3] Pedersen IB, Bak-Nielsen S, Vestergaard AH, et al. Corneal biomechanical properties after LASIK, ReLEx flex, and ReLEx smile by Scheimpflug-based dynamic tonometry[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2014, 52(8): 1329-1335. DOI: 10.1007/s00417-014-2667-6.
- [4] Agca A, Ozgurhan EB, Demirok A, et al. Comparison of corneal hysteresis and corneal resistance factor after small incision lenticule extraction and femtosecond laser-assisted LASIK: a prospective fellow eye study[J]. *Cont Lens Anterior Eye*, 2014, 37(2): 77-80. DOI: 10.1016/j.clae.2013.05.003.
- [5] Suzuki H, Takahashi H, Hori J, et al. Phacoemulsification associated corneal damage evaluated by corneal volume[J]. *Am J Ophthalmol*, 2006, 142(3): 525-528. DOI: 10.1016/j.ajo.2006.04.024.
- [6] Argento C, Cosentino MJ, Tytun A, et al. Corneal ectasia after laser in situ keratomileusis[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2001, 27(9): 1440-1448.
- [7] Pallikaris IG, Kymionis GD, Astyrakakis NI. Corneal ectasia induced by laser in situ keratomileusis[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2001, 27(11): 1796-1802.
- [8] 窦瑞, 王雁, 吴文静, 等. 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术术后角膜生物力学的影响因素分析[J]. *中华实验眼科杂志*, 2016, 34(5): 448-455. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.05.013. Dou R, Wang Y, Wu WJ, et al. Influencing factors of corneal biomechanics following small incision lenticule extraction[J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2016, 34(5): 448-455. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.05.013.
- [9] Rosa N, Borrelli M, de Bernardo M, et al. Corneal morphological changes after myopic excimer laser refractive surgery[J]. *Cornea*, 2011, 30(2): 130-135. DOI: 10.1097/ICO.0b013e3181f237a1.
- [10] Doganay S, Bozgul FP, Emre S, et al. Evaluation of anterior segment parameter changes using the Pentacam after uneventful phacoemulsification[J]. *Acta Ophthalmol*, 2010, 88(5): 601-606. DOI: 10.1111/j.1755-3768.2008.01446.x.
- [11] Ambrósio R, Alonso RS, Luz A, et al. Corneal-thickness spatial profile and corneal-volume distribution: tomographic indices to detect keratoconus[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2006, 32(11): 1851-1859. DOI: 10.1016/j.jcrs.2006.06.025.
- [12] Emre S, Doganay S, Yolglu S. Evaluation of anterior segment parameters in keratoconic eyes measured with the Pentacam system[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2007, 33(10): 1708-1712. DOI: 10.1016/j.jcrs.2007.06.020.
- [13] Mannion LS, Tromans C, O'Donnell C. Reduction in corneal volume with severity of keratoconus[J]. *Curr Eye Res*, 2011, 36(6): 522-527. DOI: 10.3109/02713683.2011.553306.
- [14] Cerviño A, Gonzalez-Mejome JM, Ferrer-Blasco T, et al. Determination of corneal volume from anterior topography and topographic pachymetry: application to healthy and keratoconic eyes[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2009, 29(6): 652-660. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2009.00642.x.
- [15] Sedaghat MR, Sharepoor M, Hassanzadeh S, et al. The corneal volume and biomechanical corneal factors: Is there any correlation? [J]. *J Res Med Sci*, 2012, 17(1): 32-39.
- [16] Luce DA. Determining *in vivo* biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2005, 31(1): 156-162. DOI: 10.1016/j.jcrs.2004.10.044.
- [17] Landoulsi H, Saad A, Haddad NN, et al. Repeatability of Ocular Response Analyzer waveform parameters in normal eyes and eyes after refractive surgery[J]. *J Refract Surg*, 2013, 29(10): 709-714. DOI: 10.3928/1081597X-20130919-04.
- [18] Gatinel D, Hoang-Xuan T, Azar DT. Volume estimation of excimer laser tissue ablation for correction of spherical myopia and hyperopia[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2002, 43(5): 1445-1449.
- [19] Jain R, Dilraj G, Grewal SP. Repeatability of corneal parameters with Pentacam after laser in situ keratomileusis[J]. *Indian J Ophthalmol*, 2007, 55(5): 341-347.
- [20] O'Donnell C, Maldonado-Codina C. Agreement and repeatability of central thickness measurement in normal corneas using ultrasound pachymetry and the OCULUS Pentacam[J]. *Cornea*, 2005, 24(8): 920-924.
- [21] Munnerlyn CR, Koons SJ, Marshall J. Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery[J]. *J Cataract Refract Surg*, 1988, 14(1): 46-52.
- [22] Reinstein DZ, Archer TJ, Gobbe M. Lenticule thickness readout for small incision lenticule extraction compared to artemis three-dimensional very high-frequency digital ultrasound stromal measurements[J]. *J Refract Surg*, 2014, 30(5): 304-309. DOI: 10.3928/1081597X-20140416-01.
- [23] Franco S, Lira M. Biomechanical properties of the cornea measured by the Ocular Response Analyzer and their association with intraocular pressure and the central corneal curvature[J]. *Clin Exp Optom*, 2009, 92(6): 469-475. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2009.00414.x.

(收稿日期:2016-07-13)

(本文编辑:尹卫靖 张宇)