

doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2021.09.04

View this article at: <https://dx.doi.org/10.3978/j.issn.1000-4432.2021.09.04>

· 综述 ·

角膜屈光手术后角膜形态及生物力学的研究现状

武媛 综述 黄悦 审校

(天津医科大学眼科医院屈光角膜科, 眼视光学院, 眼科研究所, 国家眼耳鼻喉疾病临床医学研究中心
天津市分中心, 天津市视网膜功能与疾病重点实验室, 天津 300384)

[摘要] 随着科学技术的提高、手术方式的改进, 角膜屈光手术成为治疗近视的主要方式。角膜屈光手术后角膜形态及生物力学的变化对于尽早发现术后相关并发症及术后长期稳定性具有重要意义, 不同的术式及术后不同的恢复阶段角膜表面非球面参数及生物力学指标的变化存在一定差异, 明确其变化的原因及机制可对临床研究提供一定的参考。

[关键词] 角膜屈光手术; 近视; 非球面性; Q值; 角膜生物力学

Research status of corneal morphology and biomechanics after corneal refractive surgery

WU Yuan, HUANG Yue

(Department of Refraction and Cornea, Eye Institute and School of Optometry, Tianjin Medical University Eye Hospital, Tianjin Branch of National Clinical Research Center for Ocular Disease, Tianjin Key Laboratory of Retinal Functions and Diseases, Tianjin 300384, China)

Abstract With the improvement of science and technology and the improvement of surgical methods, corneal refractive surgery has become the main way to treat myopia. The changes of corneal morphology and biomechanics after corneal refractive surgery are of great significance for early detection of postoperative complications and also affect the long-term stability after corneal refractive surgery. There are some differences in the changes of aspheric parameters and biomechanical properties in different surgical procedures and different postoperative recovery stages. Clarifying the reasons and mechanisms of these changes can provide some reference for clinical research.

Keywords corneal refractive surgery; myopia; asphericity; Q value; corneal biomechanics

随着近视眼在我国发病率逐年增高及各种治疗技术不断进步, 激光角膜屈光手术成为矫正屈光不正的重要方式之一。激光角膜屈光手术术式

通常分为以下两类: 激光板层角膜屈光手术和激光表层角膜屈光手术。目前, 常见的角膜屈光手术中, 激光板层角膜屈光手术主要以飞秒激光小

收稿日期 (Date of reception): 2021-05-27

通信作者 (Corresponding author): 黄悦, Email: 1097813271@qq.com

基金项目 (Foundation item): 天津市临床重点学科 (专科) 建设项目 (TJLCZDXKM013)。This work was supported by Tianjin Clinical Key Discipline Project, China (TJLCZDXKM013).

切口基质内微透镜取出术(small incision lenticule extraction, SMILE)和飞秒激光辅助的准分子激光原位角膜磨镶术(femtosecond assisted laser in situ keratomileusis, FS-LASIK)为代表, 激光表层角膜屈光手术主要以经上皮准分子激光屈光性角膜切削术(trans-epithelial photorefractive keratectomy, TransPRK)为代表。激光角膜屈光手术通过切削一定量的角膜组织来矫正屈光不正, 术后角膜厚度减少, 而术中激光的切削以及术后角膜的修复均会使角膜形态发生变化, 除了激光切削引起角膜前表面的变化以外, 在眼内压等的作用下, 角膜后表面形态也会发生一定变化, 对术后的远期效果产生深远影响。此外, 角膜组织的切削会导致角膜生物力学特性的改变, 不同的手术方式对角膜生物力学特性的影响不尽相同, 随着人们对手术安全性有效性及可预测性的新的追求, 使得近年来手术前后角膜生物力学的研究成为热点。本文将对不同激光角膜屈光手术后角膜形态及生物力学的变化进行综述。

1 角膜形态的改变

任何屈光手术的目标都是矫正预期的屈光不正, 并尽可能地维持术前眼睛的自然状态。激光角膜屈光手术通过激光切削一定的角膜组织使得术后裸眼视力达到正常, 但无论何种手术方式, 其术后角膜形态发生改变是不可避免的, 角膜形态的改变可能会对手术的有效性 & 术后视觉质量的稳定性产生一定的影响。

角膜Q值(Q-value)为目前描述角膜非球面特性较为常用的参数, 可描述角膜曲率从中央到周边的变化趋势并定量分析角膜表面的非球面性。当 $Q=0$ 时, 角膜为均一球面; $Q>0$ 时角膜为扁球形, 角膜由中央到周边逐渐变陡峭, 即周边曲率大于中央区; $-1<Q<0$ 时, 角膜为椭球形, 角膜由中央到周边逐渐变扁平, 即周边曲率小于中央区。角膜屈光手术后角膜前后表面Q值发生改变。

1.1 角膜前表面形态的变化

在生理状态下, 角膜前表面为从中央到周边逐渐变平坦的非球面形态, 即Q值为负值。研究^[1-3]表明: 角膜屈光手术后前表面形态变化显著, 角膜各直径范围Q值均由术前负值变为正值, 其中央至周边呈负性增加的趋势在手术前后未发生变化。

SMILE无需制作角膜瓣, 相比FS-LASIK的20 mm角膜大切口, 其角膜切口小, 术后无相关角膜瓣的愈合反应, 因此对角膜前表面的影响较少。但由于SMILE激光切削仍改变了角膜中央曲率, 其对Q值的影响依旧存在。此外, 有研究^[4]显示: FS-LASIK术后角膜中央部、中周部及角膜周边部角膜形态的变化不同, 中央及中周部曲率较术前变得更加陡峭, 而周边部变得更加平坦。TransPRK作为新兴的一种角膜表层激光手术方式, 激光去上皮与切削基质一步完成, 手术时间短, 近年来受到广大屈光手术医师的认可。研究^[5]显示: TransPRK手术前后的角膜曲率变化量在以角膜顶点为中心的3 mm直径范围内较大; 在3~8 mm区域范围内, 其变化量呈逐渐减少的趋势, 提示TransPRK术后角膜曲率的变化也存在区域性。长远来看, 角膜屈光手术后其角膜前表面Q值均向正值发展, 后趋于稳定, 中央与周边呈现区域性差异。

角膜上皮具有改变其厚度轮廓的能力, 以减少表面不规则, 并重建一个光滑的光学表面。研究^[6]显示: SMILE及FS-LASIK术后角膜上皮的修复及重塑对角膜形态的变化起重要作用。TransPRK去除上皮的区域与激光切削的区域是一致的, 较传统的表层手术缩小了角膜的创面, 理论上讲术后刺激反应更轻, 其上皮愈合时间更短。TransPRK术后角膜前表面消融区变得更加扁平, Q值增加, 各区域角膜上皮厚度与Q值变化量呈显著正相关^[7]。FS-LASIK与SMILE虽然并未去除上皮, 但其角膜中央光学区与周边的Q值变化也表现出差异, 表明除了受角膜上皮愈合影响之外, 手术过程中的激光切削模式及能量的区域性差异也是造成角膜屈光手术后角膜前表面变化的重要因素。

1.2 角膜后表面形态的变化

1.2.1 角膜后表面高度

角膜屈光手术后医源性角膜前凸、屈光回退及圆锥角膜等并发症已引起屈光手术医师的极大关注。角膜前凸表现在角膜前、后表面向前膨隆。由于角膜前表面受到角膜瓣、激光切削、创面愈合反应及角膜上皮水肿等因素的影响, 无法正确地反映角膜前凸程度, 而相比之下, 角膜后表面能较好地反映角膜前凸的程度, 预测角膜对激光消融的反应^[8]。角膜后表面高度的变化常被用来反映角膜后表面的前凸程度, 其对激光角膜屈光手术后角膜的变化更加敏感, 且易于早期发现角膜扩张

膨隆、屈光回退、圆锥角膜等相关并发症。

在术后早期阶段,角膜后表面有一定程度的前凸,且中央区与周边区域的变化程度不同,而手术后期有恢复至术前的趋势^[9-10]。SMILE通过制作角膜帽来取出基质微透镜,其术后角膜顶点及中央后表面高度在术后1个月内呈下降趋势,并在术后1个月时开始恢复^[11],术后早期角膜水肿的发生可能为其影响因素之一,此外还可能与角膜板层结构生物特性及角膜纤维修复机制有关^[12]。

研究^[13]显示:角膜后表面早期变化程度TransPRK少于FS-LASIK,FS-LASIK比TransPRK需要更长的时间才能降至术前水平。苏燕等^[14]则表示:TransPRK术后角膜后表面高度并未发生明显前凸,而是较术前发生轻度的位置后移,随着伤口的愈合,变化未恢复至术前水平。王同梅等^[15]特别指出:FS-LASIK术后早期角膜后表面顶点发生轻微后移,而周边部发生轻微前凸,且周边区域变化量较大,并指出这种区域性的变化特征可能与术后角膜不同部位的溶胀特性以及术后角膜不同部位胶原纤维愈合反应的不同有关,而术后不同时间点变化认为可能与不同时间愈合程度及生物力学变化有关。随着时间延长,角膜创面逐渐愈合,基质胶原纤维的修复,角膜基质结构排列变得较早期有序,从而使后表面的形态趋于稳定。

1.2.2 角膜后表面非球面性(Q值)

相较后表面高度值,后表面Q值更能反应角膜后表面整体的形态变化。研究^[16-17]显示:角膜后表面Q值分布在-0.38~0.18,屈光手术后其值发生改变。激光切削角膜组织以后,角膜基质的减少使得剩余基质间的张力降低,继而板层受到周边基质对其产生的牵拉力,再结合术后眼压的变化,最终角膜后表面向扁球形发展,导致了患者角膜后表面的形态学改变^[18]。角膜屈光手术后角膜后表面形态的变化明显小于前表面,其变化趋势与前表面类似,Q值在手术后均向正值方向发展,使角膜整体变得更加扁平^[19-21]。不同屈光度、不同的角膜直径范围,手术前、后Q值的变化也会不同。Ganesh等^[22]研究发现:SMILE术后,中、高度近视组角膜后表面Q值变化显著,而低度组无明显改变。SMILE术后Q值改变较LASIK明显,可能由于SMILE采取的微透镜取出术术后在角膜基质层存在一个潜在腔隙,术后由于眼内压等的作用,使角膜后表面的形态发生较明显的变化,有关机制需进一步研究证实。Gyldenkerne等^[23]认为SMILE术

后角膜曲率在后表面没有变化。而Ganesh等^[22]研究发现:在SMILE术后,在中、高度近视组角膜后表面有明显的陡峭化。目前对于SMILE术后角膜后表面的改变仍存在一定争议。TransPRK术后角膜后表面Q值均发生轻微正向的变化,整体形态有变扁平的趋势,但手术并未改变角膜后表面的整体形态,提示准分子激光角膜屈光手术不会对角膜后表面造成较大影响^[14]。

角膜厚度、剩余角膜基质床厚度、剩余角膜厚度、切削量(深度)与切削比率、眼内压、制瓣方式等因素均会影响角膜后表面形态变化。研究^[24]显示:对于眼角膜较薄的眼睛来说,PRK等角膜表层手术是更好的选择,因为其比LASIK保留更多角膜组织,较好地保持角膜生物力学特性。TransPRK的出现,也使得传统PRK术后不规则的上皮愈合得以有效改善^[25]。

1.3 高度近视术后角膜形态改变

由于高度近视需要切削的角膜组织较多,术后角膜表面变化更为显著,增加术后屈光回退的风险。屈光度数越高,中央切削深度越大,切削的比率越高,Q值的变化越显著。所以对于高度近视,除了考虑切削深度对手术安全性的影响外,Q值变化大对术后视觉质量的影响亦会增大,术前应考虑在内^[26]。

Alfredo等^[27]认为LASIK矫正高度近视术后角膜表面的显著扁平化是影响手术长期稳定性的不利因素。Ying等^[28]指出SMILE矫正高度近视术后角膜非球面性相比FS-LASIK改变较小。研究^[29-30]显示:FS-LASIK和SMILE矫正高度近视术后角膜后表面高度值均增加,而FS-LASIK相较于SMILE变化量略大,SMILE术后角膜后表面形态稳定性相对略好。Wang等^[31]也有相似结论,该团队指出SMILE虽然导致术后前弹力层微变形,但其保留前部基质层完整(小切口区域除外),SMILE移除的角膜组织位于较深且相对较弱的基质中,这可以作为术后角膜保持稳定的一个因素。另外,SMILE术后角膜层间可能存在潜在间隙,其由后表面高度的变化来补偿,因此,SMILE引起角膜后表面高度变化的机制,可能与FS-LASIK、TransPRK不完全相同^[32]。但Zhao等^[33]指出:SMILE矫正中度和高度近视术后1年内,角膜后表面高度与术前相比无显著差异。裴天序等^[26]指出:FS-LASIK与TransPRK在矫正-8.00D高度近视时,TransPRK对

患者角膜后表面高度的影响更小, 1年随访恢复效果更佳。

2 角膜生物力学

角膜屈光手术通过切削角膜来改变屈光状态, 同时也改变了角膜的组织结构及其生物力学特性, 不同的手术方式对角膜生物力学的影响也有所差异。

2.1 测量指标

目前在临床中, 应用眼反应分析仪(ocular response analyzer, ORA)和可视化角膜生物力学分析仪(corneal visualization scheimpflug technology, Corvis ST)测量角膜生物力学较为广泛。ORA测量指标主要有角膜滞后量(corneal hysteresis, CH), 反应吸收和分散能量的能力, 主要与角膜粘弹性^[34]有关。角膜阻力因子(corneal resistance factor, CRF), 即角膜整体硬度, 是角膜受到的黏性阻力和弹性阻力的总和, 反映角膜抵抗外力的能力^[35]。Corvis ST可测量动态角膜反应参数, 主要指标主要有反向凹面半径(inverse concave radius)、2 mm和1 mm范围内的形变幅值比(DA ratio 2 mm和DA ratio 1 mm)和最大凹面半径(highest concavity radius, HC radius)、生物力学校正眼压(biomechanical correction for intraocular pressure, bIOP)、中央角膜厚度(central corneal thickness, CCT)等参数。

2.2 激光角膜屈光手术后角膜生物力学的变化

自飞秒激光被应用于LASIK手术之后, 其制作的角膜瓣更加精确、规则, 但角膜瓣的厚度、侧切角以及角膜瓣蒂的位置均仍会对术后生物力学产生影响。研究^[36-37]显示: FS-LASIK和SMILE术后CH和CRF均较术前显著降低, 而SMILE术后CH、CRF降低值显著低于FS-LASIK。Cao等^[38]认为: SMILE飞秒激光切割制作角膜微透镜后与FS-LASIK飞秒激光切割制作角膜瓣相比, DA ratio 2 mm和DA ratio 1 mm更大, CCT也更厚, 其认为飞秒激光切割和角膜组织的减少均会降低角膜的生物力学, 但角膜组织的减少对生物力学的影响更大。当消耗相同的CCT时, SMILE和FS-LASIK对角膜生物力学的影响没有差异。

PRK属表层手术, 优化后的TransPRK利用准分子激光去除角膜上皮, 同时进行基质消融, 术

后无切口, 影响其生物力学的主要因素为角膜组织切削量。研究^[39]显示: 在术前同等角膜条件及屈光度的情况下, SMILE组术后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。与LASIK手术相比, PRK术后CH和CRF的下降量明显要小^[24]。Lee等^[40]也表示: 与FS-LASIK相比, TransPRK的动态角膜反应参数变化较小, 提示表层手术相对板层手术对角膜生物力学影响更小。

因SMILE无需制作角膜瓣, 更好地保留了前弹力层和前部基质, 对角膜生物力学的影响较小。SMILE角膜帽越薄, 对前部基质层的损伤越大, 生物力学特性的改变越大; 而FS-LASIK手术中薄瓣的设计有助于维护角膜力学结构; TransPRK中光滑整齐的基质床创面使得角膜愈合更加牢固紧密, 有利于维持角膜生物力学的稳定性。

3 角膜形态改变与生物力学相关性

Zhang等^[41]表示: 角膜生物力学硬度与角膜中央前表面高度、角膜平均曲率呈负相关, 与角膜前表面Q值呈正相关。Liu等^[42]表示: 角膜前、后表面曲率和非球面形变量对动态角膜反应参数有显著影响, 角膜曲率越陡, 角膜硬度越低。较陡的前表面曲率与传入压平过程中速度较快和外压过程中变形较大有关; 较陡的后表面曲率与外压过程中速度较快和传入压平过程中变形较大相关; 更负的角膜前表面Q值与传入压平过程中速度较快、变形较大相对应。角膜后表面越呈扁长形, 在最高凹陷处对角膜变形的抵抗能力越强。

角膜组织的抗张强度主要分布在前弹力层和前部基质, 前弹力层是角膜各层组织结构中黏附性抗拉强度最大的一层; 基质层约占角膜整体厚度的90%, 是决定角膜生物力学特性的主要部位。角膜屈光手术破坏了角膜完整性, 使其形态和力学结构发生改变, 导致粘弹性及抗张力下降。此外, 激光切削角膜组织后, 周边基质的伸展对角膜板层结构产生一定的牵拉力, 同时由于眼内压的存在, 导致角膜中央平坦化、周边陡峭, 这种生物力学上的变化可能是引起角膜形态变化的原因。研究^[43]显示: 角膜的生物力学作用使得前后表面不同区域的角膜产生比理论上的预测值更大的形变量, 中央区角膜比预计更加平坦, 周边区比预计更加陡峭。术后角膜扩张的发生和发展与

角膜生物力学特性密切相关^[44]。表层准分子激光手术因为避免了角膜瓣的制作,一定程度上节约了角膜厚度。Dawson等^[45]研究显示:表层切削术能够更好地保持角膜的生物力学结构,在预防术后角膜扩张方面更有优势,相关研究仍需进一步进行。

4 结语

激光角膜屈光手术后角膜形态及生物力学的变化不仅影响到角膜屈光状态的长期稳定性,而且对手术的远期效果具有重要临床意义。总的来说,各种角膜屈光手术后均会对角膜形态及生物力学产生一定影响,且不同手术方式、不同屈光度、不同区域角膜表面各参数变化并不一致。近年来,屈光手术后角膜形态重塑及生物力学的变化已引起临床医生的高度关注,对其进行深入研究不仅有助于更好地进行术前病例的筛选、指导术式的选择和手术参数的设计,更有利于提高手术的长期安全性和稳定性。随着科技的进步,未来兼顾屈光度的矫正和最大限度保持角膜生理形态和功能的屈光手术将成为趋势。

开放获取声明

本文适用于知识共享许可协议(Creative Commons),允许第三方用户按照署名(BY)-非商业性使用(NC)-禁止演绎(ND)(CC BY-NC-ND)的方式共享,即允许第三方对本刊发表的文章进行复制、发行、展览、表演、放映、广播或通过信息网络向公众传播,但在这些过程中必须保留作者署名、仅限于非商业性目的、不得进行演绎创作。详情请访问:<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>。

参考文献

- 张赫男,莫衍,臧晶.两种屈光手术方式对低中度近视角膜前表面的影响[J].智慧健康,2020,6(31):43-45.
ZHANG Henan, MO Yan, ZANG Jing. Effects of two refractive surgery methods on anterior corneal surface of low-moderate myopia[J]. Smart Healthcare, 2020, 6(31): 43-45.
- 张亚丽,徐湘辉,刘蕾,等.FS-LASIK和SMILE术后角膜前表面非球面性变化的比较[J].国际眼科杂志,2019,19(12):2107-2110.
ZHANG Yali, XU Xianghui, LIU Lei, et al. Comparative research of FS-LASIK and SMILE on anterior corneal asphericity[J]. International Eye Science, 2019, 19(12): 2107-2110.
- Zhang YL, Xu XH, Cao LJ, et al. Corneal curvature, asphericity, and aberrations after transepithelial photorefractive keratectomy and femtosecond laser-assisted in situ keratomileusis for myopia: A prospective comparative study[J]. Indian J Ophthalmol, 2020, 68(12): 2945-2949.
- Bao F, Cao S, Wang J, et al. Regional changes in corneal shape over a 6-month follow-up after femtosecond-assisted LASIK[J]. J Cataract Refract Surg, 2019, 45(6): 766-777.
- 曹丽君,张亚丽,徐湘辉,等.经上皮准分子激光角膜切削术对角膜前表面参数的影响[J].国际眼科杂志,2020,20(4):684-687.
CAO Lijun, ZHANG Yali, XU Xianghui, et al. Clinical observation of transepithelial photorefractive ketatectomy on the anterior corneal surface parameters[J]. International Eye Science, 2020, 20(4): 684-687.
- Holladay JT, Dudeja DR, Chang J, et al. Functional vision and corneal changes after laser in situ keratomileusis determined by contrast sensitivity, glare testing, and corneal topography[J]. J Cataract Refract Surg, 1999, 25(5): 663-669.
- Hou J, Wang Y, Lei Y, et al. Corneal epithelial remodeling and its effect on corneal asphericity after transepithelial photorefractive keratectomy for myopia[J]. J Ophthalmol, 2016, 2016: 8582362.
- Miháltz K, Faschinger EM, Vécsei-Marlovits PV, et al. Effects of lipid-versus sodium hyaluronate-containing eye drops on optical quality and ocular surface parameters as a function of the meibomian gland dropout rate[J]. Cornea, 2018, 37(7): 886-892.
- 曾丽娟,韦琦,左慧懿,等.飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术矫正中高度近视术后早期角膜后表面高度变化及影响因素的临床研究[J].中华眼科医学杂志(电子版),2019,9(2):105-110.
ZENG Lijuan, WEI Qi, ZUO Huiyi, et al. Early changes of posterior corneal elevation and possible influencing factors in moderate and high myopia after small incision lenticule extraction[J]. Chinese Journal of Ophthalmologic Medicine. Electronic Edition, 2019, 9(2): 105-110.
- Zhang L, Wang Y, et al. The shape of posterior corneal surface in normal, post-LASIK, and post-epi-LASIK eyes[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2010, 51(7): 3468-3475.
- 于长江,王雁,苏小连,等.飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术后角膜后表面高度变化及其影响因素的研究[J].中华眼科杂志,2016,52(7):494-498.
YU Changjiang, WANG Yan, SU Xiaolian, et al. An analysis of changes in posterior corneal elevation and relevant factors after small incision

- lenticule extraction[J]. Chinese Journal of Ophthalmology, 2016, 52(7): 494-498.
12. 王亚茹, 周艳峰. 两种不同LASIK手术对角膜后表面高度影响的临床研究[J]. 临床眼科杂志, 2018, 26(2): 116-120.
WANG Yaru, ZHOU Yanfeng. Changes in posterior corneal elevation after femtosecond LASIK versus SBK[J]. Journal of Clinical Ophthalmology, 2018, 26(2): 116-120.
 13. 曹时燕, 顾蕊, 杨兰兰, 等. TransPRK与FS-LASIK治疗近视术后角膜后表面高度变化的对比研究[J]. 医药前沿, 2018, 8(16): 169-170.
CAO Shiyang, GU Hong, YANG Lanlan, et al. Comparison of posterior corneal elevation changes after myopia treatment with TransPRK and FS-LASIK[J]. Journal of Frontiers of Medicine, 2018, 8(16): 169-170.
 14. 苏燕, 侯杰, 郑秀云, 等. 全激光T-PRK手术对近视眼角膜后表面形态影响的临床观察[J]. 眼科, 2014, 23(3): 161-164.
SU Yan, HOU Jie, ZHENG Xiuyun, et al. Clinical observation of changes in posterior corneal surface after transepithelial photorefractive keratectomy[J]. Ophthalmology in China, 2014, 23(3): 161-164.
 15. 王同梅, 廖荣丰. 飞秒激光制瓣LASIK和SBK术后早期角膜后表面高度变化及相关因素分析[J]. 中华实验眼科杂志, 2019, 37(2): 111-116.
WANG Tongmei, LIAO Rongfeng. Early changes in posterior corneal elevation and related factors after femtosecond laser assisted LASIK and SBK[J]. Chinese Journal of Experimental Ophthalmology, 2019, 37(2): 111-116.
 16. Pérez-Escudero A, Dorronsoro C, Sawides L, et al. Minor influence of myopic laser in situ keratomileusis on the posterior corneal surface[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2009, 50(9): 4146-4154.
 17. Jain R, Dilraj G, Grewal SP, et al. Repeatability of corneal parameters with Pentacam after laser in situ keratomileusis[J]. Indian J Ophthalmol, 2007, 55(5): 341-347.
 18. Muniesa Royo MJ, Traveset Maeso A, Jurjo Campo C, et al. Topiramate-induced bilateral acute angle closure glaucoma and myopia[J]. Med Clin (Barc), 2012, 138(8): 368-369.
 19. 张晓琳, 范光忠, 叶树波. 准分子激光角膜屈光手术后角膜后表面非球面性的变化[J]. 眼科新进展, 2014, 34(4): 364-365, 368.
ZHANG Xiaolin, FAN Guangzhong, YE Shubo. Changes of corneal posterior surface asphericity after excimer laser corneal refractive surgery[J]. Recent Advances in Ophthalmology, 2014, 34(4): 364-365, 368.
 20. 侯杰, 王雁, 李晶, 等. 准分子激光角膜屈光手术后角膜后表面非球面性变化的研究[J]. 中华眼科杂志, 2011, 47(3): 223-227.
HOU Jie, WANG Yan, LI Jing, et al. Changes of asphericity of posterior corneal surface after corneal refractive surgery[J]. Chinese Journal of Ophthalmology, 2011, 47(3): 223-227.
 21. 张亚丽, 曹丽君, 徐湘辉, 等. 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术对角膜前后表面非球面性的影响[J]. 眼科新进展, 2019, 39(4): 354-357.
ZHANG Yali, CAO Lijun, XU Xianghui, et al. Effect of small incision lenticule extraction on anterior and posterior corneal asphericity[J]. Recent Advances in Ophthalmology, 2019, 39(4): 354-357.
 22. Ganesh S, Patel U, Brar S, et al. Posterior corneal curvature changes following refractive small incision lenticule extraction[J]. Clin Ophthalmol, 2015, 9: 1359-1364.
 23. Gyldenkerne A, Ivarsen A, Hjortdal JØ, et al. Comparison of corneal shape changes and aberrations induced by FS-LASIK and SMILE for myopia[J]. J Refract Surg, 2015, 31(4): 223-229.
 24. Kamiya K, Shimizu K, Ohmoto F, et al. Comparison of the changes in corneal biomechanical properties after photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis[J]. Cornea, 2009, 28(7): 765-769.
 25. Fadlallah A, Fahed D, Khalil K, et al. Transepithelial photorefractive keratectomy: clinical results[J]. J Cataract Refract Surg, 2011, 37(10): 1852-1857.
 26. 裴天序, 张佳欢, 姜丹妮, 等. 飞秒激光制瓣LASIK及Trans-PRK矫正高度近视对角膜曲率及角膜后表面高度的影响[J]. 眼科, 2020, 29(2): 123-127.
PEI Tianxu, ZHANG Jiahuan, JIANG Danni, et al. The effect of femtosecond laser-assisted LASIK and Trans-PRK on corneal curvature and corneal posterior surface height in high myopia[J]. Ophthalmology in China 2020, 29(2): 123-127.
 27. Vega-Estrada A, Alio JL, et al. Femtosecond-assisted laser in situ keratomileusis for high myopia correction: long-term follow-up outcomes[J]. Eur J Ophthalmol, 2020, 30(3): 446-454.
 28. Ying J, Zhang J, Cai J, et al. Comparative Change in Anterior Corneal Asphericity After FS-LASIK and SMILE[J]. J Refract Surg, 2021, 37(3): 158-165.
 29. 周跃明, 陈军, 林文, 等. FS-LASIK和SMILE矫正高度近视术后角膜后表面高度的变化[J]. 国际眼科杂志, 2016, 16(10): 1978-1980.
ZHOU Yue ming, CHEN Jun, LIN Wen, et al. Analysis on postoperative variation of corneal posterior surface heights after femtosecond LASIK and small incision lenticule extraction of high myopia[J]. International Eye Science, 2016, 16(10): 1978-1980.
 30. 赵立全, 李良毛, 刘俊, 等. 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术与飞秒激光制瓣LASIK治疗近视及散光术后1年随访效果观察[J]. 海南医学, 2019, 30(6): 759-762.
ZHAO Liqun, LI Liangmao, LIU Jun, et al. Effect of small incision lenticule extraction and femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis for myopia and astigmatism: a 1-year follow-up after

- operation[J]. Hainan Medical Journal, 2019, 30(6): 759-762.
31. Wang B, Zhang Z, Naidu RK, 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.
 32. 屠永芳, 杜献芳, 张红霞, 等. 飞秒激光小切口透镜切除术与飞秒LASIK术后角膜后表面高度变化[J]. 眼科新进展, 2015, 35(7): 679-682.
TU Yongfang, DU Xianfang, ZHANG Hongxia, et al. Postoperative changes of posterior corneal surface height after small incision lenticule extraction and femtosecond LASIK[J]. Recent Advances in Ophthalmology, 2015, 35(7): 679-682.
 33. Zhao Y, Li M, Zhao J, et al. Posterior corneal elevation after small incision lenticule extraction for moderate and high myopia[J]. PLoS One, 2016, 11(2): e0148370.
 34. 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.
 35. Terai N, Raiskup F, Haustein M, et al. Identification of biomechanical properties of the cornea: the ocular response analyzer[J]. Curr Eye Res, 2012, 37(7): 553-562.
 36. Wang D, Liu M, Chen Y, et al. Differences in the corneal biomechanical changes after SMILE and LASIK[J]. J Refract Surg, 2014, 30(10): 702-707.
 37. 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.
 38. Cao K, Liu L, 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.
 39. 黄志翔, 陶梦颖, 刘庆明, 等. SMILE和PRK的生物力学特性对比[J]. 局解手术学杂志, 2020, 29(5): 363-367.
HUANG Zhihuan, TAO Mengying, LIU Qingming, et al. Comparison of SMILE and PRK on corneal biomechanical properties[J]. Journal of Regional Anatomy and Operative Surgery, 2020, 29(5): 363-367.
 40. Lee H, Roberts CJ, Kim TI, 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.
 41. Zhang Y, Wang Y, Li L, et al. Corneal stiffness and its relationship with other corneal biomechanical and nonbiomechanical parameters in myopic eyes of Chinese patients[J]. Cornea, 2018, 37(7): 881-885.
 42. Liu J, Wang Y, Zou H, et al. Influence of corneal shape parameters on corneal deformation responses measured with a Scheimpflug camera[J]. Int Ophthalmol, 2021, 41(8): 2853-2859.
 43. 曹思, 包芳军. 角膜生物力学对飞秒激光LASIK术后角膜前后表面不同区域形态变化影响[Z]. 西安: 第十二届全国生物力学学术会议暨第十四届全国生物流变学学术会议, 2018.
CAO Si, BAO Fangjun. Effects of corneal biomechanics on corneal morphology in different areas of anterior and posterior surfaces after femtosecond LASIK[Z]. Xi'an: The 12th National Conference on Biomechanics and the 14th National Conference on Biological Rheology, 2018.
 44. Ambrósio R Jr, Dawson DG, Salomão M, et al. Corneal ectasia after LASIK despite low preoperative risk: tomographic and biomechanical findings in the unoperated, stable, fellow eye[J]. J Refract Surg, 2010, 26(11): 906-911.
 45. Dawson DG, Grossniklaus HE, McCarey BE, et al. [J]. J Refract Surg, 2008, 24(1): S90-S96.

本文引用: 武媛, 黄悦. 角膜屈光手术后角膜形态及生物力学的研究现状[J]. 眼科学报, 2022, 37(1): 58-64. doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2021.09.04

Cite this article as: WU Yuan, HUANG Yue. Research status of corneal morphology and biomechanics after corneal refractive surgery[J]. Yan Ke Xue Bao, 2022, 37(1): 58-64. doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2021.09.04