**DOI:** 10.14188/j.1671-8852.2024.0810
**文章编号** 1671-8852(2025)12-1653-08

# 飞秒激光小切口透镜取出术和其他屈光手术对角膜生物力学影响的研究进展

王盈利 张少维 杨燕宁
武汉大学人民医院眼科中心 湖北 武汉 430060

**摘要** 近年来，飞秒激光小切口透镜取出术（SMILE）在临床上得到广泛应用，其有效性、安全性和可预测性均得到国内外研究证实。角膜生物力学与屈光手术的多个环节密切相关，其关乎到手术方案选择、手术效果、手术安全乃至角膜长期稳定性，在屈光手术中具有重要意义。本篇综述将比较SMILE和其他屈光手术对角膜生物力学的影响，以期为临床及科研提供参考依据。

**关键词** 小切口透镜取出术；角膜生物力学；屈光手术
**中图分类号** R779.62
**文献标识码** A
**开放科学（资源服务）标识码（OSID）：**

## Research progress on the effects of femtosecond small incision lenticule extraction and other refractive surgeries on corneal biomechanics

**WANG Yingli, ZHANG Shaowei, YANG Yanning**
*Eye Center, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430060, Hubei, China*

**Abstract**

In recent years, small incision lenticule extraction (SMILE) has been widely used in clinical practice. Its effectiveness, safety, and predictability have been confirmed by both domestic and international studies. Corneal biomechanics is closely related to multiple aspects of refractive surgery, including surgical plan selection, surgical outcomes, surgical safety, and even long-term corneal stability. It is of great significance in refractive surgery. This review aims to compare the effects of SMILE and other refractive surgeries on corneal biomechanics to provide a basis for both clinical practice and scientific research.

**Key Words** Small Incision Lenticule Extraction; Corneal Biomechanics; Refractive Surgery

当今，全球近视患病率快速上升，预计2050年将达到人口的50%[1]。目前，近视的治疗方法有很多，主要包括框架眼镜、角膜接触镜、激光角膜屈光手术与眼内屈光手术[2]。随着时代的发展，越来越多的人开始接受角膜激光手术。根据切削部位的不同，屈光手术可分为表层切削手术和板层切削手术两大类。前者主要包括准分子激光屈光性角膜切削术（photorefractive keratectomy，PRK）、经上皮准分子激光角膜切削术（transepithelial photorefractive keratectomy，Trans-PRK）和准分子激光角膜上皮瓣下磨镶术（laser epithelial keratomileusis，LASEK）[3]。后者主要包括准分子激光原位角膜磨

**作者简介**：王盈利，女，2001—，医学硕士生，主要从事眼表及角膜疾病的研究，E-mail:whuwangyingli@163.com
**通信作者**：杨燕宁，女，1968—，医学博士，主任医师，主要从事眼表及角膜疾病的研究，E-mail:ophyyn@163.com

镶术(laser in situ keratomileusis,LASIK)、飞秒激光辅助制备LASIK(femtosecond laser in situ keratomileusis,FS-LASIK)和飞秒激光小切口透镜取出术(small incision lenticule extraction,SMILE)[3-4]。近年来,SMILE因其具有小切口、恢复快等优势,在临床上得到了广泛应用[5-6]。

角膜作为一种生物软组织材料,力学性质较为复杂,具有非线弹性、黏弹性、各向异性等特征[7]。角膜生物力学与眼科的许多疾病以及屈光手术方案选择、手术效果、手术安全乃至角膜长期稳定性等均密切相关[8]。角膜组织受到切削后,角膜体积改变,引起角膜生物力学特性发生一定程度的变化,可能会引起屈光回退或角膜扩张等并发症[9-10]。因此,深入了解屈光术后角膜生物力学的改变对手术的安全性和有效性至关重要。有学者[11]认为SMILE手术不涉及制作角膜瓣,因此可以更好地保持角膜完整性,理论上讲,相较于传统准分子激光手术,SMILE术后角膜生物力学将更加稳定。然而,多项临床研究[12-13]结果表明,在角膜生物力学方面,表层切削术具有其独特优势。本文旨在综述SMILE和其他屈光手术对角膜生物力学的影响,以期为临床实践及科研工作提供参考依据。

## 1 角膜生物力学的临床测量

**1.1 眼反应分析仪(ocular response analyzer,ORA)** ORA基于非接触双向压平原理设计,利用红外脉冲信号间接测量可变脉冲气流作用于角膜时的角膜形变,是目前临床评估角膜生物力学的常用设备。ORA主要有2个生物力学参数:角膜滞后量(corneal hysteresis,CH)和角膜阻力因子(corneal resistance factor,CRF)。ORA通过脉冲气流对角膜的双向压平过程得到两个压平眼压:P1和P2。CH=P1−P2,主要反映角膜吸收外界能量的能力;CRF=P1−0.7P2,主要反映角膜整体的抵抗能力[3]。然而,这两个参数受到眼内压、角膜厚度以及角膜曲率的影响,不能直接代表角膜的“软硬程度”,因此限制了其检测早期圆锥角膜区域特性变化的敏感性和特异性[14]。

**1.2 可视化生物力学分析仪(corneal visualization Scheimpflug technology,Corvis ST)** Corvis ST利用高强度空气脉冲使角膜发生形变,并使用高速Scheimpflug相机获得角膜中央水平横截面在脉冲气流作用下的形变过程,通过断层图像软件分析后得出相关生物力学参数[15]。Corvis ST的高速摄像头每秒可捕获4 300帧的水平Scheimpflug图像[16],测量时间约为31 ms,共采集和分析角膜变形过程的140幅断层图像[15],图像示例见图1。与ORA不同的是,Corvis ST能将角膜运动和全眼运动相隔开,并且在每次测量过程中产生一致的空气脉冲压力[14]。Corvis ST参数及其含义见表1。现已被证实,DA、AT1、AT2和bIOP等参数具有良好的可重复性[17-18]。Corvis ST因其非接触、可重复及良好的精确性,现已广泛应用于圆锥角膜的筛查和屈光手术前后角膜安全性的评估[4, 19]。

宋爽等[20]在研究中指出,SP-A1与ARTh作为整合后的角膜参数,均可通过数值直观反映角膜的硬度。在应用Corvis ST参数分析圆锥角膜生物力学特性的研究[21]中发现,IR、CBI对亚临床期圆锥角膜具有较好的诊断效率,而DA 2 ratio、IR、CBI对临床期圆锥角膜均具有良好的诊断效率。也有研究指出,TBI、CBI和ARTh对区分亚临床期圆锥角膜和正常眼有价值。国外研究[23]报道,AT1、AV1、AT2、AV2、PD等基本参数具有优异或良好的重复性和再现性,同时新参数ARTh、IR、SP-A1、CBI等具有优异的重复性。综上,在利用Corvis ST对角膜生物力学变化进行分析时,应重点关注这些重复性较高的参数。

## 2 SMILE和其他屈光手术对角膜生物力学影响的比较

**2.1 SMILE与PRK/Trans-PRK** 目前关于Trans-PRK术后角膜生物力学特性的研究较少,因其与PRK具有相似的结构完整性,所以将二者一同与SMILE进行比较,以下用PRK指代[24]。因PRK只在角膜表面切削且无需制作角膜瓣,故有研究[24]认为其是对角膜生物力学特性影响最小的术式。研究[25]显示,SMILE较PRK在术后6个月有更多的CH和CRF的降低,推测这可能与SMILE属于板层切削,需要取出更多的角膜前基质有关。CHEN等[26]研究发现,与FS-LASIK和SMILE相比,PRK对角膜硬度的影响最小,其术后角膜硬度的降低最轻微。但有荟萃分析[27]报道,SMILE对角膜生物力学的影响与PRK相似。SPIRU等[28]的研究表明,在离体人眼角膜实验测量中,SMILE和PRK维持角膜生物力学稳定的能力是一致的。因以上研究的观察条件有较大差异,故结果不可同时比较,但

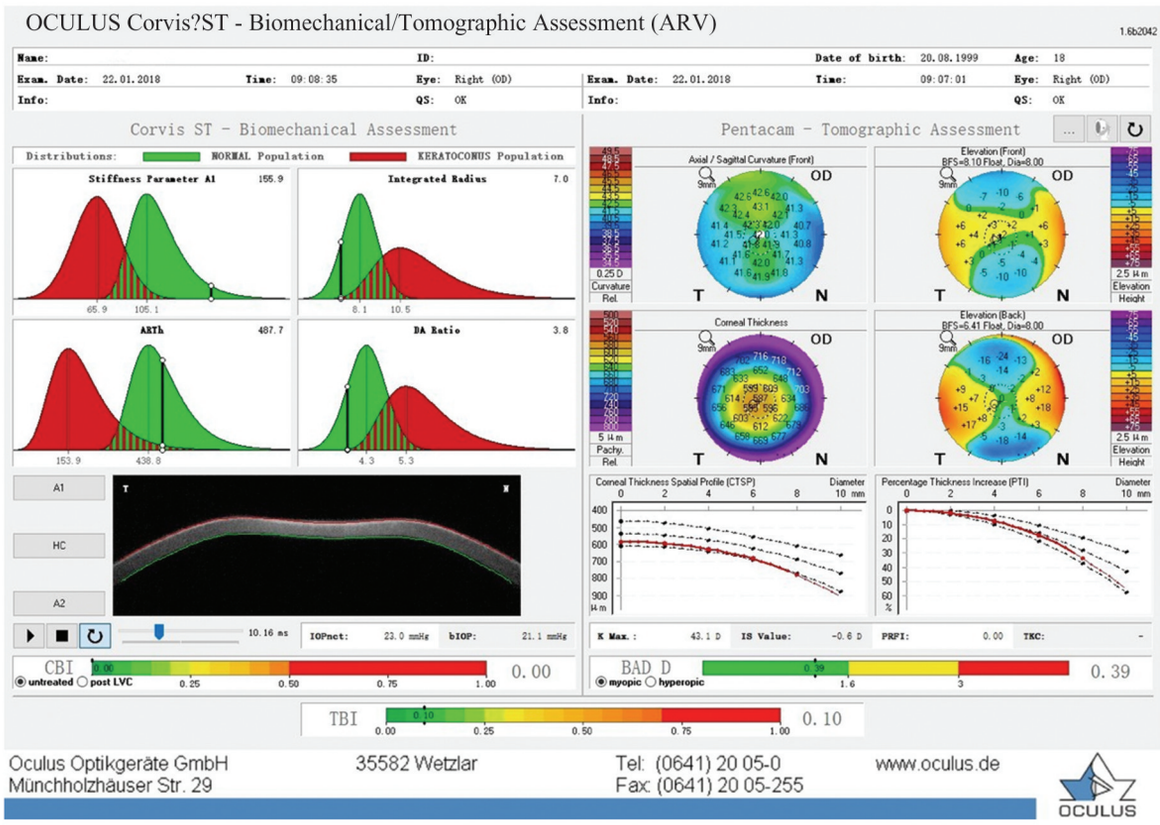



**图 1　Corvis ST 部分参数示意图**

**表 1　Corvis ST 参数及其含义**

| 参数 | 含义 |
|---|---|
| CCT | 中央角膜厚度 |
| bIOP | 非接触生物力学校正眼压 |
| AT1 | 角膜从初始状态至第一平状态的时间 |
| AL1 | 第一次压平面形成时的角膜压平长度 |
| AV1 | 第一次压平面形成时的角膜瞬时速率，以正值表示 |
| AT2 | 角膜从初始状态至第二平状态的时间 |
| AL2 | 第二次压平面形成时的角膜压平长度 |
| AV2 | 第二次压平面形成时的角膜瞬时速率，以负值表示 |
| HCT | 角膜开始接触气流至达到最大凹面的时间 |
| PD | 角膜达到最大凹面时两峰间水平距离 |
| HCR | 角膜最大压陷时的反向曲率半径 |
| DA | 角膜最大压陷状态时顶点间的垂直距离 |
| DA 2 ratio | 角膜顶点的变形幅度与距离其2.0 mm位置变形幅度的比值 |
| IR | 最大反向凹陷半径曲线下的面积 |
| ARTh | 最薄点厚度与距离其3.5 mm处角膜厚度变化率的比值 |
| SP-A1 | 向内压平角膜的相对压力除以角膜内向的位移，作为反映第一次压平时角膜硬度的参数 |
| CBI | 角膜厚度参数与角膜受力形变参数的组合，由6个不同的Corvis ST参数通过逻辑回归公式计算得来 |
| TBI | 应用人工智能计算的联合生物力学参数与角膜地形图参数的复合指标 |
| SSI | 应力和应变参数，独立于眼压与中央角膜厚度的新指标，仅限正常角膜 |

可看出大多数研究者认为PRK术后角膜生物力学的稳定性不逊色于SMILE。然而，由于PRK术后角膜神经末梢暴露于表面，患者可能在术后2～10 d感到疼痛，恢复时间较长[24]，以及术后其他的问题，近些年来PRK已逐渐被飞秒激光术式所取代。

**2.2　SMILE与LASEK**　CHEN等[29]研究表明：术后1月及3月，SMILE组和LASEK组患者的CH和CRF均显著低于术前值，但组间比较差异没有统计学意义。SHANG等[30]在研究中发现，SMILE组的术后SP-A1值显著低于LASEK组（$P$=0.044），推测可能与SMILE术中去除了部分基质层，而LASEK保留了相对完整的基质层有关，其研究认为LASEK组角膜生物力学的变化总体上小于SMILE组。而DOU等[31]在研究中发现，对于中低度近视，就单位角膜组织切除量而言，SMILE组术后CRF和CH的下降比LASEK组小（$P$<0.05）。此结果与YU等[32]的研究相似，其认为在术后早期，就单位角膜组织切除量而言，SMILE对角膜生物力学的影响可能比LASEK小，但在长期观察中，两者的效果是相当的。

研究[33]显示，即使术前等效球镜无明显差异，SMILE组的微透镜厚度仍然比LASEK组的切削

深度大。这一结论在早期研究[34-35]中也得到证实：矫正1.00 D的近视，飞秒激光比准分子激光要消耗更多的角膜组织。由此推断：近视程度越深，角膜组织切除就会越多，SMILE与LASEK的术后CCT、CH和CRF的差异也会越大，且理论上SMILE术后角膜生物力学的变化会更大。也有研究[31]认为SMILE手术的透镜厚度与ΔCRF有关，而LASEK手术切削深度与ΔCRF无相关性，故认为SMILE比LASEK更具可预测性。因此，为了比较LASEK与SMILE对角膜生物力学的影响，需要考虑不同控制变量下的差异，同时需要更多的样本和更长的观察时间。

**2.3 SMILE与LASIK** 荟萃分析[36-37]显示，在术后1、2和3年，SMILE均较LASIK有更高的CH和CRF。王锐等[38]研究发现，与SMILE相比，LASIK术后AL1减小、PD增大，变化的量分别为0.03±0.13、0.61±1.62（$P$=0.031、0.001），证明LASIK手术使角膜生物力学的改变更大，其他研究者[39-41]也得出过类似的结论。该研究同时提出，预测角膜屈光手术术后质量时，Corvis ST中的AL1和PD可作为代表性参数进行观察[38]。REINSTEIN等[42]研究显示，LASIK术中每切削1 μm角膜厚度，患者术后角膜生物力学强度平均下降0.22%，而在同样的切削水平下，SMILE仅下降0.08%。通过构建数学模型，研究人员预测在相同的角膜生物力学水平下，SMILE患者可比LASIK患者多切割100 μm的角膜厚度（约为7.75 D等效球镜矫正量），并且仍然保持与LASIK患者相同的角膜生物力学强度，证明SMILE手术在维持屈光矫正后的角膜生物力学强度方面有明显优势[42]。KHAMAR等[43]研究发现，在LASIK和SMILE中，瓣切和帽切后生物力学强度减弱的程度分别为36.7%和1.3%（$P$=0.02），证实角膜瓣和角膜帽切割均会导致患者角膜生物力学强度的降低，且瓣切弱化的程度更大。

以往认为，虽然SMILE和LASIK均属于板层手术，但角膜帽和角膜瓣的设计不同。SMILE的角膜帽厚度一般为100～120 μm，而LASIK的角膜瓣厚度一般为90～110 μm，故SMILE保留了更多的角膜前基质，进而更好地维持了角膜整体结构的稳定性，且术后更轻的炎症反应也有利于角膜生物力学的稳定[44]。而近视程度越深，角膜前基质切削量越多，角膜瓣越薄。故有研究[45]推测，SMILE和LASIK两种术式的角膜生物力学差异在高度近视患者中更为明显。

然而，在一项离体实验[46]中发现，在屈光度－8.00 D组中，SMILE与LASIK术后角膜拉伸强度降低相似；而在－3.00 D组中，LASIK术后角膜拉伸强度降低更少，生物力学性能改变更少。作者认为这可能与两个原因有关：第一，SMILE的两次板层剥离与较深的板层切割可能会导致透镜厚度有偏差，累积起来可能会达到±10 μm数量级；第二，SMILE组平均每屈光度（per diopter）需切除的透镜厚度为19.50 μm，而LASIK组为14.74 μm[46]。但该体外实验样本量比较小，供体角膜数量仅为30个，可信度需进一步探究。

以上研究结果表明，大多数研究者认为，在维持屈光术后角膜生物力学稳定方面，SMILE优于LASIK，但也有研究者提出了不同的想法。因此，为了比较SMILE和LASIK两种术式对角膜生物力学的影响，需要将不同屈光度数的患者进行分组，并制定更严密的比较条件，同时纳入足够的样本量。

**2.4 SMILE与FS-LASIK** 李福生等[47]研究显示，屈光术后SMILE组的CRF和CH降低值显著小于FS-LASIK组（$P$=0.002、0.003），WU等[48]也得出过类似的实验结果。而AGCA等[49]使用ORA比较SMILE与FS-LASIK角膜生物力学的变化时，发现两种手术方式间无显著性差异，EL-MAYAH等[50]也得出类似的结果。但这并不意味着二者对角膜生物力学的影响是相同的，因为CH和CRF两个参数仅能反映角膜生物力学结构中临床表现最为显著的方面，而无法代表整个角膜生物力学。REZNICEK等[51]认为，由于Corvis ST测量角膜生物力学的参数是基于CCT及bIOP进行的，具有良好的可重复性及准确性，适用范围更广泛。

BOIKO等[52]的研究结果显示，在轻至中度近视的患者中，与FS-LASIK相比，SMILE组的DA ratio和SP-A1改变更小（$P$<0.05）。HE等[10]研究发现，在术前预设光学区相同、屈光度相近的高度近视患者中，SMILE患者术后的CCT、CV、ARTh和SP-A1均大于FS-LASIK，这表明在高度近视患者中，SMILE对角膜生物力学的影响小于FS-LASIK。XIN等[53]在研究不同屈光手术的角膜生物力学变化时发现，所有组别术后SP-A1均显著降低，IR、DA和DA Ratio 2 mm均显著升高（$P$<0.05），这些指标都表明角膜硬度降低。而术间比较显示，Trans-PRK组角膜硬度降低最小，SMILE组次之，FS-LASIK组最大（$P$<0.05）[53]。由此得出结论，在角膜厚度减少相似的情况下，

SMILE组的术后整体角膜硬度降低比FS-LASIK组少[53]，此结论与WEI等[54]的研究结果相似。

LIU等[55]认为，在术前参数相同的情况下，用Corvis ST Ⅱ测得的FS-LASIK和SMILE两组术后的角膜生物力学参数无显著差异。此结论与CAO等[56]的研究结果一致。但此两例前瞻性非随机对照试验所纳入的病例较少，分别为90眼和80眼，需纳入更多的病例继续研究。SPIRU等[57]提到与近视矫正不同，在远视矫正后，SMILE和FS-LASIK在维持离体人眼角膜生物力学稳定方面的能力可以被认为是相同的。该作者在以往的研究中认为，当比较离体角膜近视屈光手术后的生物力学特性时，与FS-LASIK相比，SMILE术后角膜生物力学的变化更小，其在维持生物力学稳定方面的能力是优越的[58]。

以往认为，由于FS-LASIK及LASIK手术均需制作角膜瓣，破坏了前部基质纤维，而SMILE术后角膜帽的前部基质纤维仍是完整的，使得前部基质胶原的连续性得到了维护，因此患者的角膜生物力学也会更加稳固[42]。同时，SMILE较厚的角膜帽也利于其维持角膜生物力学稳定[44]。术后伤口小、恢复快，可能也是短期内其生物力学参数较稳定的原因。

然而，最近的一项前瞻性研究[59]发现，在比较SMILE、FS-LASIK和PRK术后角膜生物力学变化时，1年内SMILE组中SP-A1、IR、DA 2 ratio的变化均显著大于FS-LASIK组和PRK组（$P<0.01$），而FS-LASIK组中各项指标的变化均显著大于PRK组（$P<0.05$）。作者认为该结果可能与以下两个原因有关：一是FS-LASIK和PRK手术都包括1.25 mm的混合消融组织区，而SMILE手术则无，这一因素导致在前二者中，组织切除的区域更宽，周边区域更小，较小的周边区域留下较少的组织来驱动生物力学反应；二是在这项研究中，SMILE术中角膜帽的厚度为120 μm，而FS-LASIK术中角膜瓣的厚度为110 μm，导致SMILE组术中去除了较深的基质组织，术后剩余基质层（residual stromal bed，RSB）较少[59]。较低的RSB厚度和较小的组织切除直径结合起来，使SMILE组产生了更大的生物力学变化[59]。作者提出，在维持角膜生物力学稳定方面，RSB厚度比角膜帽厚度更重要，因此建议在SMILE手术中使用较薄的帽以留存较厚的RSB，从而减少角膜生物力学强度的下降[59]。也有研究[20]指出，SMILE术后RSB为280～320 μm时，△ACD、△ACV与△SP-A1、△ARTh之间存在中低度相关性，说明术后RSB越薄，角膜生物力学稳定性也就越差，前房对于角膜的支撑作用越明显。

以上研究说明，部分研究者认为SMILE在维持角膜生物力学稳定方面比FS-LASIK优秀。然而，在这个过程中，究竟是角膜帽还是RSB更重要，还需要进一步的研究。同时，有研究者[60]提到，SMILE术后角膜基质床与帽之间残留了一个潜在的腔隙，推测这个腔隙可能会参与影响角膜生物力学的稳定性，这也是未来进一步深入研究的方向。

## 3　总结与展望

综上所述，PRK在维持角膜生物力学稳定方面不逊色于SMILE。而在不同的条件下，比较SMILE与其他屈光手术（LASEK/LASIK/FS-LASIK）对角膜生物力学的影响，可能会得出完全相反的结论。在目前研究的基础上，需要进一步探究不同的手术方式、角膜瓣厚度、角膜帽厚度、侧切角度、光学区大小、切削深度和RSB厚度等对角膜生物力学产生的影响。同时，大部分临床试验的样本量都较少，可参照“等效设计”进行样本量估算[61]。此外，目前相关研究多集中于屈光手术前后短时间内角膜生物力学特征的观察，对术后长期随访的研究较少。随着角膜术后的长期修复和组织重建，不同手术方式之间的生物力学差异是否仍然存在也是一个值得探讨的问题。因此，为了比较不同屈光手术对角膜生物力学的影响，需要更多具有最佳设计、大样本量和长期随访的研究。希望随着人工智能在眼科中的逐渐应用以及屈光手术的不断发展，患者可以选择更个性化、安全、经济的屈光手术方式。

### 参考文献


[1] HOLDEN B A, FRICKE T R, WILSON D A, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050[J]. Ophthalmology, 2016, 123(5): 1036-1042.

[2] ZHENG K, HAN Y N, WANG J, et al. Impact of unintended initial dissection of the posterior plane during SMILE surgery on surgery time and visual outcomes [J]. BMC Ophthalmol, 2022, 22(1): 108.

[3] PNIAKOWSKA Z, JUROWSKI P, WIERZBOWSKA J. Clinical evaluation of corneal biomechanics following laser refractive surgery in myopic eyes: A review of the literature[J]. J Clin Med, 2022, 12(1): 243.

[4] ANG M, GATINEL D, REINSTEIN D Z, et al. Refractive surgery beyond 2020[J]. Eye, 2021, 35(2): 362-382.

[5] JI Y, WAN W J, ZHANG Q, et al. Analysis of the effectiveness of SMILE, FS-LASIK, and SBK in myopic patients and the impact in UCVA and tear film stability[J]. Contrast Media Mol Imaging, 2022, 2022: 6233232.

[6] SACHDEV G S, RAMAMURTHY S. Decade - long journey with small incision lenticule extraction: The learnings[J]. Indian J Ophthalmol, 2020, 68(12): 2705-2710.

[7] 王雁, 宋一, 牟博琨. 角膜生物力学基础[J]. 中华眼科杂志, 2021, 57(2): 156-160.
WANG Y, SONG Y, MOU B K. Fundamentals of corneal biomechanics [J]. Chin J Ophthalmol, 2021, 57(2): 156-160.

[8] MA J N, WANG Y, WEI P H, et al. Biomechanics and structure of the cornea: Implications and association with corneal disorders[J]. Surv Ophthalmol, 2018, 63(6): 851-861.

[9] KLING S, HAFEZI F. Corneal biomechanics — A review[J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2017, 37(3): 240-252.

[10] HE S Y, LUO Y Q, YE Y M, et al. A comparative and prospective study of corneal biomechanics after SMILE and FS-LASIK performed on the contralateral eyes of high myopia patients[J]. Ann Transl Med, 2022, 10(13): 730.

[11] ABAHUSSIN M, HAYES S, KNOX CARTWRIGHT N E, et al. 3D collagen orientation study of the human cornea using X-ray diffraction and femtosecond laser technology[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2009, 50(11): 5159-5164.

[12] HASHEMI H, ASGARI S, MORTAZAVI M, et al. Evaluation of corneal biomechanics after excimer laser corneal refractive surgery in high myopic patients using dynamic scheimpflug technology[J]. Eye Contact Lens, 2017, 43(6): 371-377.

[13] LEE H, ROBERTS C J, KIM T I, et al. Changes in biomechanically corrected intraocular pressure and dynamic corneal response parameters before and after transepithelial photorefractive keratectomy and femtosecond laser-assisted laser *in situ* keratomileusis[J]. J Cataract Refract Surg, 2017, 43(12): 1495-1503.

[14] CHONG J, DUPPS W J. Corneal biomechanics: Measurement and structural correlations[J]. Exp Eye Res, 2021, 205: 108508.

[15] ESPORCATTE L P G, SALOMÃO M Q, LOPES B T, et al. Biomechanical diagnostics of the cornea[J]. Eye Vis, 2020, 7: 9.

[16] LEE H, KANG D S Y, HA B J, et al. Biomechanical properties of the Biomechanical diagnostics of the cornea using a dynamic scheimpflug analyzer in healthy eyes[J]. Yonsei Med J, 2018, 59(9): 1115-1122.

[17] HON Y, LAM A K C. Corneal deformation measurement using Scheimpflug noncontact tonometry[J]. Optom Vis Sci, 2013, 90(1): e1-e8.

[18] LU N J, HAFEZI F, ROZEMA J J, et al. Repeatability of a Scheimpflug tonometer to measure biomechanical parameters before and after myopic refractive surgery [J]. J Cataract Refract Surg, 2022, 48(9): 1057-1062.

[19] 任胜卫, 杨凯丽, 徐丽妍, 等. Corvis ST测量近视患者新型角膜生物力学参数的重复性及其影响因素[J]. 中华实验眼科杂志, 2019, 37(12): 990-994.
REN S W, YANG K L, XU L Y, et al. Repeatability of new Corvis ST parameters and influencing factors in myopia patients[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2019, 37(12): 990-994.

[20] 宋爽, 梁涛, 冷林, 等. SMILE术后眼前节变化对眼压测量值的影响[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2022, 24(7): 522-529.
SONG S, LIANG T, LENG L, et al. Influence of changes in anterior segment parameters on intraocular pressure measurement after SMILE[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2022, 24(7): 522-529.

[21] 肖明, 张晓宇, 王曙亮. 应用Corvis ST新参数分析圆锥角膜生物力学特性[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2021, 23(9): 641-646.
XIAO M, ZHANG X Y, WANG S L. Assessment of corneal biomechanical properties in keratoconus using the new parameters of corvis ST[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2021, 23(9): 641-646.

[22] PEYMAN A, SEPAHVAND F, POURAZIZI M, et al. Corneal biomechanics in normal and subclinical keratoconus eyes[J]. BMC Ophthalmol, 2023, 23(1): 459.

[23] LI Y X, TIAN L, GUO L L, et al. *In vivo* corneal biomechanical properties in a selected Chinese population, measured using the corneal visualization scheimpflug technology[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 863240.

[24] CHANG J Y, LIN P Y, HSU C C, et al. Comparison of clinical outcomes of LASIK, Trans-PRK, and SMILE for correction of myopia[J]. J Chin Med Assoc, 2022, 85(2): 145-151.

[25] YILDIRIM Y, ÖLÇÜCÜ O, BAŞCI A, et al. Comparison of changes in corneal biomechanical properties after photorefractive keratectomy and small incision lenticule extraction[J]. Turk J Ophthalmol, 2016, 46(2): 47-51.

[26] CHEN S H, LOPES B T, HUANG W, et al. Effectiveness of 4 tonometers in measuring IOP after femtosecond laser-assisted LASIK, SMILE, and transepithelial photorefractive keratectomy[J]. J Cataract Refract Surg, 2020, 46(7): 967-974.

[27] GUO H, HOSSEINI-MOGHADDAM S M, 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.

[28] SPIRU B, TORRES-NETTO E A, KLING S, et al. Biomechanical properties of human cornea tested by two-dimensional extensiometry *ex vivo* in fellow eyes: PRK versus SMILE[J]. J Refract Surg, 2019, 35(8): 501-505.

[29] CHEN M J, YU M R, DAI J H. Comparison of biomechanical effects of small incision lenticule extraction and laser-assisted subepithelial keratomileusis[J]. Acta Ophthalmol, 2016, 94(7): e586-e591.

[30] SHANG J M, SHEN Y, JHANJI V, et al. Comparison of corneal biomechanics in post-SMILE, post-LASEK, and keratoconic eyes[J]. Front Med, 2021, 8: 695697.

[31] DOU R, WANG Y, XU L L, et al. Comparison of corneal biomechanical characteristics after surface ablation refractive surgery and novel lamellar refractive surgery[J]. Cornea, 2015, 34(11): 1441-1446.

[32] YU M R, CHEN M J, DAI J H. Comparison of the posterior corneal elevation and biomechanics after SMILE and LASEK for myopia: A short- and long-term observation[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2019, 257(3): 601-606.

[33] YU M R, CHEN M J, WANG B J, et al. Comparison of visual quality after SMILE and LASEK for mild to moderate myopia[J]. J Refract Surg, 2015, 31(12): 795-800.

[34] VESTERGAARD A H, GRAUSLUND J, IVARSEN A R, et al. Central corneal sublayer pachymetry and biomechanical properties after refractive femtosecond lenticule extraction[J]. J Refract Surg, 2014, 30(2): 102-108.

[35] EINIGHAMMER J, OLTRUP T, BENDE T, et al. Real ray tracing simulation versus clinical outcomes of corneal excimer laser surface ablations[J]. J Refract Surg, 2010, 26(9): 625-637.

[36] WANG B J, ZHANG Z Y, NAIDU R K, et al. Comparison of the change in posterior corneal elevation and corneal biomechanical parameters after small incision lenticule extraction and femtosecond laser-assisted LASIK for high myopia correction[J]. Cont Lens Anterior Eye, 2016, 39(3): 191-196.

[37] ELMOHAMADY M N, ABDELGHAFFAR W, DAIFALLA A, et al. Evaluation of femtosecond laser in flap and cap creation in corneal refractive surgery for myopia: A 3-year follow-up[J]. Clin Ophthalmol, 2018, 12: 935-942.

[38] 王锐, 赵静静, 陈元兵, 等. 三种不同角膜屈光手术对角膜生物力学影响的评估[J]. 临床眼科杂志, 2018, 26(3): 212-216.
WANG R, ZHAO J J, CHEN Y B, et al. Evaluation of corneal biomechanical properties after different types of corneal refractive surgery[J]. J Clin Ophthalmol, 2018, 26(3): 212-216.

[39] WANG C Y, LI X N, GUO Y, et al. Effects of laser *In situ* keratomileusis and small-incision lenticule extraction on corneal biomechanical behavior: A finite element analysis[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 855367.

[40] SHETTY R, FRANCIS M, SHROFF R, et al. Corneal biomechanical changes and tissue remodeling after SMILE and LASIK[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2017, 58(13): 5703-5712.

[41] ABD EL-FATTAH E A, EL DORGHAMY A A, GHONEIM A M, et al. Comparison of corneal biomechanical changes after LASIK and F-SMILE with CorVis ST[J]. Eur J Ophthalmol, 2021, 31(4): 1762-1770.

[42] REINSTEIN D Z, ARCHER T J, BRADLEY RANDLEMAN J. Mathematical model to compare the relative tensile strength of the cornea after PRK, LASIK, and small incision lenticule extraction[J]. J Refract Surg, 2013, 29(7): 454-460.

[43] KHAMAR P, SHETTY R, VAISHNAV R, et al. Biomechanics of LASIK flap and SMILE cap: A prospective, clinical study[J]. J Refract Surg, 2019, 35(5): 324-332.

[44] YAN H, GONG L Y, HUANG W, et al. Clinical outcomes of small incision lenticule extraction versus femtosecond laser-assisted LASIK for myopia: A meta-analysis[J]. Int J Ophthalmol, 2017, 10(9): 1436-1445.

[45] WANG D Y, LIU M L, CHEN Y L, et al. Differences in the corneal biomechanical changes after SMILE and LASIK[J]. J Refract Surg, 2014, 30(10): 702-707.

[46] KANELLOPOULOS A J. Comparison of corneal biomechanics after myopic small-incision lenticule extraction compared to LASIK: An *ex vivo* study[J]. Clin Ophthalmol, 2018, 12: 237-245.

[47] 李福生, 陶冶, 尹鸿芝, 等. SMILE与FS-LASIK术后眼压和角膜生物力学指标的变化比较[J]. 国际眼科杂志, 2018, 18(1): 185-187.
LI F S, TAO Y, YIN H Z, et al. Comparison of IOP and corneal biomechanical changes after SMILE and FS-LASIK[J]. Int Eye Sci, 2018, 18(1): 185-187.

[48] 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.

[49] AGCA A, OZGURHAN E B, 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.
[50] EL-MAYAH E, ANIS M, SALEM M, et al. Comparison between Q-adjusted LASIK and small-incision lenticule extraction for correction of myopia and myopic astigmatism[J]. Eye Contact Lens, 2018, 44(Suppl 2): S426-S432.
[51] REZNICEK L, MUTH D, KAMPIK A, et al. Evaluation of a novel Scheimpflug-based non-contact tonometer in healthy subjects and patients with ocular hypertension and glaucoma[J]. Br J Ophthalmol, 2013, 97(11): 1410-1414.
[52] BOIKO E V, TOGO E S, SUETOV A A, et al. Direct assessment of changes in biomechanical properties of the cornea after ReLEx SMILE and FemtoLASIK surgeries[J]. Vestn Oftalmol, 2023, 139(3): 41-48.
[53] XIN Y, LOPES B T, WANG J J, et al. Biomechanical effects of tPRK, FS-LASIK, and SMILE on the cornea[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 834270.
[54] WEI P H, CHENG G P, ZHANG J M, et al. Changes in corneal volume at different areas and its correlation with corneal biomechanics after SMILE and FS-LASIK surgery[J]. J Ophthalmol, 2020, 2020: 1713979.
[55] LIU M, LI N, CHEN T, et al. Comparison of corneal biomechanics treated with femtosecond laser-assisted *in situ* keratomileusis and small-incision lenticule extraction by new corneal biomechanical parameters of corvis ST II[J]. Cornea, 2023, 42(11): 1384-1390.
[56] CAO K W, LIU L N, YU T, et al. Changes in corneal biomechanics during small-incision lenticule extraction (SMILE) and femtosecond-assisted laser *in situ* keratomileusis (FS-LASIK)[J]. Lasers Med Sci, 2020, 35(3): 599-609.
[57] SPIRU B, TORRES-NETTO E A, KLING S, et al. Hyperopic SMILE versus FS-LASIK: A biomechanical comparison in human fellow corneas[J]. J Refract Surg, 2021, 37(12): 810-815.
[58] SPIRU B, KLING S, HAFEZI F, et al. Biomechanical properties of human cornea tested by two-dimensional extensiometry *ex vivo* in fellow eyes: Femtosecond laser-assisted LASIK versus SMILE[J]. J Refract Surg, 2018, 34(6): 419-423.
[59] HASHEMI H, ROBERTS C J, ELSHEIKH A, et al. Corneal biomechanics after SMILE, femtosecond-assisted LASIK, and photorefractive keratectomy: A matched comparison study[J]. Transl Vis Sci Technol, 2023, 12(3): 12.
[60] MOHAMED-NORIEGA K, TOH K P, POH R, et al. Cornea lenticule viability and structural integrity after refractive lenticule extraction (ReLEx) and cryopreservation[J]. Mol Vis, 2011, 17: 3437-3449.
[61] 王瑞平. 随机对照临床试验设计中的样本量估算方法[J]. 上海医药, 2023, 44(1): 48-52.
WANG R P. Methods of sample size estimation in randomized controlled clinical trial design[J]. Shanghai Med Pharm J, 2023, 44(1): 48-52.

(2024-10-26收稿)
编辑 袁 靓