doi:10.11659/jjssx.02E020110

·临床研究·

SMILE 和 PRK 的生物力学特性对比

黄志翾[1,2],陶梦颖[1],刘庆明[2],李玥娇[1],刘陇黔[1] (1.四川大学华西医院眼科,四川 成都 610041;2.广州天河视献眼科门诊部,广东 广州 510000)

[摘 要] **目的** 探讨飞秒激光小切口透镜提取术(SMILE)和准分子激光角膜切削术(PRK)对角膜生物力学的影响。**方法** 选取广州视献眼科屈光手术中心 2019 年 10 月至 2020 年 1 月收治的中低度近视(等效球镜小于 -6.00 D)患者 20 例(40 眼),根据患者意愿分为 SMILE 组(10 例,20 眼)和 PRK 组(10 例,20 眼)。使用角膜生物力学分析仪测量术前及术后 1 个月角膜在空气脉冲作用下的形变参数。**结果** 在等效球镜和角膜厚度等基线条件相近的情况下,SMILE 组角膜切削量显著高于 PRK 组,差异有统计学意义($t=3.502$,$P=0.02$)。术前和术后 1 个月,2 组患者反向曲率半径(Radius)、第一次压平时间(AT1)、第一次压平角膜长度(Length1)、峰值距离(Peak Distance)和变形幅度比(DA Ratio)组内分别比较,差异有统计学意义($P<0.05$)。SMILE 组和 PRK 组 ΔDA Ratio、ΔLength2、ΔAT2 和 ΔPeak Distance 比较,差异均有统计学意义($P<0.05$)。**结论** 角膜屈光手术改变了角膜的生物力学性能,角膜对变形的阻力变小,角膜硬度降低。SMILE 组术后 Peak Distance 和 DA Ratio 生物力学参数较 PRK 组明显增加,说明 SMILE 术对角膜生物力学影响更大。

[关键词] SMILE;PRK;Corvis ST;生物力学;屈光不正

[中图分类号] R779.65 [文献标识码] A [收稿日期] 2020-02-25

Comparison of SMILE and PRK on corneal biomechanical properties

HUANG Zhi-xuan[1,2],TAO Meng-ying[1],LIU Qing-ming[2],LI yue-jiao[1],LIU Long-qian[1] (1. Department of Ophthalmology, West China Hospital,Sichuan University,Chengdu Sichuan 610041,China;2. Department of Ophthalmology,Broad Vision,Guangzhou Guangdong 510000,China)

Abstract: Objective To evaluate the influence of small incision lenticule extraction (SMILE) and photorefractive keratectomy (PRK) on corneal biomechanical properties. **Methods** A total of 40 patients(40 eyes)from October 2019 to January 2020 in Broad Vision with low and moderate myopia (spherical equivalent refraction was below -6 diopters) were divided into SMILE group(10 patients,20 eyes) and PRK group(10 patients,20 eyes) according to the patient's wishes. Corneal applanation and deformation were registered with Corvis ST during an air-pulse before and 1 month after surgery. **Results** The cut depth of SMILE group was deeper than that of PRK group,the difference was significant between the two group at the similar baseline conditions such as spherical equivalent and corneal thickness ($t=3.502$,$P=0.02$). There were significant differences in Corvis ST biomechanical parameters including radius at highest concavity (HC radius),time until first applanation (A1 time), length1 at the applanation, peak distance and deformation amplitude in each group before and one month after surgery($P<0.05$). Furthermore,the differences in deformation amplitude ratio (ΔDA ratio), Δlength2, time until second applanation (ΔA2 time)and Δpeak distance were significant between two groups($P<0.05$). **Conclusion** Keratorefractive procedures alter the corneal biomechanical properties,with the corneal resistance to deformation decreased and the corneal hardness decreased. Biomechanical parameters of peak distance and DA ratio were significantly increased in SMILE group compared with PRK group, indicating that SMILE surgery has a greater impact on corneal biomechanics.

Keywords: SMILE;PRK;Corvis ST;biomechanics;refractive error

近视的患病率在全世界达 49%[1-2]。随着激光技术的发展,激光矫正眼部屈光不正的新技术被广泛研究运用。1996 年美国食品和药物管理局(FDA)批准了第一种角膜激光手术,即准分子激光角膜切削术(photorefractive keratectomy,PRK)[3]。随后角膜激光手术经过多年的发展和技术进步,飞秒激光问世,且随着技术的改良,飞秒激光小切口透镜提取术(small incision lenticule extraction,SMILE)也随之出现[4]。角膜扩张是屈光手术的并发症之一,尽管据报道其发病率仅为 0.04% ~0.6%,但是患者发病之前角膜生物力

[通信作者] 刘陇黔,E-mail:b.q15651@hotmail.com

学特性可能会发生变化,生物力学特征成为角膜扩张的辅助诊断方法,受到越来越多的关注[5-7]。本研究通过比较 SMILE 和 PRK 对中低度数人群角膜生物力学的影响,研究手术前后角膜生物力学特性的变化,以期为临床上的中低度数近视患者在角膜薄或生物力学异常的情况下选择合理安全的近视手术方式提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 临床资料

本研究为前瞻性、非随机试验,选取广州视献眼科屈光手术中心 2019 年 10 月至 2020 年 1 月接受手术并同意参加研究的中低度近视(等效球镜小于 -6.00 D)患者 20 例(40 眼)进行观察性研究,根据患者意愿将其分为 SMILE 组和 PRK 组。SMILE 组 10 例(20 眼),其中男 4 例,女 6 例;PRK 组 10 例(20 眼),其中男 5 例,女 5 例。SMILE 组切削量指标显著高于 PRK 组,组间比较差异有统计学意义($t=3.502$,$P=0.02$)。SMILE 组和 PRK 组患者的年龄、实际矫正度数、术前角膜厚度、角膜直径、生物力学矫正眼压(biomechanically-corrected IOP ,bIOP)、切削光区以及计算剩余角膜厚度等术前临床资料比较,差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。

纳入标准:①年龄 18 ~ 35 岁;②角膜厚度 480 ~ 580 μm;③术前为中低度近视(等效球镜小于 -6.00 D),符合角膜激光手术的适应证。排除标准:有角膜激光手术的绝对禁忌证和相对禁忌证[8]。所有患者术前均签署手术知情同意书,检查无创非接触,研究符合《赫尔辛基宣言》,经四川大学华西医院生物医学伦理委员会审查(审 545 号)。

表 1 患者临床资料比较($n=20$,$\bar{x}\pm s$)

组别	年龄(岁)	实际矫正度数(D)	术前角膜厚度((m)	切削光区(mm)	计算切削量((m)	计算剩下角膜厚度((m)	角膜直径(mm)	术前 bIOP(mmHg)
SMILE 组	29.29 ±3.45	-3.96 ±1.00	527.21 ±20.81	6.50 ±0.00	83.64 ±15.20	443.57 ±19.50	11.27 ±0.38	15.06 ±1.84
PRK 组	27.43 ±4.60	-4.20 ±0.93	522.29 ±29.25	6.47 ±0.07	64.36 ±13.90	457.93 ±18.62	11.26 ±0.43	15.71 ±1.33
t	1.208	0.650	0.514	1.472	3.502	-1.992	0.047	-1.069
P	0.238	0.522	0.612	0.165	0.002	0.057	0.963	0.295

1.2 检查方法

术前测量所有术眼裸眼视力(UCVA)、最佳矫正视力(BCVA)和 bIOP,使用裂隙灯和检眼镜检查眼前节及眼底,并且进行睫状肌麻痹检影和插片验光等检查。应用 Pentacam 三维眼前节分析诊断系统进行角膜地形图测量,获取角膜前后表面及厚度相关数据。

可视化角膜生物力学分析仪(corneal visualization scheimpflug technology,Corvis ST)采用非接触式眼压计对角膜施加空气脉冲,然后用高速观察和运动 Scheimpflug 实时摄像机记录力学参数[9-12]。本研究在术前及术后 1 个月测量双眼角膜生物力学参数并且计算参数的变化量(Δ,术前减去术后),其中角膜生物力学基础特性参数为:第一次压平时间(AT1,ms)、第一次压平角膜长度(Length1,mm)、第一次压平速度(Velocity1,m/s),第二次压平时间(AT2,ms)、第二次压平角膜长度(Length2,mm)、第二次压平速度(Velocity2,m/s)、最高点两峰间距(Peak Distance,mm)、最高点压陷后的反向曲率半径(Radius,mm)、最高点压陷后的位移量(Def. Amp/DA,mm)、术后 Def. Amp 减去切削量(DAc,mm)。记录 Vinciguerra 筛查报告数据:变形幅度比(DA Ratio,中央与 2 mm 处位移量的比值)、综合半径(Integr Radius)、最薄点厚度和厚度变化率的比值(ARTh)、硬度参数(SP-A1,角膜表面空气压力和第一次压平时顶点的垂直位移量的比值)。

1.3 手术方法

1.3.1 SMILE 术前常规结膜囊冲洗和眼周消毒后,使用盐酸奥布卡因滴眼液点眼 2 次行表面麻醉,每次 2 滴。采用 VisuMax 型飞秒激光器进行扫描,频率为 500 kHz,能量为 27 ~ 28(135 ~ 140 nJ),角膜帽的厚度为 120 μm,基质内透镜直径为 6.50 mm,在基质内透镜直径基础上增加 1 mm 即为角膜帽直径,所有侧切角均设置为 90°,点间距和行间距均为 2.0 ~ 4.5 μm。飞秒激光制作透镜和切口的扫描顺序依次为透镜后表面、透镜边缘、透镜前表面和小切口。切口位于 10 点位,切口宽度为 2.5 mm。设置基底厚度为 15 μm。完成扫描后用显微铲先将透镜前表面和上方角膜组织分离,再分离透镜后表面,将透镜游离后用显微镊取出。

1.3.2 PRK 采用直径 8.0 mm 角膜上皮环钻标记,用上皮分离器刮除上皮后进行准分子激光切削,完毕后给予绷带型角膜接触镜保护创面 7 d。角膜基质切削采用 MeL-90 准分子激光仪,频率为 250 Hz。

所有手术均由同一经验丰富的医师在单盲(医生不知道患者是否参与研究)下完成。

1.4 统计方法

采用 SPSS 21.0 软件进行数据的统计分析整理,符合正态分布的计量资料采用均数 ± 标准差($\bar{x}\pm s$)描述,组间比较用独立样本 t 检验分析;不符合正态

分布的计量资料采用中位数 M(四分位数)描述,组间比较用非参数秩和检验分析。$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者手术治疗前后生物力学指标比较

治疗前各指标组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$);治疗后 Peak Distance、DA Ratio 组间比较,差异有统计学意义($P<0.05$),且 SMILE 组均显著高于 PRK 组;其余指标组间比较差异均无统计学意义($P>0.05$)。SMILE 组治疗前后 AT1、AT2、Length1、Peak Distance、Radius、Def. Amp、DA Ratio、Integr Radius、ARTh、SP-A1、角膜实测厚度比较,差异有统计学意义($P<0.05$);PRK 组治疗前后 AT1、Length1、Length2、Peak Distance、Radius、DA Ratio、Integr Radius、ARTh、SP-A1、角膜实测厚度比较,差异有统计学意义($P<0.05$),见表2。

表2 患者手术治疗前后生物力学指标比较($n=20$)

指标	SMILE 组		PRK 组		$Z1$	$P1$	$Z2$	$P2$	$Z3$	$P3$	$Z4$	$P4$
	治疗前	治疗后	治疗前	治疗后								
AT1	7.170(6.890,7.270)	6.675(6.580,6.880)	7.160(6.925,7.270)	6.860(6.695,7.033)	−0.368	0.713	−1.701	0.089	−3.296	0.001	−2.766	0.006
AT2	21.890(21.730,22.190)	22.070(21.868,22.585)	21.805(21.668,22.063)	21.895(21.620,22.208)	−0.552	0.581	−1.632	0.103	−1.979	0.048	−0.188	0.851
Length1	2.175(1.868,2.673)	1.855(1.743,1.890)	1.910(1.835,2.175)	1.920(1.838,1.945)	−1.196	0.232	−1.564	0.118	−2.574	0.010	−1.992	0.046
Velocity1	0.170(0.168,0.183)	0.180(0.160,0.190)	0.175(0.168,0.180)	0.180(0.168,0.190)	−0.024	0.981	−0.070	0.944	−1.078	0.281	−1.153	0.249
Length2	1.935(1.535,1.978)	1.665(1.228,1.983)	2.010(1.850,2.050)	1.230(1.158,1.708)	−1.725	0.085	−1.586	0.113	−1.601	0.109	−3.233	0.001
Velocity2	−0.280(−0.295,−0.270)	−0.280(−0.315,−0.280)	−0.290(−0.290,−0.258)	−0.290(−0.313,−0.268)	−0.071	0.943	−0.070	0.944	−1.340	0.180	−1.256	0.209
Peak Distance	5.045(4.863,5.285)	5.335(5.225,5.578)	5.120(4.815,5.188)	5.210(5.025,5.253)	−0.644	0.520	−2.785	0.005	−3.297	0.001	−2.073	0.038
Radius	7.185(6.693,7.535)	6.175(5.620,6.628)	6.895(6.485,7.618)	6.000(5.703,6.240)	−0.758	0.448	−0.735	0.462	−2.605	0.009	−3.296	0.001
Def. Amp	1.085(1.038,1.198)	1.180(1.128,1.193)	1.105(1.033,1.158)	1.130(1.075,1.193)	−0.023	0.982	−1.570	0.116	−2.798	0.005	−1.682	0.093
DA/DAc	1.085(1.038,1.198)	1.090(1.030,1.130)	1.105(1.033,1.158)	1.070(1.010,1.130)	−0.023	0.982	−0.667	0.505	−0.847	0.397	−1.444	0.149
DA Ratio	4.700(4.550,4.800)	6.000(5.975,6.175)	4.650(4.500,5.125)	5.550(5.200,5.725)	−0.302	0.763	−3.813	0.000	−3.300	0.001	−3.301	0.001
Integr Radius	8.400(8.125,9.300)	11.050(10.000,11.750)	8.800(8.175,9.525)	10.600(9.650,11.150)	−0.484	0.628	−1.103	0.270	−3.297	0.001	−3.299	0.001
ARTh	397.700(358.900,430.300)	178.050(152.475,195.525)	373.700(300.500,404.350)	187.200(161.375,193.450)	−1.700	0.089	−0.827	0.408	−3.296	0.001	−3.296	0.001
SP-A1	91.900(87.825,102.425)	67.950(63.600,82.725)	99.450(87.225,104.500)	78.300(66.325,82.100)	−0.689	0.491	−1.057	0.291	−3.296	0.001	−3.297	0.001
角膜实测厚度	524.50(508.00,545.00)	441.50(431.50,468.50)	532.00(492.75,532.00)	459.00(443.75,467.25)	−0.552	0.581	−1.172	0.241	−3.297	0.001	−3.297	0.001

$Z1$、$P1$:2 组治疗前比较;$Z2$、$P2$:2 组治疗后比较;$Z3$、$P3$:SMILE 组治疗前后比较;$Z4$、$P4$:PRK 组治疗前后比较

2.2 生物力学指标变化量比较

生物力学变化量组间比较结果显示,ΔDA Ratio、ΔLength2、ΔPeak Distance、ΔAT2 组间比较差异有统计学意义($P<0.05$);且 SMILE 组 ΔDA Ratio 负值大于 PRK 组,SMILE 组 ΔLength 2 小于 PRK 组,SMILE 组 ΔPeak Distance 和 ΔAT2 负值均大于 PRK 组;其余指标组间比较差异均无统计学意义($P>0.05$),见表3。

表3 生物力学变化量比较($n=20$)

指标	SMILE 组	PRK 组	t/Z	P
ΔDA Ratio	−1.33±0.38	−0.64±0.28	−5.507	0.000
ΔIntegr Radius	−2.42±1.48	−1.65±0.96	−1.636	0.114
ΔARTh	218.69±39.96	187.14±72.92	1.420	0.168
ΔSP-A1	23.42±12.74	21.85±9.30	0.373	0.712
ΔLength1	0.54(0.01,0.79)	0.08(−0.04,0.31)	−1.425	0.154
ΔVelocity1	0.00(−0.02,0.00)	−0.01(−0.01,0.01)	−0.210	0.833
ΔLength2	0.23±0.50	0.66±0.35	−2.661	0.013
ΔVelocity2	0.02(−0.01,0.03)	0.00(−0.00,0.03)	−0.186	0.852
ΔPeak Distance	−0.29±0.16	−0.12±0.20	−2.561	0.017
ΔRadius	0.98(0.59,1.49)	0.76(0.52,1.44)	−0.368	0.713
ΔDef. Amp	−0.07±0.07	−0.04±0.08	−1.136	0.266
ΔAT1	0.39±0.23	0.29±0.28	1.019	0.317
ΔAT2	−0.31±0.45	−0.01±0.27	−2.103	0.048

3 讨论

角膜从组织学上可分为五层结构,即上皮细胞层、角膜前弹力层(Bowman 膜)、基质层、角膜后弹力层(Descemt 膜)和内皮细胞层。角膜具有一定的黏性、硬度、弹性及各向异性,因为各层组织结构不同,所以生物力学特点各异。Dawson 等[13]的研究发现,生物力学强度从高到低依次是:巩膜 > Bowman 膜 > 周边前 1/3 基质 > 中央前 1/3 基质 > 周边后 2/3 基质 > 中央后 2/3 基质 > Descemet 膜。因为角膜前 1/3 胶原纤维束密集排列、紧密交织,所以此部分角膜力学结构更强[14-15]。Shih 等[16]认为 Bowman 膜和 Descemet 膜占角膜硬度的 20%,PRK 破坏了 Bowman 膜环向应力的中心连接,并使应力集中在消融周围的 Bowman 膜的边缘,可能产生裂纹,影响角膜力学结构的稳定。SMILE 避免了表层手术对前弹力层的切削,理论上对角膜生物力学的影响会小于表层切削手术 PRK,但实践中是否如预期,值得进一步探讨。

本研究使用 Corvis ST 生物力学分析仪,其内置高速 Sheimpflug 相机可记录下角膜受脉冲气体喷击后发生形变及形变恢复的时间、长度、速率、幅度、曲率、峰间距离等参数[11-12]。然后分析对比 SMILE 和 PRK 前后各项参数的变化。结果发现,在矫正相同近视度数的情况下,患者行 SMILE 比 PRK 要消耗更多的角膜组织。有研究表明,中央角膜厚度是影响角膜生物力学的重要因素,切削越多,对生物力学影响越大[17-18]。

基础生物力学指标方面,2 组患者术后的 AT1 和 Length1 较术前减少,Velocity1 与术前比较差异无统计学意义,说明角膜在术后可以更快地被压平,但是速度上无明显差异,这可能与术后角膜曲率降低、压平长度缩短有关;术后 Def. Amp 增加、Radius 减小、Peak Distance 增加,表明术后压陷范围都增大;术后 AT2 增加、Length2 减小、Velocity2 无明显变化,表明压陷后恢复到平面状态的时间可能延长;术后 ΔAT2、ΔLength2 和 ΔPeak Distance 组间比较差异有统计学意义。综合来看,术后 SMILE 组的 Peak Distance 更大,Length2 较宽,形变恢复所需时间更长,提示基础生物力学指标方面 SMILE 弱于 PRK。

术后 2 组 DA Ratio 比较差异有统计学意义,且 SMILE 组显著高于 PRK 组。参数变化量中 2 组 ΔDA Ratio 和 ΔIntegr Radius 为负数,ΔARTh 和 ΔSP-A1 为正数,提示角膜生物力学结构强度较术前都降低,但是 2 组间只有 ΔDA Ratio 变化量的差异有统计学意义,SMILE 组 DA Ratio 大于 PRK 组,与其术后 Peak Distance 增加相符合。SP-A1 组间比较差异无统计学意义,与 ΔLength1 组间比较差异无统计学意义相符合,可能原因为,在一定切削量的范围内,角膜术后的硬度与手术方式并无太大差异,或者也可理解为生物力学结构强度降低的只是中央手术区,而周边角膜在一定程度上不会有明显改变,从而确保整个角膜力学结构的稳定。两种手术方式相比较,SMILE 在相同条件下除了消耗更多的角膜组织外,手术区范围更广,不仅有 6.5 mm 直径的手术光区,而且全飞角膜帽直径在 7.5 mm左右,这多余的 1 mm 边区的生物力学结构并不稳定,胶原纤维之间交织力减弱,所以也可以解释 SMILE 的 Peak Distance 比 PRK 更大。此外 Pedersen 等[19]认为角膜透镜取出后角膜帽与角膜基质床间可能存在潜在空隙,影响角膜生物力学参数的测量。Shen 等[20]在 Scheimpflug 相机下观察到透镜取出后角膜帽与基质床间确实留有间隙样的灰色带,并且该灰色带在术后 3 个月仍然存在,可能影响角膜术后的生物力学特性。

综合两类指标,在术前同等角膜条件及屈光度的情况下,SMILE 对角膜生物力学的影响较大。虽然术后 1 个月实测角膜厚度组间比较差异无统计学意义,但是 SMILE 组角膜形变范围越大,形变发生较早,恢复较迟。对于 DA 和 DAc 无明显差异这个问题,Fernández 等[21]在同一个眼球上比较手术前后的生物力学参数,在假设术后眼压没有变化的情况下,术后 Def. Amp/DA 的增加主要是源于中央角膜厚度的较少或角膜硬度的减弱。假设术后角膜后表面的形变程度同术前一样,因为角膜前表面被切削角膜厚度减少,所以术后 DA 增加。在这个假设条件下计算一个新的变量 DAc,尽管术后 DA 增加,但 DA 和 DAc 之间没有显著差异,这一点在本研究的结果中也得以证实。这意味着手术不会影响角膜硬度,或者 Corvis ST 无法通过空气吹扫检测到角膜硬度的微小变化。

角膜组织生物力学特性复杂,表现为非线弹性、各向异性、粘弹性等[22]。生物力学性能测量应包含本构参量,包括应力、应变和弹性模量等[23]。目前临床常用的仪器 ORA 和 Corvis ST 无法提供本构参量,在生物力学性能测量评价时存在缺陷。术后生物力学强度较术前减弱,主要是因为切削角膜会引起中央厚度减少。活体生物力学测量只能反应部分特性,评价角膜

生物力学特征性的方法还有待改进。鉴于目前的研究条件,本研究认为中低度近视患者行 PRK 短期内在角膜生物力学安全的角度将优于 SMILE,其长期的安全性有待进一步观察研究。

[参考文献]

[1] Pan CW, Ramamurthy D, Saw SM. Worldwide prevalence and risk factors for myopia[J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2012, 32(1): 3 - 16. doi: 10.1111/j.1475 - 1313.2011.00884.x.

[2] Guo H, Hosseini-Moghaddam SM, Hodge W. Corneal biomechanical properties after SMILE versus FLEX, LASIK, LASEK, or PRK: a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Ophthalmol, 2019, 19(1): 167. doi: 10.1186/s12886 - 019 - 1165 - 3.

[3] Woreta FA, Gupta A, Hochstetler B, et al. Management of post-photorefractive keratectomy pain[J]. Surv Ophthalmol, 2013, 58(6): 529 - 535. doi: 10.1016/j.survophthal.2012.11.004.

[4] Moshirfar M, Murri MS, Shah TJ, et al. Initial single-site surgical experience with SMILE: a comparison of results to FDA SMILE, and the earliest and latest generation of LASIK[J]. Ophthalmol Therapy, 2018, 7(2): 347 - 360. doi: 10.1007/s40123 - 018 - 0137 - 7.

[5] Santhiago MR, Giacomin NT, Smadja D, et al. Ectasia risk factors in refractive surgery[J]. Clin Ophthalmol, 2016, 20(10): 713 - 720. doi: 10.2147/OPTH.S51313.

[6] Wolle MA, Randleman JB, Woodward MA. Complications of refractive surgery: ectasia after refractive surgery[J]. Int Ophthalmol Clin, 2016, 56(2): 127 - 139. doi: 10.1097/IIO.0000000000000102.

[7] Bao F, Geraghty B, Wang Q, et al. Consideration of corneal biomechanics in the diagnosis and management of keratoconus: is it important?[J]. Eye Vis(Lond), 2016, 4(3): 18. doi: 10.1186/s40662 - 016 - 0048 - 4.

[8] 谢立信,史伟云,李 莹,等. 激光角屈光手术临床诊疗专家共识[J]. 中华眼科杂志, 2015, 51(4): 249 - 254. doi: 10.3760/cma.j.issn.0412 - 4081.2015.04.003.

[9] Peña-García P, Peris-Martínez C, Abbouda A, et al. Detection of subclinical keratoconus through non-contact tonometry and the use of discriminant biomechanical functions[J]. J Biomech, 2016, 49(3): 353 - 363. doi: 10.1016/j.jbiomech.2015.12.031.

[10] Sefat SMM, Wiltfang R, Bechmann M, et al. Evaluation of changes in human corneas after femtosecond laser-assisted LASIK and small-incision Lenticule extraction (SMILE) using non-contact tonometry and ultra-high-speed camera (Corvis ST)[J]. Curr Eye Res, 2016, 41(7): 917 - 922. doi: 10.3109/02713683.2015.1082185.

[11] Herber R, Terai N, Pillunat KR, et al. Dynamic scheimpflug analyzer (Corvis ST) for measurement of corneal biomechanical parameters: a praxis-related overview[J]. Ophthalmologe, 2018, 115(8): 635 - 643. doi: 10.1007/s00347 - 018 - 0716 - y.

[12] 陈昕妍,秦 晓,张海霞,等. 可视化角膜生物力学分析仪在眼科临床中的应用[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(7): 101 - 106. doi: 10.3969/j.issn.1674 - 1633.2018.07.029.

[13] Dawson DG, Grossniklaus HE, McCarey BE, et al. Biomechanical and wound healing characteristics of corneas after excimer laser keratorefractive surgery: is there a difference between advanced surface ablation and sub-Bowman's keratomileusis?[J]. J Refract Surg, 2008, 24(1): S90-S96. doi: 10.3928/1081597X - 20080101 - 16.

[14] Randleman JB, Dawson DG, Grossniklaus HE, et al. Depth-dependent cohesive tensile strength in human donor corneas: implications for refractive surgery[J]. J Refract Surg, 2008, 24(1): S85 - S89. doi: 10.3928/1081597X - 20080101 - 15.

[15] Raevdal P, Grauslund J, Vestergaard AH. Comparison of corneal biomechanical changes after refractive surgery by noncontact tonometry: small-incision lenticule extraction versus flap-based refractive surgery-a systematic review[J]. Acta Ophthalmol, 2019, 97(2): 127 - 136. doi: 10.1111/aos.13906.

[16] Shih PJ, Wang IJ, Cai WF, et al. Biomechanical simulation of stress concentration and intraocular pressure in corneas subjected to myopic refractive surgical procedures[J]. Sci Rep, 2017, 7(1): 13906. doi: 10.1038/s41598 - 017 - 14293 - 0.

[17] 曹雪倩. FS-LASIK、SBK、LASEK 三种手术角膜生物力学变化的研究[D]. 南京:南京医科大学, 2017.

[18] Huang YL, Wang Y, Dou R, et al. Analysis on corneal deformation and corneal biomechanical changes after small incision lenticule extraction[J]. Chin J Ophthalmol, 2017, 53(1): 11 - 17. doi: 10.3760/cma.j.issn.0412 - 4081.2017.01.004.

[19] Pedersen IB, Bak-Nielsen S, Vestergaard AH, et al. Corneal biomechanical properties after LASIK, ReLEx flex, and ReLEx smile by Scheimpflug-based dynamic t onometry[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2014, 252(8): 1329 - 1335. doi: 10.1007/s00417 - 014 - 2667 - 6.

[20] Shen Y, Zhao J, Yao P, et al. Changes in corneal deformation parameters after lenticule creation and extraction during small incision lenticule extraction (SMILE) procedure[J]. PLoS One, 2014, 9(8): e103893. doi: 10.1371/journal.pone.0103893.

[21] Fernández J, Rodríguez-Vallejo M, Martínez J, et al. Corneal thickness after SMILE affects scheimpflug-based dynamic tonometry[J]. J Refract Surg, 2016, 32(12): 821 - 828. doi: 10.3928/1081597X - 20160816 - 02.

[22] 赵科超. 基于 ORA 及 Corvis ST 检测研究手术及病变对角膜生物力学特性的影响[D]. 太原:太原理工大学, 2019.

[23] 薛 超,向尧齐,王 雁,等. 人眼角膜基质生物力学特性研究[J]. 眼科新进展, 2019, 39(11): 1009 - 1013. doi: 10.13389/j.cnki.rao.2019.0231.

(编辑:贺绍梅)