

【DOI】 10.3969 / j.issn.1671-6450.2026.01.022

综 述

SMILE 术后散光矫正效果的影响因素研究进展

刘才毓综述 杨芳文 欧尚坤审校

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK [2024]) ; 贵州省卫生健康委科学技术基金项目(gzwkj 2023-059)

作者单位: 556000 贵州凯里 贵州医科大学第二附属医院眼科(刘才毓、杨芳文) ; 550000 贵州贵阳 贵州医科大学附属医院眼科(欧尚坤) ; 550000 贵州贵阳 贵州医科大学(刘才毓、欧尚坤)

通信作者: 杨芳文 E-mail: 17339637@ qq.com



【摘 要】 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(SMILE) 作为新一代屈光手术的代表 ,是一种基于飞秒激光技术的微创、无瓣膜屈光矫正术式。该术式凭借其优异的角膜生物力学稳定性、对基质层神经丛损伤较小等显著优势 ,已在近视及散光矫正领域确立了主流地位。然而 现有临床研究表明 尽管 SMILE 手术在近视、散光矫正方面展现出良好的安全性和有效性 ,但术后屈光欠矫及回退现象仍不容忽视 ,这一现象在高度散光患者群体中尤为显著。文章综述了影响 SMILE 手术散光矫正效果的多因素机制 ,旨在为临床实践提供理论依据和决策参考。

【关键词】 散光; 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; 视觉质量; 矫正效果; 影响因素

【中图分类号】 R778.1⁺3

【文献标识码】 A

Factors influencing astigmatic correction outcomes following small incision lenticule extraction Liu Caiyu^{*} , Yang Fangwen , Ou Shangkun.^{*} Department of Ophthalmology , the Second Affiliated Hospital of Guizhou Medical University ,Guizhou Kaili 556000 ,China

Funding program: Guizhou Provincial Science and Technology Plan Project (Qiankehe Jichu-ZK [2024]) ; Guizhou Health Commission Science and Technology Fund Project (gzwkj 2023-059)

Corresponding author: Yang Fangwen E-mail: 17339637@ qq.com

【Abstract】 Femtosecond laser small incision corneal stromal lenticule extraction (SMILE) is a representative of the new generation of refractive surgeries, which is a minimally invasive and flapless refractive correction procedure based on femtosecond laser technology. This surgical method, with its outstanding corneal biomechanical stability and relatively minor damage to the nerve plexus of the stromal layer, has established a dominant position in the field of myopia and astigmatism correction. However, current clinical studies have shown that although SMILE surgery demonstrates good safety and effectiveness in myopia and astigmatism correction, postoperative refractive undercorrection and regression phenomena still cannot be ignored, and this phenomenon is particularly prominent in patients with high astigmatism. This review systematically analyzed the multiple factors that affect the refractive correction effect of SMILE surgery, aiming to provide theoretical basis and decision-making references for clinical practice.

【Key words】 Astigmatism; Small incision lenticule extraction; Visual quality; Correction outcome; Influence factors

近视(myopia) 是一种以遗传易感性与环境因素等多种病因交互作用为特征的常见的屈光不正 ,多发于儿童青少年时期 ,已成为全球范围内视力损害的首要公共卫生问题 ,亚洲地区近视患病率呈现显著地域聚集性 ,部分国家和地区的发病率已突破 80%^[1] ,造成沉重的健康与社会经济负担。散光(astigmatism) 同样是屈光不正的常见类型 ,与近视具有显著的共病特征 ,低度散光也会降低视力并影响患者的视觉质量^[2]。飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(small incision lenticule extraction SMILE) 作为第三代角膜屈光手术 ,具有微创、维持角膜前弹力层完整性、降低术后干眼发生率等优势^[3]。研究显示 ,SMILE 矫正近视的有效性和安全性与传统准分子激光角膜

原位磨镶术(LASIK) 相当 ,但散光矫正的效果存在争议^[4]。这主要是由于 VisuMax 500 飞秒激光系统缺乏术中眼球追踪、自动虹膜识别、旋转补偿功能 ,导致术中散光轴向定位偏差而影响散光矫正的精确性^[5]。此外 ,SMILE 手术的矫正精度还与患者眼部特征、手术参数设计等因素有关 ,为此 ,本文系统综述影响 SMILE 手术散光矫正精度的多维度关键因素 ,旨在为优化手术方案、提升散光矫正效果提供循证依据。

1 患者眼部特征的影响

1.1 术前散光大小与类型 在屈光手术中 ,散光的矫正与等效球镜(spherical equivalent SE) 的矫正同等重要 ,其不仅会显著降低患者的视觉清晰度和成像质量 ,还会严重影响其对高精度

视觉需求工作的胜任能力。散光作为一个包含大小(屈光度)和方向(轴向)的矢量参数,其手术矫正必须同时精确考量这两个关键要素,唯有实现散光矢量的精确定位和准确矫正,才能获得理想的手术效果和视觉质量^[6]。当前散光矫正主要依据角膜前表面的屈光状态进行设计,未充分考虑散光来源(角膜前后表面或眼内成分)的差异性,这种以角膜前表面为主导的矫正方式可能导致术后全眼散光的量值和类型发生变化,进而影响最终的视觉质量,因此,实现精准散光矫正应综合考虑角膜和眼内散光的来源及其相互作用。

关于 SMILE 手术对中高度散光的矫正效果仍存争议。有研究认为其效果与 LASIK 相当^[7],但更多研究持相反意见,尤其是术前高度散光患者更容易在术后出现欠矫和屈光回退^[8],这主要是由于 SMILE 手术所采用的 VisuMax 500 飞秒激光系统缺乏 LASIK 系统所具备的自动识别及旋转补偿技术^[5],这一技术差异限制了 SMILE 手术对散光尤其是高度散光的精准矫正能力。

研究发现,眼部各光学组件的散光分布中,角膜前表面、后表面及晶状体的平均散光矢量值分别为 $-1.33\text{D}\times 3.0^\circ$ 、 $-0.33\text{D}\times 95.3^\circ$ 和 $-0.27\text{D}\times 103.3^\circ$,这表明角膜前表面是眼球总散光的主要来源,同时各光学组件在轴向上的分布特征提示它们之间可能存在一定的补偿关系,而对于术前眼内高散光患者而言,术后会残留更多散光^[9]。因此,在制定屈光手术方案和散光矫正策略时,应重点考虑角膜前表面的散光特性,同时也不能完全忽视角膜后表面和晶状体散光的潜在影响。若术前全眼散光与角膜前表面散光轴向一致,且以顺规散光为主,术后伴随着角膜前表面散光度数的减小,全眼散光的散光轴向分布可能会转向逆规散光^[10],这可能是由于角膜前表面散光减少后眼内散光(多为逆规散光)的主导作用随之显现。Mao 等^[11]研究指出,SMILE 手术对逆规散光(ATR)的矫正效果显著优于顺规散光(WTR),而当散光 $\geq 1.25\text{D}$ 时,不论是 WTR 还是 ATR,其矫正不足的风险均较轻度散光者更高,对于斜轴散光者,则可能出现轻度过矫的倾向,这可能与角膜生物力学特性在不同轴向的差异有关。

1.2 Kappa 角与角膜生物力学特性 关于 Kappa 角的生理特征及其与屈光状态的关系因种族、性别、年龄、眼别和眼前节生物特征参数如眼轴(axial length,AL)的不同而存在显著变化,随着 AL 的增加,Kappa 角的变化呈非线性,位置逐渐从视觉轴的颞侧转移到鼻侧^[12]。Qi 等^[13]研究发现,在三焦点衍射人工晶状体(IOL)植入术中,当 Kappa 角 $>0.4^\circ$ 时,患者术后出现眩光、光晕等视觉干扰症状的几率显著升高,当角度大于 0.5° 时则会直接导致患者术后视觉质量下降。Kappa 角大小直接影响飞秒激光手术切削的中心定位。较大的 Kappa 角易导致切削偏心,导致视轴与瞳孔轴的距离变大,从而引起术源性的高阶像差,术后视觉质量下降,因此对于大 Kappa 角的患者,术中需精准选择切削中心以减少偏心量,同时可视情况对大 Kappa 角进行补偿调整^[14]。

角膜的生物力学特性与其几何形态存在显著的相互依赖关系,主要归纳为四个核心特征:黏弹性(包含黏性、弹性和刚

度三个要素)、各向异性、非线性及不可压缩性,这些特性的协同作用不仅维持了角膜的结构稳定性,更直接决定了其屈光性能的精准性,因此,评估角膜生物力学特性,既是屈光手术前安全性筛查的重要环节,也是术后监测角膜扩张风险的关键依据^[15]。角膜屈光手术会破坏角膜前弹力层及前部基质层,这两者是维持角膜抗拉强度的关键结构,进而导致角膜曲率发生改变,这是角膜生物力学改变的主要原因^[16]。研究表明,较硬的角膜术后出现绝对 $\text{SE}>0\text{D}$ 和 $\geq 0.25\text{D}$ 的风险比分别增加了 3.81 和 2.80 倍,角膜硬度较低的患者在接受 SMILE 手术后,发生残余屈光不正的风险增加 2~4 倍,这说明术后残余屈光不正与术前角膜生物力学特性密切相关,而术中不同切削比与术后角膜生物力学的改变具有相关性,因此术前个性化设计应充分对角膜生物力学特性进行评估以优化手术规划,提高术后屈光结果的可预测性^[17]。

2 手术设计参数影响

2.1 角膜帽厚度、光学区、切口设计 角膜帽厚度作为 SMILE 手术的关键参数,术中通过飞秒激光能量在角膜内进行精准切削,从而分离出角膜帽和基质床以制作透镜,准确把握切削深度对保证角膜厚度安全范围及手术效果至关重要。目前,理想的角膜帽厚度尚无统一标准。若角膜帽过薄,术中分离透镜时外力作用会增加角膜撕裂风险,并影响角膜生物力学稳定性;若角膜帽过厚可能对屈光矫正造成影响。临床上普遍选择的角膜帽厚度范围为 $100\sim 160\mu\text{m}$,而实际手术中多设计为 $110\sim 120\mu\text{m}$,这是由于 $110\sim 120\mu\text{m}$ 的角膜帽厚度不影响 SMILE 术后的 SE、散光、SP-A1 的矫正,两者相比之下, $110\mu\text{m}$ 在术后早期视力恢复及视觉质量方面优于 $120\mu\text{m}$ 的角膜厚度, $100\mu\text{m}$ 的角膜帽厚度可以保留更多的中央角膜基底下神经纤维,而较厚的角膜帽更有利于角膜神经再生^[18-19]。

有效光学区(effective optical zone,EOZ)是术后能够提供最佳光学质量和最小角膜曲率变化的区域,缩小 EOZ 面积或 EOZ 偏心都可能导致术后高阶像差增加,其中,沿角膜长轴方向产生的像差通常少于短轴方向,像差增加会使患者出现主观眩光、夜间视力下降等症^[20],这可能在一定程度上掩盖散光矫正不精准的问题。

此外,SMILE 手术中不同的切口大小对散光矫正亦存在影响,较小的切口愈合反应越小,在术后垂直彗差、角膜前表面散光方面更有优势,越能体现微切口的优越性,而不同的切口位置与角度(上方切口与颞侧切口)并不会影响其矫正散光的效果^[21]。

2.2 眼球旋转与散光轴位 动态眼球旋转是由于术中固视不佳引起的,但在负压吸引环的固定作用下,其对散光矫正产生的影响微乎其微;而当人体从坐位变为卧位时,由于前庭反射等生理活动产生的静态眼球旋转是导致激光切削中心与预设靶点产生偏移的重要原因^[22]。目前已报道的眼球旋转幅度在 $0\sim 17^\circ$ 不等^[23],当眼球旋转 $>2^\circ$ 且不进行补偿时,SMILE 手术治疗可能会造成散光欠矫;当眼球旋转 $\geq 4^\circ$ 可能会造成约 14% 的散光欠矫,并且随着旋转度的增加,散光轴向错位和度数欠矫也可能随之增加,从而影响患者术后的视觉质量^[24]。在角膜

屈光手术中,目前普遍采用包括虹膜定位技术、波前像差引导等在内的多模态补偿技术以优化临床疗效^[25]。

2.3 透镜偏中心与中心定位 在 SMILE 手术中,光学透镜中心定位精度直接取决于瞬态负压吸引时的眼球固定状态,受患者头位稳定性、配合度及眼球旋转等因素影响,因此透镜偏中心难以避免。若发生偏中心切削,透镜光学区与全眼的视轴发生偏离,可诱散发光与彗差,其引入的彗差与偏心程度呈线性关系,与接受矫正的近视散光患者的屈光度也近似呈线性关系^[26],偏中心切削是导致术后高阶像差(尤其是彗差)增加的主要原因之一,可影响术后视觉质量,引发视物模糊、眩光、复视及夜间视力下降等症状^[27]。当前 SMILE 中心定位方法的选择仍存在争议,这主要基于眼球光学系统的生理局限性:眼睛并非完美的光学系统,注视物像无法穿过眼内所有光学元件精准投射至黄斑中央凹(理想光学轴),因此屈光手术中必须使用一些参考标志(瞳孔中心、角膜顶点)进行中心定位^[28]。

瞳孔中心(pupil center, PC)定位以虹膜括约肌所围成的光学孔径的几何对称中心为基准点,其优点在于便于测量,但稳定性较差,易受光线、屈光状态、年龄、种族差异等诸多因素影响。以美国白人群体为例研究发现,平均中视瞳孔大小为 (5.68 ± 1.09) mm,平均明视瞳孔大小为 (4.65 ± 1.09) mm,且年龄每增加 10 岁,中视和明视平均瞳孔大小分别减少 0.39 mm 和 0.25 mm^[29]。因此由于手术环境与检查时的光线、温度等存在差异,会导致瞳孔大小及中心发生改变,从而增加术中透镜偏心的风险^[30]。

角膜顶点(corneal vertex, CV)定位以第一浦肯野像与黄斑中心凹的连线在角膜前表面的交点为基准,即角膜地形图上曲率最高点,也被视为最接近视轴的角膜截距^[31]。大多数情况下, CV 和 PC 之间的距离非常小,但在高度屈光不正或圆锥角膜等特殊情况下,可能会出现较大的 Kappa 角,但总体而言, CV 因其与浦肯野像的空间一致性被广泛认为是最接近视轴的光学参考点^[28]。与 PC 中心定位相比,基于地形图介导的 CV 中心定位可以减少高阶像差(HOAs)发生^[26],相关的荟萃分析也显示以 CV 为中心定位的方法在某些临床指标(例如彗差)中更具优势^[32]。

同轴角膜映光点(coaxial corneal light reflection, CCLR)定位是指在共轴注视状态下(视轴与照明光路重合时)角膜前表面的反射点,其与 CV 经常混淆,这是由于确定 CCLR 的方法涉及 CV 的定位^[31]。二者本质差异在于 CCLR 是动态光学现象(依赖注视共轴性),而 CV 是静态解剖标志(角膜几何顶点)。浦肯野像是由从角膜和透镜界面反射的光所产生的图像,可将眼部结构与功能关联,其位置和形态受眼部结构及注视方向影响,通过浦肯野图像可以分析光如何与这些结构相互作用,因此 CCLR 的定位需要结合浦肯野图像分析。研究认为,采用 CCLR 作为切削中心较 PC 具有显著优势,原因在于 CCLR 具有光源无关性及动态追踪的优势,避免了光线亮度对瞳孔大小的影响,重复性更高,减少了偏心切削发生的概率,是较为理想的切削中心点^[33]。因此,精准的中心定位可以减小术后光学区偏心,是实现理想屈光手术效果的核心技术要素。

3 术后动态修复与并发症

3.1 角膜愈合反应 角膜作为人体内神经分布最为密集的组织,在促进上皮再生与局部免疫调节中均发挥着关键作用,是维持眼表稳态的重要支柱^[34]。在 SMILE 手术中,角膜基质透镜的制作与取出需在基质层内进行操作,这一过程不可避免地会造成角膜神经纤维的机械性横断,此类神经损伤不仅直接导致轴突功能丧失、传导能力下降,进而降低角膜感觉神经末梢的敏感性;还会诱发神经源性炎症反应,伴随出现角膜水肿、疼痛,以及白细胞的募集与激活等病理改变^[35]。而 SMILE 手术的小切口显著减少了角膜神经纤维的横断范围,更好地保留了角膜神经丛的完整性,从而减轻术后早期炎症反应和伤口愈合反应,但在高度近视矫正时,由于需要去除更厚的基质层组织,仍可能引发显著的角膜细胞活化反应^[36]。角膜屈光术后 1 h 内即可观察到炎症细胞的快速募集,这一早期炎症反应伴随着多种生物活性物质的动态变化,包括促炎细胞因子、趋化因子及生长因子等介质的表达波动,这些介质波动不仅调控角膜伤口的愈合进程,还参与调控角膜细胞迁移、增殖及眼表上皮细胞的程序性死亡等,并且术后基质胶原纤维的重塑过程可能会导致角膜散光轴位发生微旋转,进而对早期视觉质量造成影响^[37]。基于上述病理生理机制,在术后关键窗口期(通常为术后 1~4 周)实施规范的抗炎治疗对维持角膜透明性和视觉稳定性具有重要临床意义。

3.2 干眼与泪膜稳定性 干眼症(dry eye disease)是以泪膜稳态失衡为核心的多因素复杂眼表疾病。角膜屈光手术后发生干眼的主要机制包括:(1)手术造成的角膜神经纤维横断直接损害了角膜感觉传导通路,导致眨眼反射弧完整性受损;(2)眼表-泪腺神经反馈环路功能受损,引起基础泪液分泌显著减少;(3)损伤的角膜神经无法正常分泌神经营养因子,影响角膜上皮修复能力;(4)反射性眨眼频率降低导致睑板腺脂质分泌异常,加剧泪膜蒸发过强型干眼发生^[38]。不同角膜屈光手术方式对神经纤维损伤程度及干眼发生的影响存在显著差异。研究显示,相对于小切口的 SMILE 手术, LASIK 手术因需制作角膜瓣,会切断更多角膜基质神经丛,术后干眼发生率为 36%~75%,而约 80%的 SMILE 患者在术后 6 个月无需任何泪液补充剂^[39]。非侵入性泪膜分析仪检测显示, SMILE 矫正较高屈光度时,泪膜动力学不稳定性增加,表现为泪膜破裂时间(TBUT)缩短、泪脂层厚度(LLT)改变。泪膜不稳定性会导致每次眨眼后高阶像差波动幅度增加,从而引发间歇性视物模糊症状,同时,泪膜不规则破裂会增强光线散射,降低视网膜成像的对比敏感度,临床表现为显著的光晕和眩光现象,当干眼症患者在一种视觉症状下难以看清事物时,就会发生眼疲劳^[40]。泪膜作为眼表重要的光学界面,其稳定性直接影响视觉成像质量。角膜前泪膜通过周期性眨眼实现动态更新,维持均匀光学表面,研究表明,泪膜波动(泪膜动力学改变)会诱发波前像差改变,常见为不规则散光和 HOA 增加,从而对视力质量造成相应影响^[41]。因此,针对角膜屈光术后干眼症的管理,建议采取阶梯式个体化治疗方案,根据病情严重程度进行分阶段干预:(1)基础治疗阶段,使用无防腐剂人工泪液联合脂质替代疗法;(2)抗

炎治疗阶段 对于中度及以上干眼症 加用 0.05% 环孢素滴眼液等抗炎药物; (3) 黏蛋白调节阶段 应用 3% 地夸磷索钠等促黏蛋白分泌剂 改善眼表微环境; (4) 机械性干预阶段 植入临时性或永久性泪点栓 但此类干预较少用于 SMILE 术后干眼; (5) 生物治疗阶段 对顽固性病例采用自体血清滴眼液 必要时联合湿房镜治疗^[38] 该渐进式治疗方案有助于改善术后眼表微环境 促进角膜神经再生 提高视觉质量。除干眼症外 SMILE 术后可能发生的并发症主要包括以下三类: (1) 感染性并发症 如细菌性或病毒性角膜炎等; (2) 结构性并发症 如角膜上皮缺损、角膜层间积液综合征等; (3) 生物力学并发症 如角膜扩张、角膜变形、屈光回退等。因此 充分的术前评估及术后规范用药(包括局部使用人工泪液、抗炎、修复上皮等药物) 对预防并发症具有重要意义^[42-43]。

4 总结与展望

SMILE 术后散光矫正的效果是一个多因素参与的动态过程 其疗效稳定性主要取决于三个关键环节: 患者眼部参数、手术设计精准度及患者术后角膜修复的动态平衡过程。为实现 SMILE 手术最优效果 建议术前采用 Scheimpflug 成像联合角膜地形图引导的个性化手术规划实现亚毫米级精度测量 术中应用动态眼球追踪技术确保激光定位精确性 术后实施标准化药物治疗方案以促进组织生理性愈合。未来结合 AI 与新型飞秒激光设备的深度融合 SMILE 有望在散光矫正方面取得突破性进展 实现更优视觉质量目标。

参考文献

- [1] Ovenseri-ogbomo G ,Osugwu UL ,Ekpenyong BN ,et al. Systematic review and meta-analysis of myopia prevalence in African school children [J]. PLoS One , 2022 , 17(2) : e0263335. DOI: 10.1371/journal.pone.0263335.
- [2] Schallhorn SC ,Hettinger KA ,Pelouskova M ,et al. Effect of residual astigmatism on uncorrected visual acuity and patient satisfaction in pseudophakic patients [J]. J Cataract Refract Surg ,2021 ,47(8) : 991-998. DOI: 10.1097/j.jcrs.0000000000000560.
- [3] 周如侠,冯冬梅,王洁. 角膜地形图引导的 FS-LASIK 与 SMILE 矫治中高度近视的临床疗效对比 [J]. 中国临床医生杂志 , 2025 , 53(3) : 337-340. DOI: 10.3969/j.issn.2095-8552.2025.03.018.
- [4] Song J ,Cao H ,Chen X ,et al. Small incision lenticule extraction (SMILE) versus laser assisted stromal in situ keratomileusis (LASIK) for astigmatism corrections: a systematic review and meta-analysis [J]. Am J Ophthalmol , 2023 , 247: 181-99. DOI: 10.1016/j.ajo.2022.11.013.
- [5] Sachdev GS ,Patekar KB ,Ramamurthy S. Comparative analysis of visual outcomes following small-incision lenticule extraction with or without cyclotorsion compensation in eyes with high astigmatism: Contralateral eye study [J]. Indian J Ophthalmol ,2023 ,71(6) : 2469-2473. DOI: 10.4103/IJO.IJO_224_23.
- [6] Cui G ,Di Y ,Yang S ,et al. Efficacy of small-incision lenticule extraction surgery in high astigmatism: A meta-analysis [J]. Front Med (Lausanne) 2023 9: 1100241. DOI: 10.3389/fmed.2022.1100241.
- [7] Zhou J ,Gu W ,Gao Y ,et al. Vector analysis of high astigmatism (≥ 2.0 diopters) correction after small-incision lenticule extraction with stringent head positioning and femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis with compensation of cyclotorsion [J]. BMC Ophthalmol , 2022 , 22(1) : 157. DOI: 10.1186/s12886-022-02384-0.
- [8] Teo ZL ,Ang M. Femtosecond laser-assisted in situ keratomileusis versus small-incision lenticule extraction: current approach based on evidence [J]. Curr Opin Ophthalmol ,2024 ,35(4) : 278-283. DOI: 10.1097/ICU.0000000000001060.
- [9] Qian YS ,Huang J ,Liu R ,et al. Influence of internal optical astigmatism on the correction of myopic astigmatism by LASIK [J]. J Refract Surg , 2011 , 27(12) : 863-868. DOI: 10.3928/1081597X-20110629-01.
- [10] 陈开建. 不同程度散光手术矫正策略的临床研究 [D]. 重庆: 中国人民解放军陆军军医大学 , 2018.
- [11] Mao X ,Chen H ,Zhao Y ,et al. Impact of the preoperative cylinder on astigmatism correction in femtosecond lenticule extraction (FLEX) : a prospective observational study [J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol ,2024 ,262(2) : 631-639. DOI: 10.1007/s00417-023-06211-0.
- [12] Neuman G ,Abulafia A ,Wasser L ,et al. Distribution of angle alpha and angle kappa offsets among adult candidates for cataract surgery [J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol ,2025 ,263(1) : 157-170. DOI: 10.1007/s00417-024-06596-6.
- [13] Qi Y ,Lin J ,Leng L ,et al. Role of angle κ in visual quality in patients with a trifocal diffractive intraocular lens [J]. J Cataract Refract Surg , 2018 , 44(8) : 949-954.
- [14] 康婷婷,尹连荣,刘沙沙,等. SMILE 术中大 Kappa 角的调整对术后全眼高阶像差的影响 [J]. 眼科新进展 , 2023 , 43(10) : 790-794. DOI: 10.13389/j.cnki.rao.2023.0159.
- [15] 李浩铭. 角膜生物力学参数对飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术矫正近视的透镜切削厚度的影响 [D]. 沈阳: 中国医科大学 , 2024.
- [16] 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.
- [17] 魏嘉,马雅玲. SMILE 对角膜生物力学影响的研究进展 [J]. 中外医学研究 , 2023 , 21(33) : 175-180. DOI: 10.14033/j.cnki.cfmr.2023.33.044.
- [18] Song Y ,Deng S ,Lyv X ,et al. Corneal subbasal nerve plexus reinnervation and stromal cell morphology with different cap thicknesses in small incision lenticule extraction [J]. Eye Vis (Lond) ,2024 ,11(1) : 15. DOI: 10.1186/s40662-024-00381-6.
- [19] 张新立,刘洋,符建,等. SMILE 不同角膜帽厚度对近视散光患者术后散光及早期视觉质量的影响 [J]. 国际眼科杂志 , 2024 , 24(11) : 1811-1815. DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2024.11.22.
- [20] Meng X ,Ding H ,Yang Z ,et al. Effects of effective optical zone and decentration on visual quality after smile for different astigmatism types [J]. BMC Ophthalmol ,2025 ,25(1) : 121. DOI: 10.1186/s12886-025-03948-6.
- [21] 田彩霞,王雁,赵新恒,等. SMILE 切口大小对患者术后散光及高阶像差的影响 [J]. 眼科新进展 , 2023 , 43(9) : 717-721. DOI: 10.13389/j.cnki.rao.2023.0144.

- [22] 陆志峰,王子辰,陆嘉君,等. 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术中旋转补偿对散光矫正疗效的 Meta 分析 [J]. 国际眼科杂志, 2023, 23 (5): 797-803. DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2023.16.
- [23] 张敏,季敏,吴坚,等. 飞秒激光辅助白内障超声乳化术中患者眼球旋转的临床观察 [J]. 眼科新进展, 2021, 41(10): 956-959. DOI: 10.13389/j.cnki.rao.2021.0201.
- [24] Pedersen IB, Ivarsen A, Hjortdal J.Changes in astigmatism, densitometry, and aberrations after SMILE for low to high myopic astigmatism: A 12-month prospective study [J]. J Refract Surg, 2017, 33 (1): 11-17. DOI: 10.3928/1081597X-20161006-04.
- [25] 宋磊,范忠义,肖卉,等. 飞秒激光辅助 LASIK 手术治疗中高度散光效果矢量分析研究 [J]. 人民军医, 2020, 63(9): 904-905, 915. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9736.2020.09.023.
- [26] 陈敬旺,凌玲,柯慧敏,等. 不同切削中心 SMILE 术后光学区偏心及视觉质量的比较 [J]. 国际眼科杂志, 2021, 21(7): 1170-1174. DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2021.7.07.
- [27] Lee H, Yong Kang DS, Reinstein DZ, et al. Comparing corneal higher-order aberrations in corneal wavefront-guided transepithelial photorefractive keratectomy versus small-incision lenticule extraction [J]. J Cataract Refract Surg, 2018, 44(6): 725-733. DOI: 10.1016/j.jcrs.2018.03.028.
- [28] Rios LC, Silva PGD, Canamary Junior AM, et al. Centration in refractive surgery [J]. Arq Bras Oftalmol, 2020, 83(1): 76-81. DOI: 10.5935/0004-2749.20200014.
- [29] Wang Q, Stoakes IM, Moshirfar M, et al. Assessment of pupil size and angle kappa in refractive surgery: A population-based epidemiological study in predominantly American caucasians [J]. Cureus, 2023, 15(8): e43998. DOI: 10.7759/cureus.43998.
- [30] 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 [J]. BMC Ophthalmol, 2019, 19(1): 151. DOI: 10.1186/s12886-019-1153-7.
- [31] Liang C, Yan H. Methods of corneal vertex centration and evaluation of effective optical zone in small incision lenticule extraction [J]. Ophthalmic Res, 2023, 66(1): 717-726. DOI: 10.1159/000529922.
- [32] Zhang J, Wang Y, Chen X, et al. Clinical outcomes of corneal refractive surgery comparing centration on the corneal vertex with the pupil center: a meta-analysis [J]. Int Ophthalmol, 2020, 40(12): 3555-3563. DOI: 10.1007/s10792-020-01506-1.
- [33] 赵景华,贾寓洁,林淑华,等. 近视患者优势眼与非优势眼的 Kappa 角、瞳孔大小及中心位置的动态变化 [J]. 眼科新进展, 2022, 42(2): 142-144. DOI: 10.13389/j.cnki.rao.2022.0029.
- [34] Vereerbrugghen A, Galletti JG. Corneal nerves and their role in dry eye pathophysiology [J]. Exp Eye Res, 2022, 222: 109191. DOI: 10.1016/j.exer.2022.109191.
- [35] Lasagni Vitar RM, Rama P, Ferrari G. The two-faced effects of nerves and neuropeptides in corneal diseases [J]. Prog Retin Eye Res, 2022, 86: 100974. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2021.100974.
- [36] Makinen P, Nattinen J, Aapola U, et al. Comparison of early changes in tear film protein profiles after small incision lenticule extraction (SMILE) and femtosecond LASIK (FS-LASIK) surgery [J]. Clin Proteomics, 2024, 21(1): 11. DOI: 10.1186/s12014-024-09460-1.
- [37] Zhang C, Ding H, He M, et al. Comparison of early changes in ocular surface and inflammatory mediators between femtosecond lenticule extraction and small-incision lenticule extraction [J]. PLoS One, 2016, 11(3): e0149503. DOI: 10.1371/journal.pone.0149503.
- [38] Nair S, Kaur M, Sharma N, et al. Refractive surgery and dry eye-An update [J]. Indian J Ophthalmol, 2023, 71(4): 1105-1114. DOI: 10.4103/IJO.IJO_3406_22.
- [39] Wong AHY, Cheung RKY, Kua WN, et al. Dry eyes after SMILE [J]. Asia Pac J Ophthalmol (Phila), 2019, 8(5): 397-405. DOI: 10.1097/01.APO.0000580136.80338.d0.
- [40] Li Y, Li S, Zhou J, et al. Relationship between lipid layer thickness, incomplete blinking rate and tear film instability in patients with different myopia degrees after small-incision lenticule extraction [J]. PLoS One, 2020, 15 (3): e0230119. DOI: 10.1371/journal.pone.0230119.
- [41] Koh S. Irregular astigmatism and higher-order aberrations in eyes with Dry eye disease [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2018, 59(14): DES36-DES40. DOI: 10.1167/iov.17-23500.
- [42] Asif MI, Bafna RK, Mehta JS, et al. Complications of small incision lenticule extraction [J]. Indian J Ophthalmol, 2020, 68(12): 2711-2722. DOI: 10.4103/ijo.IJO_3258_20.
- [43] Swaminathan U, Daigavane S. Comparative analysis of visual outcomes and complications in intraocular collamer lens, small-incision lenticule extraction, and laser-assisted in situ keratomileusis surgeries: A comprehensive review [J]. Cureus, 2024, 16(4): e58718. DOI: 10.7759/cureus.58718.

(收稿日期: 2025-09-04)