

# 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术后视觉质量的影响因素

陈晨, 龙琴

引用: 陈晨, 龙琴. 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术后视觉质量的影响因素. 国际眼科杂志 2021;21(3):431-435

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.81870685); 北京市自然科学基金资助项目(No.7172173)

作者单位: (100730) 中国北京市, 中国医学科学院 北京协和医学院 北京协和医院眼科

作者简介: 陈晨, 在读硕士研究生, 研究方向: 角膜病、屈光手术。

通讯作者: 龙琴, 博士, 教授, 主任医师, 博士研究生导师, 研究方向: 角膜病、屈光手术. longqinbj@hotmail.com

收稿日期: 2020-04-20 修回日期: 2021-01-25

## 摘要

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(SMILE)的有效性、安全性、稳定性、可预测性已经在多方研究和实践中得到肯定, 然而其术后视觉质量始终是医患双方共同的关注热点。近年来影响 SMILE 术后视觉质量的因素在不断发现和明确, 为进一步提高术后视觉质量提供方向和思路, 故本文从术前、术中及术后三个方面对 SMILE 矫正近视及近视散光患者术后视觉质量的影响因素进行综述。

**关键词:** 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; 视觉质量; 高阶像差; 影响因素

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2021.3.10

## Influencing factors of visual quality after small incision lenticule extraction

Chen Chen, Qin Long

**Foundation items:** National Nature Science Foundation of China (No. 81870685); Natural Science Foundation of Beijing (No. 7172173)

Department of Ophthalmology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100730, China

**Correspondence to:** Qin Long. Department of Ophthalmology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100730, China. longqinbj@hotmail.com

Received: 2020-04-20 Accepted: 2021-01-25

## Abstract

• The effectiveness, safety, stability and predictability of small incision lenticule extraction (SMILE) have been proven by numerous studies. The postoperative visual quality has aroused more and more concern from the public. Recently, the influencing factors of visual quality

after SMILE have been continuously reported, which offer further support for improving postoperative visual quality. This review mainly demonstrates the factors related to perioperative period that influence visual quality after SMILE performed on eyes of myopia or myopia astigmatism.

• **KEYWORDS:** small incision lenticule extraction; visual quality; higher order aberration; influencing factors

**Citation:** Chen C, Long Q. Influencing factors of visual quality after small incision lenticule extraction. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2021;21(3):431-435

## 0 引言

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 自问世以来, 因其无瓣、微创、无角膜瓣相关并发症、减少术后干眼等优势备受青睐, 手术的有效性、安全性、稳定性和可预测性也已经得到了多方研究和实践的肯定。然而随着 SMILE 手术数量的逐年上升, 术后眩光 (glare)、光晕 (halo) 及夜间视力障碍等相关报道也随之增多<sup>[1]</sup>, 其术后视觉质量已成为医患双方共同的关注热点。

人眼视觉质量的体现是视力、像差等多因素相互作用的综合概况, SMILE 术后视觉质量的评价目前可分为主观和客观评价指标。前者包括视力、对比度视力、连续性功能性视力、对比敏感度函数 (contrast sensitivity function, CSF)、屈光手术视觉质量问卷量表, 后者包括波阵面像差、调制传递函数 (modulation transfer function, MTF)、点扩散函数 (point spread function, PSF)、眼内散射、色像差<sup>[2]</sup>。在 SMILE 手术的相关研究中, CSF 常用于评价患者术后在雾霾、沙尘等低对比度环境和傍晚、夜间等暗环境下的视觉质量<sup>[3]</sup>。PSF 与视觉质量的关系常用斯特尔比率 (strehl ratio, SR) 来定量表达, 正常眼的 SR 在 0~1 之间, 数值越高说明视觉质量越好<sup>[4]</sup>。眼内散射的量化评价指标为客观散射指数 (objective scatter index, OSI)<sup>[5]</sup>, OSI 值越高表明眼内散射越大, 视觉质量越差<sup>[6]</sup>。

视觉质量评价参数的逐渐应用和完善, 使得影响 SMILE 术后视觉质量的因素可以得到多角度的评估。近年来国内外围绕这一领域的相关研究不断丰富和深入, 本文就 SMILE 矫正近视及近视散光患者术后视觉质量的影响因素进行综述。

## 1 术前影响因素

1.1 屈光状态 患者术前等效球镜度 (spherical equivalent, SE) 与 SMILE 术后垂直彗差、球差的增加有关<sup>[7]</sup>, 与术后 OSI 呈正相关<sup>[8]</sup>。Jin 等<sup>[9]</sup>发现高度近视患者 SMILE 术后

彗差和球差比中度近视患者高,而与中高度近视患者相比,低度近视患者视力和对比敏感度(contrast sensitivity, CS)恢复更快,术后1mo眼内散射更少<sup>[10]</sup>。VisuMax飞秒激光系统近年来新发布的软件使超过-10D的患者行SMILE手术成为可能<sup>[6]</sup>,Qin等<sup>[11]</sup>应用SMILE矫正-10D以上的近视及近视散光患者,术后6mo裸眼视力(uncorrected visual acuity, UCVA)和最佳矫正视力(best corrected visual acuity, BCVA)分别为(-0.013±0.086)LogMAR和(-0.073±0.069)LogMAR,总高阶像差(higher order aberration, HOA)、球差和彗差均显著增加,术后三叶草像差保持稳定。

SMILE矫正散光患者的术后视觉质量与散光度数和散光轴有关,随着术前散光度数的增加,术后欠矫可能性增大。Ganesh等<sup>[12]</sup>研究结果显示,高度散光患者术后欠矫比例明显大于低度散光患者,术后OSI值比低度散光患者更低,Ivarsen等<sup>[13]</sup>和Gyldenkerne等<sup>[6]</sup>研究也得出相似结论。此外SMILE的视觉质量会随着散光轴的偏转角度增大而下降<sup>[14]</sup>,既往研究表明,当眼球旋转超过2°时若不进行矫正,则会影响散光矫正,术后像差增加,因此术前散光轴的确定和标记对SMILE术中静态眼球旋转的补偿十分重要<sup>[15]</sup>。

**1.2 瞳孔直径和Kappa角** 瞳孔大小与角膜HOA密切相关,是影响术后视觉质量的因素之一。研究发现,瞳孔直径为3mm或7mm时,单眼复视与总彗差和水平彗差存在相关性,眩光与球差和总像差存在相关性;星芒(starburst)在暗视瞳孔直径下,与球差和总HOA相关,在7mm瞳孔直径下,与总彗差相关<sup>[16-17]</sup>。提示术前瞳孔直径,尤其是暗瞳直径的测量值对视觉质量的考量十分重要。此外,较大的Kappa角也被证实易引起SMILE术后欠矫或不规则散光,术后HOA增加及眩光和光晕<sup>[18]</sup>,因此术前Kappa角的评估对术中是否需要Kappa角的补偿及避免术后视觉质量下降有重要意义。

**1.3 年龄** 不同年龄段患者SMILE术后的视觉质量也存在细微区别。年龄较大患者的术后夜间视力障碍发生率更高,Zhang等<sup>[19]</sup>提出40岁以上近视患者的角膜前表面的水平彗差、三阶像差和全眼的水平彗差、球差、三阶像差及四阶像差均与年龄呈正相关。此外术后CS改变也与患者年龄有关<sup>[20]</sup>。

**1.4 其他** 术前参数测量过程中,除瞳孔大小以外,泪膜和眼调节等因素会影响波前像差的分布,而波前像差的评估影响手术效果<sup>[21]</sup>。此外术前双眼视功能异常患者有术后发生复视的风险,因此术前双眼视功能的检查应引起重视<sup>[22]</sup>。

## 2 术中影响因素

**2.1 角膜帽的制作** SMILE术中角膜帽厚度范围一般为100~160μm<sup>[23]</sup>,较薄的角膜帽在术后早期视觉质量方面更有优势。Liu等<sup>[24]</sup>报道角膜帽厚度110μm的SMILE术后患者2h和24h的UCVA、SR、OSI值、MTF截止频率及中间空间频率的明暗CS均明显优于角膜帽厚度为150μm的SMILE术后患者,而术后3mo 110μm组术后角膜球差更高,但两组间上述其它指标再无明显差异,研究者认为,与角膜帽厚度为150μm的患者相比,角膜帽厚度为110μm的患者在明环境下精细分辨能力更好。超微结构

方面的研究也支持这一观点,Weng等<sup>[23]</sup>利用扫描电镜观察角膜帽厚度分别为120、130、140和150μm的SMILE术中基质透镜的表面规则性,相比之下,较薄角膜帽的基质透镜表面更光滑,术后角膜基质层间雾状混浊(haze)减少,视觉质量更佳。但远期视觉质量的评估中报道了不同的观点,Güell等<sup>[25]</sup>比较了SMILE术中130、140、150、160μm四种不同角膜帽厚度,发现术后1a各组的视力、SE、OSI值无明显差异,认为远期视觉质量无区别。

近年来有研究发现,角膜帽制作步骤的改良将为改善术后视觉质量提供可能,Shetty等<sup>[26]</sup>尝试在SMILE术中分离出基质透镜后,通过刮铲轻抚角膜前表面对角膜帽进行复位,术后1d观察结果表明,术中进行角膜帽复位操作的患者的MTF值和SR值明显优于对照组。

**2.2 光学区的设计** SMILE的切削区域为光学区,即所切削透镜的大小,术后真正提供功能性视觉的区域称为有效光学区(effective optical zone, EOZ)。在准分子激光原位角膜磨镶术(laser *in situ* keratomileusis, LASIK)术中过渡区的设计能有效避免光学区边缘角膜曲率的骤变,可减少术后球差的增加<sup>[27]</sup>,但有研究观察到高度近视患者行SMILE比有过渡区的FS-LASIK术后视觉质量更好<sup>[28]</sup>。无论是否有过渡区,术后EOZ均比预计EOZ小<sup>[29]</sup>,而夜间视力下降、眩光、光晕和重影的发生都与EOZ的减小相关<sup>[30]</sup>。

科学的光学区设计需结合患者瞳孔直径、角膜厚度和屈光度等综合考虑,其对视觉质量的影响与患者瞳孔大小相关联,当光学区直径小于瞳孔直径时,才会对视网膜图像产生负面影响<sup>[20]</sup>。吴艳等<sup>[31]</sup>比较大光学区(6.5~6.8mm)和小光学区(6.1~6.4mm)的SMILE术后1mo对比度视力、各级像差、各空间频率上的MTF值、MTF截止频率、SR值及OSI值等,提出SMILE术中适当缩小光学区仅导致夜间视力轻度下降,而对其他视觉质量指标无明显影响。但李浏洋等<sup>[32]</sup>观察到光学区为6.0mm的患者SMILE术后1mo时的彗差明显大于光学区为6.5mm的SMILE术后患者。

**2.3 切削中心的定位** 激光角膜屈光手术理想的切削区中心是视轴与角膜的交点,但在实践中该交点很难准确定位,SMILE切削中心的选择现在仍存在争议,有研究发现选择角膜顶点作为切削中心的SMILE术后偏心量、视觉质量比选择瞳孔中心更好<sup>[33]</sup>,也有学者提出选择同轴角膜映光反射点(coaxial sighted corneal light reflex, CSCLR)作为SMILE术的切削中心,术后偏心量更小<sup>[34]</sup>。

SMILE设备暂无主动眼球跟踪系统、虹膜识别等技术,其实际切削中心的准确性,一定程度上依赖于患者的依从性和手术医生的经验。用瞳孔中心定位时,瞳孔大小随光线的明暗而变化,瞳孔中心的位置随眼位而移动,选择其他切削中心时,也存在患者术中配合欠佳、激光能量不稳定、光学区过小及Kappa角过大<sup>[18]</sup>等因素,可造成切削区偏中心。

切削中心的偏离可致视力和CS明显下降,伴有眩光、光晕、单眼复视、不规则散光<sup>[35]</sup>。该类患者术后倾斜、垂直彗差、散光和球差明显增高<sup>[36-37]</sup>。研究表明偏中心切削对视觉质量的影响与偏心量的大小和方向有关,Wong等<sup>[38]</sup>发现距瞳孔中心0.13mm的偏心量不会导致SMILE

术后视力下降。Yu等<sup>[39]</sup>报道距角膜顶点0.37mm以上的偏心量导致SMILE术后HOA和垂直彗差明显增加。Huang等<sup>[35]</sup>报道SMILE矫正高度散光患者时,距CSCLR的偏心量超过0.2mm会导致术后彗差和球差。Li等<sup>[40]</sup>发现水平方向的偏心量的大小与术后水平彗差的增加呈正相关。

**2.4 不透明气泡层** 飞秒激光扫描时出现气泡积聚在角膜基质床,称为不透明气泡层(opaque bubble layer, OBL),多分为硬性和软性,硬性OBL致密,软性OBL弥散<sup>[41]</sup>。Ma等<sup>[42]</sup>于2018年提出SMILE术中OBL新的分期分级标准:存在于扫描透镜后表面的为I期OBL,并根据最大覆盖距离进一步分为四个等级;存在于前表面的为II期OBL,根据位置进一步分为中央型和周围型。

OBL的形成与角膜帽的厚度<sup>[43]</sup>、角膜厚度、基质透镜厚度<sup>[44]</sup>、角膜生物力和激光能量等因素有关<sup>[45]</sup>,当其聚集在瞳孔区时会延缓视力的恢复,但多数研究认为OBL不影响最终术后视力<sup>[42, 46]</sup>。对OBL是否影响术后视觉质量的观点并未完全统一,郭云林等<sup>[47]</sup>比较有OBL和无OBL的SMILE术后患者1、3、6mo时BCVA、SR值、MTF截止频率、OSI值、全眼HOA、垂直彗差、水平彗差及球差,发现术后各时间点两组在部分视觉质量指标上有差异。而Ma等<sup>[42]</sup>认为虽然OBL会干扰手术过程,但对SMILE远期视觉质量无不良影响。

**2.5 激光参数设置** 既往研究发现,随着激光能量的增加,角膜基质透镜组织的表面规则程度降低<sup>[48]</sup>。在目前不同范围激光能量的比较之中,多数结果支持低能量较高能量更有利于术后早期视力的恢复。Ji等<sup>[49]</sup>发现激光能量小于115nJ有助于提高SMILE术后1d、1wk视力,减少术后早期角膜像差的增加。Donate等<sup>[50]</sup>结论与之相似。但这并不意味着能量越低越好,在术后远期视觉质量的观察中,Lin等<sup>[51]</sup>报道了在激光能量分别为105、110、115、120nJ的四组SMILE术后3mo时,105nJ组出现屈光回退的比率最高,发生扫描黑区的占比高达45.16%,术后角膜水肿严重,且愈合反应明显。Kamiya等<sup>[52]</sup>比较了两种不同激光参数设置(第一组:激光能量140nJ、激光光斑距离3.0 $\mu\text{m}$ ;第二组:激光能量170nJ、激光光斑距离4.5 $\mu\text{m}$ )的SMILE术后MTF截止频率、SR值和OSI值等视觉质量指标的差异虽无统计学意义,但数值上显示第二组更佳,且切削时间更短,提示激光光斑距离可能与激光能量共同影响术后视觉质量。

**2.6 其他** 在目前已经发表的文献中,还有研究报道SMILE术中2mm微切口比3~5mm切口对角膜后表面像差影响小,但不同切口大小对术后6mo以后的角膜像差无影响<sup>[53]</sup>。残留的基质透镜可引起不规则散光和视力丧失,及时移除可恢复视力,不影响原SMILE手术的预期效果<sup>[54]</sup>。术中基质透镜分离方法也可能影响术后视觉质量,如连续撕镜技术使得基质透镜表面更平整光滑<sup>[55]</sup>、水浸润分离法可使术后残余散光减少<sup>[56]</sup>。Ganesh等<sup>[57]</sup>提出不分离透镜的正背面,采用“无分离”的方法直接取出透镜,术后视力恢复更快,视觉质量更好,但这需要在SMILE方面经验丰富的手术医生来完成。

### 3 术后影响因素

**3.1 角膜非球面性的变化** 术前存在的影响因素在术后

依然影响视觉质量,除此之外,角膜非球面性的变化是术后影响视觉质量的重要因素之一。人眼角膜的非球面特征用Q值表示,SMILE改变角膜形态,术后角膜前表面Q值向正值方向发展<sup>[58]</sup>。苏小连等<sup>[59]</sup>发现SMILE术后角膜前表面Q值与角膜HOA、球差、水平彗差及垂直彗差的改变量均呈正相关,且与术后球差的增加关系最密切。Zhang等<sup>[58]</sup>也得出相似结论,即角膜前表面Q值增加的越多,SMILE术后球差增加的越多,进而影响视觉质量。

**3.2 术后并发症** SMILE术后若出现感染性角膜炎等严重的并发症,将威胁视力。术后常见并发症干眼可导致角膜不规则散光和HOA增加<sup>[60]</sup>,泪膜不稳定导致散射增加,CS和视觉质量下降<sup>[61]</sup>。光敏感综合征(transient light-sensitivity syndrome, TLSS)是一种罕见术后并发症,发生率约1%,一般认为与FS-LASIK有关,但近年来有SMILE术后出现TLSS的病例报道,TLSS虽不影响视力,但通常在术后2~8wk出现严重畏光症状<sup>[62]</sup>。

**3.3 角膜伤口愈合反应** 尽管大部分无特殊并发症的患者术后视力恢复速度快,但伤口愈合反应、角膜重塑使得角膜对光线通透性下降,导致术后散射增加<sup>[63]</sup>。Ganesh等<sup>[64]</sup>观察SMILE术后伤口愈合进程,发现术后层间交界面粗糙程度与术后1d的视力、SR值、MTF值呈负相关,与术后2wk和3mo的MTF值呈负相关,表明SMILE术后层间交界面粗糙程度越轻,视觉质量越好。Liu等<sup>[4]</sup>比较SMILE和FS-LASIK术后24h内视力、视觉质量等指标的恢复情况,发现术后2h和4h,SMILE视力更差,OSI值更大,认为这与SMILE术后早期haze的形成有关。

SMILE术后角膜神经纤维的恢复情况也影响视觉质量。相较于其他术式,SMILE保留了更多的神经纤维,最近的一项Meta分析表明<sup>[65]</sup>,术后6mo内,SMILE在角膜知觉恢复和角膜神经纤维密度方面都比LASIK更有优势,而有研究证实术后早期神经纤维密度和神经纤维长度与患者主观视觉质量呈正相关<sup>[66]</sup>。

### 4 总结

综上,SMILE术后视觉质量不是单一因素调控的结果,而是由术前、术中和术后各阶段相互关联的多种因素共同作用。目前已发现的SMILE术后视觉质量的影响因素涉及术前患者年龄和眼部一般情况,术中部分手术设计、操作步骤及并发症,术后角膜非球面性的变化、部分并发症和伤口愈合反应。全面了解这些因素对手术如何优化设计有重要参考价值,同时能更好地帮助理解和解释患者术后视觉质量恢复过程中的不适症状,为SMILE围手术期的管理提供理论基础,有助于进一步探索改善术后视觉质量的措施。

#### 参考文献

- 1 Han T, Zhao F, Chen X, et al. Evaluation of disk halo size after small incision lenticule extraction (SMILE). *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2019;257(12):2789-2793
- 2 中华医学会眼科学分会眼视光学组,中国医师协会眼科医师分会眼视光专业委员会. 屈光手术视觉质量评价的专家共识. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2019;21(8):561-568
- 3 Kimlin JA, Black AA, Wood JM. Nighttime Driving in Older Adults: Effects of Glare and Association With Mesopic Visual Function. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2017;58(5):2796-2803
- 4 Liu T, Lu G, Chen K, et al. Visual and optical quality outcomes of

SMILE and FS-LASIK for myopia in the very early phase after surgery. *BMC Ophthalmol* 2019;19(1):88

5 Igarashi A, Kamiya K, Kobashi H, *et al.* Effect of Rebamipide Ophthalmic Suspension on Intraocular Light Scattering for Dry Eye After Corneal Refractive Surgery. *Cornea* 2015;34(8):895-900

6 Gyldenkerne A, Ivarsen A, Hjortdal J. Optical and visual quality after small-incision lenticule extraction. *J Cataract Refract Surg* 2019;45(1):54-61

7 Chen X, Wang Y, Zhang J, *et al.* Comparison of ocular higher-order aberrations after SMILE and Wavefront-guided Femtosecond LASIK for myopia. *BMC Ophthalmol* 2017;17(1):42

8 Miao H, Liu X, Tian M, *et al.* Short-term Observation of Intraocular Scattering and Bowman's Layer Microdistortions After SMILE-CCL. *J Refract Surg* 2018;34(6):387-392

9 Jin HY, Wan T, Yu XN, *et al.* Corneal higher-order aberrations of the anterior surface, posterior surface, and total cornea after small incision lenticule extraction (SMILE): high myopia versus mild to moderate myopia. *BMC Ophthalmol* 2018;18(1):295

10 Donate D, Thaeon R. SMILE With Low Energy Levels: Assessment of Early Visual and Optical Quality Recovery. *J Refract Surg* 2019;35(5):285-293

11 Qin B, Li M, Chen X, *et al.* Early visual outcomes and optical quality after femtosecond laser small-incision lenticule extraction for myopia and myopic astigmatism correction of over -10 dioptres. *Acta Ophthalmol* 2018;96(3):e341-e346

12 Ganesh S, Brar S, Pawar A. Results of Intraoperative Manual Cyclotorsion Compensation for Myopic Astigmatism in Patients Undergoing Small Incision Lenticule Extraction (SMILE). *J Refract Surg* 2017;33(8):506-512

13 Ivarsen A, Hjortdal J. Correction of myopic astigmatism with small incision lenticule extraction. *J Refract Surg* 2014;30(4):240-247

14 Zhang J, Wang Y, Wu W, *et al.* Vector analysis of low to moderate astigmatism with small incision lenticule extraction (SMILE): results of a 1-year follow-up. *BMC Ophthalmol* 2015;15:8

15 Alió Del Barrio JL, Vargas V, Al-Shymali O, *et al.* Small incision lenticule extraction (SMILE) in the correction of myopic astigmatism: outcomes and limitations—an update. *Eye Vis (Lond)* 2017;4:26

16 Li X, Wang Y, Dou R. Aberration compensation between anterior and posterior corneal surfaces after Small incision lenticule extraction and Femtosecond laser-assisted laser *in-situ* keratomileusis. *Ophthalmic Physiol Opt* 2015;35(5):540-551

17 Chalita MR, Chavala S, Xu M, *et al.* Wavefront analysis in post-LASIK eyes and its correlation with visual symptoms, refraction, and topography. *Ophthalmology* 2004;111(3):447-453

18 Shao T, Wang Y, Ng A, *et al.* The Effect of Intraoperative Angle Kappa Adjustment on Higher-Order Aberrations Before and After Small Incision Lenticule Extraction. *Cornea* 2020;39(5):609-614

19 Zhang FJ, Zhou Z, Yu FL, *et al.* Comparison of age-related changes between corneal and ocular aberration in young and mid-age myopic patients. *Int J Ophthalmol* 2011;4(3):286-292

20 Zhou J, Xu Y, Li M, *et al.* Preoperative refraction, age and optical zone as predictors of optical and visual quality after advanced surface ablation in patients with high myopia: a cross-sectional study. *BMJ Open* 2018;8(6):e023877

21 Manche E, Roe J. Recent advances in wavefront-guided LASIK. *Curr Opin Ophthalmol* 2018;29(4):286-291

22 García-Montero M, Albarrán Diego C, Garzón-Jiménez N, *et al.* Binocular vision alterations after refractive and cataract surgery: a review. *Acta Ophthalmol* 2019;97(2):e145-e155

23 Weng S, Liu M, Yang X, *et al.* Evaluation of Human Corneal

Lenticule Quality After SMILE With Different Cap Thicknesses Using Scanning Electron Microscopy. *Cornea* 2018;37(1):59-65

24 Liu T, Yu T, Liu L, *et al.* Corneal Cap Thickness and Its Effect on Visual Acuity and Corneal Biomechanics in Eyes Undergoing Small Incision Lenticule Extraction. *J Ophthalmol* 2018;2018:6040873

25 Güell JL, Verdaguer P, Mateu-Figuera G, *et al.* SMILE Procedures With Four Different Cap Thicknesses for the Correction of Myopia and Myopic Astigmatism. *J Refract Surg* 2015;31(9):580-585

26 Shetty R, Shroff R, Kaweri L, *et al.* Intra-Operative Cap Repositioning in Small Incision Lenticule Extraction (SMILE) for Enhanced Visual Recovery. *Curr Eye Res* 2016;41(12):1532-1538

27 Woodcock M, Shah S, Mandal N, *et al.* Small optical zones with aspheric profiles in laser refractive surgery for myopia: a surgical outcome and patient satisfaction study. *Cont Lens Anterior Eye* 2013;36(5):259-264

28 Qian Y, Chen X, Naidu RK, *et al.* Comparison of efficacy and visual outcomes after SMILE and FS-LASIK for the correction of high myopia with the sum of myopia and astigmatism from -10.00 to -14.00 dioptres. *Acta Ophthalmol* 2020;98(2):e161-e172

29 Fu D, Wang L, Zhou X, *et al.* Functional Optical Zone After Small-Incision Lenticule Extraction as Stratified by Attempted Correction and Optical Zone. *Cornea* 2018;37(9):1110-1117

30 Endl MJ, Martinez CE, Klyce SD, *et al.* Effect of larger ablation zone and transition zone on corneal optical aberrations after photorefractive keratectomy. *Arch Ophthalmol* 2001;119(8):1159-1164

31 吴艳, 陆燕, 杨丽萍, 等. 不同直径光学区对飞秒激光小切口角膜基质内透镜取出术(SMILE)后患者早期视觉质量的影响. *眼科新进展* 2018;38(8):736-741

32 李浏洋, 王雁, 李华, 等. 不同光学区 SMILE 术后全眼高阶像差比较. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2015;17(11):649-653

33 Liu M, Sun Y, Wang D, *et al.* Decentration of optical zone center and its impact on visual outcomes following SMILE. *Cornea* 2015;34(4):392-397

34 Lazaridis A, Droustas K, Sekundo W. Topographic analysis of the centration of the treatment zone after SMILE for myopia and comparison to FS-LASIK: subjective versus objective alignment. *J Refract Surg* 2014;30(10):680-686

35 Huang J, Zhou X, Qian Y. Decentration following femtosecond laser small incision lenticule extraction (SMILE) in eyes with high astigmatism and its impact on visual quality. *BMC Ophthalmol* 2019;19(1):151

36 Kligman BE, Baartman BJ, Dupps WJ. Errors in Treatment of Lower-order Aberrations and Induction of Higher-order Aberrations in Laser Refractive Surgery. *Int Ophthalmol Clin* 2016;56(2):19-45

37 Lee H, Roberts CJ, Arba-Mosquera S, *et al.* Relationship Between Decentration and Induced Corneal Higher-Order Aberrations Following Small-Incision Lenticule Extraction Procedure. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2018;59(6):2316-2324

38 Wong JX, Wong EP, Htoon HM, *et al.* Intraoperative centration during small incision lenticule extraction (SMILE). *Medicine (Baltimore)* 2017;96(16):e6076

39 Yu Y, Zhang W, Cheng X, *et al.* Impact of Treatment Decentration on Higher-Order Aberrations after SMILE. *J Ophthalmol* 2017;2017:9575723

40 Li M, Zhao J, Miao H, *et al.* Mild decentration measured by a Scheimpflug camera and its impact on visual quality following SMILE in the early learning curve. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014;55(6):3886-3892

41 Mastropasqua L, Calienno R, Lanzini M, *et al.* Opaque bubble layer incidence in Femtosecond laser-assisted LASIK: comparison among different flap design parameters. *Int Ophthalmol* 2017;37(3):635-641

- 42 Ma J, Wang Y, Li L, *et al.* Corneal thickness, residual stromal thickness, and its effect on opaque bubble layer in small - incision lenticule extraction. *Int Ophthalmol* 2018;38(5):2013-2020
- 43 Liu M, Zhou Y, Wu X, *et al.* Comparison of 120- and 140- $\mu$ m SMILE Cap Thickness Results in Eyes With Thick Corneas. *Cornea* 2016; 35(10):1308-1314
- 44 Son G, Lee J, Jang C, *et al.* Possible Risk Factors and Clinical Effects of Opaque Bubble Layer in Small Incision Lenticule Extraction (SMILE). *J Refract Surg* 2017;33(1):24-29
- 45 Jung HG, Kim J, Lim TH. Possible risk factors and clinical effects of an opaque bubble layer created with femtosecond laser-assisted laser *in situ* keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2015;41(7):1393-1399
- 46 Titiyal JS, Kaur M, Rathi A, *et al.* Learning Curve of Small Incision Lenticule Extraction: Challenges and Complications. *Cornea* 2017; 36(11):1377-1382
- 47 郭云林, 高晓唯, 胡裕坤, 等. SMILE 术中不透明气泡层对术后患者视觉质量的影响. *国际眼科杂志* 2017;17(1):38-42
- 48 Lombardo M, De Santo MP, Lombardo G, *et al.* Surface quality of femtosecond dissected posterior human corneal stroma investigated with atomic force microscopy. *Cornea* 2012;31(12):1369-1375
- 49 Ji YW, Kim M, Kang D, *et al.* Lower Laser Energy Levels Lead to Better Visual Recovery After Small - Incision Lenticule Extraction; Prospective Randomized Clinical Trial. *Am J Ophthalmol* 2017; 179: 159-170
- 50 Donate D, Thaëron R. Lower Energy Levels Improve Visual Recovery in Small Incision Lenticule Extraction (SMILE). *J Refract Surg* 2016;32(9):636-642
- 51 Lin L, Weng S, Liu F, *et al.* Development of low laser energy levels in small-incision lenticule extraction; clinical results, black area, and ultrastructural evaluation. *J Cataract Refract Surg* 2020;46(3):410-418
- 52 Kamiya K, Shimizu K, Igarashi A, *et al.* Effect of femtosecond laser setting on visual performance after small-incision lenticule extraction for myopia. *Br J Ophthalmol* 2015;99(10):1381-1387
- 53 李晓晶, 王雁, 张琳. 2mm 微切口 SMILE 术后近视矫治眼高阶像差的变化. *中华实验眼科杂志* 2015;33(2):142-148
- 54 Ganesh S, Brar S, Lazaridis A. Management and Outcomes of Retained Lenticules and Lenticule Fragments Removal After Failed Primary SMILE: A Case Series. *J Refract Surg* 2017;33(12):848-853
- 55 Zhao Y, Li M, Sun L, *et al.* Lenticule Quality After Continuous Curvilinear Lenticule Extraction in SMILE Evaluated With Scanning Electron Microscopy. *J Refract Surg* 2015;31(11):732-735
- 56 Liu T, Zhu X, Chen K, *et al.* Visual outcomes after balanced salt solution infiltration during lenticule separation in small-incision lenticule extraction for myopic astigmatism. *Medicine (Baltimore)* 2017; 96(30):e7409
- 57 Ganesh S, Brar S. Lenticuloschisis: A "No Dissection" Technique for Lenticule Extraction in Small Incision Lenticule Extraction. *J Refract Surg* 2017;33(8):563-566
- 58 Zhang H, Wang Y, Li H. Corneal Spherical Aberration and Corneal Asphericity after Small Incision Lenticule Extraction and Femtosecond Laser-Assisted LASIK. *J Ophthalmol* 2017;2017:4921090
- 59 苏小连, 王雁. SMILE 术后角膜前表面非球面性与角膜高阶像差的关系. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2014;16(7):416-420
- 60 Koh S. Irregular Astigmatism and Higher-Order Aberrations in Eyes With Dry Eye Disease. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2018; 59(14): DES36-DES40
- 61 Gouvea L, Waring GO, Brundrett A, *et al.* Objective assessment of optical quality in dry eye disease using a double-pass imaging system. *Clin Ophthalmol* 2019;13:1991-1996
- 62 Desautels JD, Moshirfar M, Quist TS, *et al.* Case of Presumed Transient Light - Sensitivity Syndrome After Small - Incision Lenticule Extraction. *Cornea* 2017;36(9):1139-1140
- 63 Dong Z, Zhou X, Wu J, *et al.* Small incision lenticule extraction (SMILE) and femtosecond laser LASIK; comparison of corneal wound healing and inflammation. *Br J Ophthalmol* 2014;98(2):263-269
- 64 Ganesh S, Brar S, Pandey R, *et al.* Interface healing and its correlation with visual recovery and quality of vision following small incision lenticule extraction. *Indian J Ophthalmol* 2018;66(2):212-218
- 65 Kobashi H, Kamiya K, Shimizu K. Dry Eye After Small Incision Lenticule Extraction and Femtosecond Laser - Assisted LASIK; Meta - Analysis. *Cornea* 2017;36(1):85-91
- 66 王力翔, 李莹. SMILE、FS-LASIK 及 T-PRK 术后角膜神经纤维的恢复情况及其与主观视觉质量的相关性研究. *中华眼科杂志* 2018; 54(10):737-743