

SMILE 术后角膜生物力学变化对角膜稳定性与视觉质量的影响及干预策略

燕朱轩^{1,2,3}, 王晗睿¹, 吕 洋^{2,3}, 曹 芳², 燕振国^{1,3}

引用:燕朱轩,王晗睿,吕洋,等. SMILE 术后角膜生物力学变化对角膜稳定性与视觉质量的影响及干预策略. 国际眼科杂志, 2025,25(7):1111-1115.

基金项目:甘肃省青年科技基金计划项目(No.22JR11RA001); 甘肃省自然科学基金项目(No.23JRRA537, 24JRRA003)

作者单位:¹(730000)中国甘肃省兰州市,兰州华夏眼科医院;
²(730000)中国甘肃省兰州市,中国人民解放军联勤保障部队第九四〇医院眼科;
³(730000)中国甘肃省兰州市,甘肃省中医药大学第一临床医学院

作者简介:燕朱轩,男,硕士,住院医师,研究方向:眼表疾病、眼视光学、屈光手术。

通讯作者:燕振国,男,硕士,主任医师,教授,硕士研究生导师,研究方向:眼表疾病、眼视光学、屈光手术. 13309487333@163.com

收稿日期:2024-10-30 修回日期:2025-05-19

摘要

随着屈光手术技术的快速发展,飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(SMILE)因其在保留角膜前弹力层和上皮层完整性方面具有优势,逐渐成为主流术式。然而,术后角膜基质组织的削减和应力分布的改变仍可能导致角膜生物力学性能下降,对术后角膜的稳定性与视觉质量产生不利影响。文章立足于角膜生物力学特性变化的机制,综合分析近年来关于 SMILE 术后角膜厚度减少、机械强度降低及应力重构的研究。探讨术后角膜扩张风险、高阶像差(HOAs)增加和视觉质量波动的潜在机制,并分析其个体差异,同时归纳当前研究中的争议问题及对临床决策的影响。此外,文章结合角膜交联(CXL)等术后干预策略的最新研究进展,分析这些干预措施在增强角膜生物力学性能、降低术后并发症发生率及改善视觉质量方面的临床应用前景与局限性。最后,对 CXL 的最佳应用时机、生物力学评估指标的临床阈值以及个体化术前评估与术后干预方案的未来发展方向进行了展望,以期为提高 SMILE 术后安全性与视觉质量提供理论依据和临床参考。

关键词:飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(SMILE); 角膜生物力学; 角膜稳定性; 视觉质量

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2025.7.13

Impact of corneal biomechanical changes on corneal stability and visual quality after small incision lenticule extraction and intervention strategies

Yan Zhuxuan^{1,2,3}, Wang Hanrui¹, Lyu Yang^{2,3}, Cao Fang², Yan Zhenguo^{1,3}

Foundation items: Gansu Youth Science and Technology Fund

Project (No.22JR11RA001); Gansu Natural Science Foundation Project (No.23JRRA537, 24JRRA003)

¹Lanzhou Huaxia Eye Hospital, Lanzhou 730000, Gansu Province, China; ²Department of Ophthalmology, the 940th Hospital of Joint Service Support Forces of the Chinese People's Liberation Army, Lanzhou 730000, Gansu Province, China; ³First School of Clinical Medical, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, Gansu Province, China

Correspondence to: Yan Zhenguo. Lanzhou Huaxia Eye Hospital, Lanzhou 730000, Gansu Province, China; First School of Clinical Medical, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, Gansu Province, China. 13309487333@163.com

Received:2024-10-30 Accepted:2025-05-19

Abstract

• With the rapid advancement of refractive surgery, small incision lenticule extraction (SMILE) has become a mainstream procedure due to its biomechanical advantage in preserving the integrity of the anterior elastic layer and epithelium. However, postoperative stromal tissue removal and stress redistribution may still compromise corneal biomechanical stability, potentially affecting long-term corneal stability and visual quality. This review focuses on the mechanisms underlying biomechanical changes after SMILE, summarizing recent findings on corneal thinning, reduced mechanical strength, and stress remodeling, and their impact on corneal morphology and visual quality. It further explores potential contributors to postoperative ectasia, increased higher-order aberrations (HOAs), and visual fluctuations, highlighting individual variability and current controversies in the literature. Moreover, current evidence on adjunctive strategies such as corneal cross-linking (CXL) in enhancing biomechanical strength, reducing complications, and improving optical quality was analyzed. Finally, optimal timing for CXL, threshold values of biomechanical metrics, and the role of individualized preoperative assessment and postoperative management was discussed, aiming to provide a theoretical and clinical basis for improving safety and visual outcomes following SMILE.

• **KEYWORDS:** small incision lenticule extraction (SMILE); corneal biomechanics; corneal stability; visual quality

Citation: Yan ZX, Wang HR, Lyu Y, et al. Impact of corneal biomechanical changes on corneal stability and visual quality after small incision lenticule extraction and intervention strategies. Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci), 2025,25(7):1111-1115.

0 引言

角膜的生物力学特性在维持角膜形态稳定性和视觉功能中发挥着重要作用。飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 作为一种微创的角膜屈光手术,因其对角膜组织破坏较小且能保留角膜前弹力层和上皮层的完整性,在临床中得到了广泛应用^[1]。与其他角膜屈光手术相比,SMILE 在角膜生物力学影响方面具有独特之处。本综述将总结角膜的生物力学特性,分析屈光手术对角膜生物力学性能的影响,重点讨论 SMILE 手术对角膜稳定性、应力分布和胶原纤维结构的影响,并探讨这些变化对术后视觉质量的作用。

1 角膜生物力学特性与屈光手术

1.1 角膜生物力学特性概述 角膜的生物力学特性由其复杂的解剖结构和组织成分共同决定。角膜由上皮层、前弹力层、基质层、后弹力层和内皮层构成,其中基质层占角膜厚度的 90% 以上,主要由规则排列的 I 型胶原纤维和基质物质组成^[2]。胶原纤维的排列方式和交联程度决定了角膜的弹性模量。基质的组成和水合状态则影响其黏弹性。这些因素共同决定了角膜的关键生物力学参数。弹性模量反映角膜抵抗变形的能力,显著受到胶原纤维结构和交联程度的影响^[2-3];黏弹性使角膜在受到外力时既能储存部分能量又能耗散部分能量,可通过角膜滞后 (corneal hysteresis, CH) 这一指标加以衡量^[4-5]。另一方面,角膜阻力因子 (corneal resistance factor, CRF) 体现角膜整体的机械强度,与角膜厚度和组织结构密切相关。应力-应变指数 (stress-strain index, SSI) 则更加精确地评估了角膜的刚性,反映角膜在不同压力条件下的力学响应^[6]。正是这些生物力学特性使角膜能够在眼内压波动及外界机械应力作用下维持形态稳定和透明,确保光线准确聚焦于视网膜,从而维持高质量的视觉功能。弹性模量、CH、CRF 和 SSI 等参数保持在正常水平对于维持角膜的曲率和形态稳定性至关重要^[7-8]。任何使上述参数发生改变的因素都会影响角膜形态和光学性能,进而损害视觉质量。因此,深入理解角膜的生物力学特性对于优化屈光手术方案,以及提升术后疗效及预防相关并发症具有重要意义。

1.2 屈光手术对角膜生物力学的影响 屈光手术通过改变角膜形态来矫正屈光不正,但同时会影响角膜的生物力学特性,不同手术方式对生物力学的影响程度和机制各不相同。准分子激光原位角膜磨镶术 (laser-assisted in situ keratomileusis, LASIK) 通过制瓣暴露基质层进行激光切削,切断前部 I 型胶原纤维,显著降低中央角膜的机械强度,导致弹性模量和 CH 下降,术后角膜扩张和屈光回退的风险增加^[9-10]。表面切削手术 (photorefractive keratectomy, PRK) 直接去除角膜上皮层并消融前弹力层及前基质层,虽然避免了角膜瓣的制作,但仍削弱角膜生物力学性能,导致中央角膜厚度 (central corneal thickness, CCT) 减薄和弹性模量降低。由于角膜前部结构的损失,生物力学恢复较慢,并可能在短期内引起视觉质量波动。相比之下,SMILE 在角膜基质层内切削出微小透镜并经角膜微切口取出,保留了角膜前弹力层和上皮层的完整性,尽可能减少了对前部 I 型胶原纤维的破坏^[11]。研究表明,SMILE 术后角膜的弹性模量和 CH 值仅发生轻微改

变,生物力学性能得以接近术前水平^[12-13]。尽管 SMILE 对角膜结构的破坏较少,术后角膜厚度的减少和应力分布的改变仍可能影响角膜稳定性。有研究发现 SMILE 术后角膜机械强度略有下降,尤其在高度近视患者中,角膜生物力学性能可能发生显著改变,从而增加角膜扩张和屈光回退的风险^[14]。此外,一些研究指出 SMILE 术后在长期随访中角膜形态总体稳定,但存在个体差异;其中角膜偏薄或术后早期应力分布不均的患者角膜稳定性更容易受到影响^[8,15]。综上所述,屈光手术通过削减角膜基质层厚度并破坏部分胶原纤维结构,改变了角膜的应力分布和整体机械性能。这种生物力学性能的下降是术后角膜形态不稳定、屈光回退和角膜扩张等并发症发生的主要原因,最终将影响视觉质量。因此,在选择手术方式时需要权衡矫正效果与对角膜生物力学的影响,个性化制定手术方案,以最大程度保护角膜的结构和功能。

2 SMILE 手术对角膜稳定性和视觉质量的影响

2.1 SMILE 手术机制与角膜生物力学变化 SMILE 手术对角膜生物力学的影响主要体现在以下几个方面:(1) 由于不制作角膜瓣,角膜前弹力层和上皮层能够被完整保留,有助于维持角膜的机械强度和形态稳定性,降低术后角膜扩张的风险。研究表明 SMILE 术后角膜的弹性模量和 CH 等生物力学参数变化很小,生物力学性能得以接近术前水平^[12]。(2) SMILE 术后角膜应力分布更加均匀:手术主要移除中央基质透镜,周边基质基本未受影响。有研究分析显示 SMILE 术后角膜的最大主应力值低于其他屈光手术,有助于维持角膜形态和屈光稳定,减少应力引起的形变风险^[16-17]。(3) 由于切削过程主要在基质层内进行,较大程度上保留了角膜前部 I 型胶原纤维的完整性,这对于维持角膜的机械强度和弹性至关重要。事实上,SMILE 术后角膜的形变幅度 (deformation amplitude, DA) 仅有轻微增加,表明术后角膜的生物力学稳定性更佳^[17]。总之,SMILE 手术通过削减角膜基质层厚度、优化角膜应力分布并保持胶原纤维结构的完整性,在术后有效维持了角膜的机械性能和形态稳定性,降低了相关并发症发生率,确保了较高的视觉质量。因此,充分理解角膜生物力学特性的变化规律对于优化 SMILE 手术方案、提升术后疗效及预防并发症具有重要意义。

2.2 角膜生物力学变化对角膜稳定性的影响 在 SMILE 矫正近视的过程中,移除基质透镜会造成一定程度的中央角膜变薄。尽管 CCT 减少削弱了部分角膜机械强度,但由于角膜前弹力层和上皮层完整性得到保留,术后整体生物力学性能仍能部分维持。实测显示 SMILE 术后中央区域弹性模量仅有轻微下降,角膜抵抗眼内压 (intraocular pressure, IOP) 变化的能力略减,在术后早期对角膜稳定性影响有限,临床上角膜扩张的发生风险很低^[18-20]。同时,SMILE 手术导致角膜应力分布发生重排:中央区域承受的应力略降,而周边部分结构完好。这种应力分布改变并未引起角膜形态的明显失稳,术后角膜后表面高度 (posterior corneal elevation, PCE) 无显著抬高。多项短期 (6 mo-1 a) 和长期随访研究支持了角膜形态的稳定性:多数患者在术后多年角膜地形图参数保持平稳,未出现进行性后表面凸起或明显屈光回退^[15,21]。例如,针对高度近视患者的 5 a 随访观察中 (共 80 眼,平均等效球镜

-7.5 D),术后 6 mo 角膜后表面仅出现轻微上升,至 5 a 时恢复接近术前水平,且无 1 例发生角膜扩张^[14]。尽管 SMILE 手术对基质层部分胶原纤维结构造成一定影响,但由于角膜前部 I 型胶原纤维的完整性得到保留,术后角膜生物力学性能可以较快恢复。研究显示,术后 CH 和 CRF 虽略有下降,但变化幅度通常在可接受范围内,并未显著削弱角膜的黏弹性和抵抗形变能力。因此,认识并监测上述生物力学变化有助于优化手术方案、提高术后疗效,并有效预防相关并发症。

2.3 角膜生物力学变化对视觉质量的影响 SMILE 术后角膜生物力学特性的改变不仅影响角膜稳定性,也对视觉质量产生深远影响。角膜的力学特性与其光学性能密切相关,当弹性模量下降、CH 减低时,角膜在 IOP 波动下更易发生微小形变,引起角膜曲率细微变化。这种变化可导致屈光度的轻度波动甚至远期屈光回退,可能在术后数月内表现为视力稳定性的下降^[22]。与此同时,角膜形态的细微改变往往伴随高阶像差 (higher-order aberrations, HOAs) 的增加。由于 SMILE 移除角膜中央基质、应力分布重新平衡,术后角膜前后表面可能出现轻度不规则,这可诱发球面像差和彗差等 HOAs 上升。在弱光或夜间环境下,HOAs 的累积效应会更加明显,成为影响视觉质量的主要因素^[23]。客观光学检测显示,SMILE 术后部分患者的调制传递函数面积 (modulation transfer function area, MTFa) 较术前略有降低,而客观散射指数 (objective scattering index, OSI) 轻度上升,提示成像质量稍有下降、眼内散射增加^[24]。相应地,临床上不少患者反映夜间眩光、光晕感增强,对比敏感函数 (contrast sensitivity function, CSF) 降低,这与像差增加及角膜生物力学轻度削弱密切相关^[25-26]。值得注意的是,当前文献对 SMILE 术后视觉质量的评价存在一定分歧:有研究发现 SMILE 与其他屈光手术 (如经上皮 PRK 或飞秒 LASIK) 在术后 3 mo 的客观视觉质量参数上整体相当^[24];而另一些研究则指出,针对老视合并近视患者,应用 Q 值引导的个性化 LASIK 可能在术后获得更佳的光学质量^[25]。这提示我们 SMILE 术后视觉效果虽总体良好,但提升夜间视觉质量、降低 HOAs 仍是临床需要关注的问题。

此外,角膜生物力学的改变还可能通过影响眼表泪膜稳定性来间接降低视觉质量。SMILE 术后虽对角膜神经损伤相对较小,但部分患者仍出现一过性的干眼症状,这受到神经切断、机械刺激以及角膜形态改变等多重因素影响。有研究报道 SMILE 术后 1 wk 泪膜破裂时间 (break-up time, BUT) 和泪河高度 (tear meniscus height, TMH) 较术前显著下降,提示早期泪膜功能减弱^[27]。这种泪膜的不稳定将导致角膜表面光学质量波动,加重视觉质量的短期波动。需要指出的是,大多数患者的泪膜指标会在术后数周至 1 mo 内逐步恢复接近术前水平,主观干眼症状相应缓解。尽管如此,干眼的发生不仅影响患者舒适度,也会加剧视力波动。因此,SMILE 术后角膜生物力学变化是通过屈光度稳定性、HOAs 以及泪膜功能等多因素共同作用,最终影响患者术后整体视觉质量。为保证术后患者的视觉满意度,临床工作中应强调术前充分评估角膜生物力学参数和视觉质量基础,筛查潜在高风险因素;术后密切监测视功能变化,及时针对干眼、像差增多等问题采取人

工泪液、视光学矫正等干预措施,以维持和提升患者的视觉质量。

3 提高 SMILE 术后角膜稳定性和视觉质量的策略

3.1 角膜交联技术 角膜交联技术 (corneal cross-linking, CXL) 是利用紫外线联合光敏剂 (如核黄素) 来增强角膜基质胶原纤维交联密度的一种方法。该技术最初用于治疗圆锥角膜,通过加固角膜结构来阻止病情进展。近年来,CXL 也开始应用于屈光手术术后,尤其 SMILE 术后,用以提升角膜的生物力学稳定性,预防术后可能出现的角膜扩张等并发症,并改善患者的视觉质量^[28]。在 SMILE 术后应用 CXL,主要通过以下机制改善角膜的生物力学特性:(1) CXL 通过促进胶原纤维的交联,显著提高了角膜的弹性模量和 CH,增强了角膜的机械强度^[29]。这有助于抵抗 IOP 的波动,减少角膜扩张和屈光回退的风险。(2) CXL 优化了角膜的应力分布,维持角膜曲率的稳定性,防止术后形态的进一步改变,从而提升视觉质量^[30]。研究表明,结合 CXL 的 SMILE 术后患者在生物力学参数和视觉质量指标方面表现更为优越。例如,Mo 等^[31] 研究发现 SMILE 术后结合 CXL 的患者,其 CH 和 CRF 下降幅度较单纯 SMILE 术后更小。此外,Hyun 等^[32] 指出结合 CXL 的 SMILE 术后 HOAs 的增加幅度较低,MTFa 和 OSI 等视觉质量指标也得到了有效改善。综上所述,CXL 作为一种有效的角膜生物力学强化手段,在提高 SMILE 术后角膜稳定性和视觉质量方面具有重要作用。通过增强角膜机械强度和优化应力分布,CXL 不仅可以预防术后潜在的角膜扩张等并发症,还能显著提升患者的视觉质量和整体满意度。因此,SMILE 手术联合 CXL 为屈光不正患者提供了一种更安全、高效地矫正选择,尤其适用于那些生物力学风险较高的病例。

3.2 个性化手术设计与术后干预 在 SMILE 手术中实行个性化手术设计至关重要。根据患者各自的角膜生物力学特性、屈光需求和角膜厚度情况制定手术方案,有助于提升术后角膜稳定性。术前通过详细的角膜生物力学评估 (包括中央 CCT、CH、CRF 等参数) 了解角膜弹性及抗形变能力,以此确定合理的切削深度和透镜厚度,确保足够的残余基质床厚度,降低术后角膜扩张和屈光回退风险^[15]。对于术后常见的干眼,可应用人工泪液、热敷按摩睑板腺及抗炎药物来维持泪膜稳定,提升患者视觉舒适度。与此同时,还应定期评估患者的 HOAs 和 CSF,并通过光学手段调整和个性化视觉矫正方案来优化视觉质量,减少眩光和光晕等不适症状。患者教育也是术后管理的重要组成部分,指导患者遵循术后护理规范 (如避免揉眼、按时使用医嘱眼药水等) 有助于加速角膜愈合,降低并发症发生率。通过个体化的手术设计和系统的术后干预,可有效提升 SMILE 术后角膜的稳定性和视觉质量。这不仅确保了手术方案的精准和安全,也通过持续的术后管理预防了潜在并发症,优化了患者的视觉体验和整体满意度。因此,充分了解角膜生物力学特性,并在临床实践中应用个性化手术设计与干预策略,对提高 SMILE 手术疗效和患者生活质量具有重要意义。

4 小结

尽管 SMILE 手术保留了角膜前弹力层和上皮层的完整性,相较传统屈光手术在生物力学方面具有一定优势,

但角膜基质厚度的减少和胶原纤维结构的改变仍可能削弱角膜生物力学特性,尤其在术后早期角膜稳定性面临较大挑战。研究表明,SMILE术后角膜厚度的降低和应力分布的变化在高度近视患者中尤为明显,这可能对角膜的长期稳定性产生不利影响。因此,术前需详细评估包括角膜厚度、弹性模量等在内的关键生物力学参数,并结合患者的个体差异制定合理的手术策略和预防措施,以确保术后角膜的稳定性^[33]。通过全面的生物力学评估和针对性方案,可降低术后相关并发症的发生率。角膜生物力学参数的变化不但削弱角膜的机械稳定性,而且会直接影响术后视觉质量。当弹性模量和CH下降时,角膜抵抗形变的能力减弱,可能引起屈光度波动并伴随HOAs增加。角膜形态的不规则则可诱发球面像差和彗差等光学缺陷,导致眩光、光晕及对比敏感度下降等主观视觉不适。由此可见,优化SMILE手术方案、尽量减少术后HOAs并确保视觉质量稳定性仍是提高远期疗效的关键。未来的研究需要探讨通过改进技术进一步提高术后视觉质量的方法,尤其是在复杂病例中这将是值得深入探索的方向。

提高SMILE手术安全性和有效性的关键在于将个体化手术设计与术后干预相结合。通过精细的术前生物力学分析,综合考虑患者角膜厚度、弹性模量等参数以及个体化屈光需求,在保障屈光矫正效果的同时最大限度保护角膜的生物力学特性,降低术后并发症风险。尤其对于高度近视或其他生物力学风险较高的患者,将CXL技术纳入手术方案可能是提升术后安全性和视觉质量的关键措施。当然,尽管CXL可以增强角膜稳定性,但其效果和安全性仍因角膜个体差异而异。未来需开展更多临床研究以验证CXL在不同人群中的应用效果和长期收益。

此外,未来研究应更加关注术后角膜生物力学变化与长期视觉效果之间的关联。随着手术技术的进步,如何通过实时监控和分析术后角膜生物力学参数的变化,及时发现并干预潜在问题,已成为提升手术效果和患者长期满意度的关键。通过深入开展此类研究,SMILE手术方案有望得到进一步优化,为患者提供更安全、有效的治疗选择。

利益冲突声明:本文不存在任何利益冲突。
作者贡献声明:燕朱轩论文选题与设计,初稿撰写与修改;王晗睿、吕洋、曹芳文献检索、筛选与管理;燕振国选题指导,论文修改与终审。所有作者阅读并同意最终文本。

参考文献

[1] Huang G, Melki S. Small incision lenticule extraction (SMILE): myths and realities. *Semin Ophthalmol*, 2021,36(4):140-148.
[2] Shu NQ, He YX, Zhang Y. Research progress on measurement methods and clinical applications of corneal elastic modulus. *Exp Eye Res*, 2024,245:109974.
[3] McKay TB, Hutcheon AEK, Guo XQ, et al. Modeling the Cornea in 3-dimensions: current and future perspectives. *Exp Eye Res*, 2020, 197:108127.
[4] Ávila FJ, del Barco Ó, Marcellán MC, et al. A comprehensive study on elasticity and viscosity in biomechanics and optical properties of the living human cornea. *Photonics*, 2024,11(6):524.
[5] Marinescu M, Dascalescu D, Constantin M, et al. Corneal biomechanics – an emerging ocular property with a significant impact. *Maedica (Bucur)*, 2022,17(4):925-930.
[6] Zhang HX, Eliasy A, Lopes B, et al. Stress-strain index map: a

new way to represent corneal material stiffness. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021,9:640434.
[7] Chen LF, Huang YY, Zhang XY, et al. Corneal biomechanical properties demonstrate anisotropy and correlate with axial length in myopic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2023,64(10):27.
[8] Pniakowska Z, Jurowski P, Wierzbowska J. Clinical evaluation of corneal biomechanics following laser refractive surgery in myopic eyes; a review of the literature. *J Clin Med*, 2022,12(1):243.
[9] Humayun S, Bangash YW, Ishaq M, et al. Changes in corneal biomechanical properties after laser-assisted *in situ* keratomileusis and photorefractive keratectomy in myopia. *J Coll Physicians Surg Pak*, 2023,33(9):1023-1027.
[10] Lanza M, de Rosa L, Sbordon S, et al. Analysis of corneal distortion after myopic PRK. *J Clin Med*, 2020,10(1):82.
[11] Chen SB, Ma HJ, Zhao CL. Corneal biomechanics after small incision lenticule extraction and femtosecond laser *in situ* keratomileusis: a systematic review and meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*, 2023, 102(32):e34580.
[12] Sedaghat MR, Momeni-Moghaddam H, Yekta AA, et al. Early elastic and viscoelastic corneal biomechanical changes after photorefractive keratectomy and small incision lenticule extraction. *Int Ophthalmol*, 2024,44(1):302.
[13] Guo H, Hosseini - Moghaddam SM, Hodge W. Corneal biomechanical properties after SMILE versus FLEX, LASIK, LASEK, or PRK: a systematic review and meta-analysis. *BMC Ophthalmol*, 2019, 19(1):167.
[14] Zhao Y, Lin X, Chen ZY, et al. Five-year stability of posterior corneal surface after small incision lenticule extraction for high myopia. *BMC Ophthalmol*, 2022,22(1):239.
[15] Cao HZ, Zhang L, Liang S, et al. Predictive factors of posterior corneal shift after small incision lenticule extraction: a 5-year follow-up study. *Acta Ophthalmol*, 2022,100(7):e1431-e1438.
[16] Fang LH, Jin TZ, Cao Y, et al. Biomechanical responses of different cap thicknesses of corneas after small incision lenticule extraction: finite element analysis. *Transl Vis Sci Technol*, 2023,12(4):5.
[17] Qu ZX, Li XM, Yuan YY, et al. *In vivo* corneal biomechanical response to three different laser corneal refractive surgeries. *J Refract Surg*, 2024,40(5):e344-e352.
[18] Cheng XY, Zhao Y, Fu D, et al. Posterior corneal stability after small incision lenticule extraction with different optical zones. *Eye (Lond)*, 2024,38(16):3087-3092.
[19] Moshirfar M, Tukan AN, Bundogji N, et al. Ectasia after corneal refractive surgery: a systematic review. *Ophthalmol Ther*, 2021,10(4): 753-776.
[20] Song Y, Liu T, Wang X, et al. Biomechanical effects of small incision lenticule extraction (SMILE) surgery on corneal stress distribution and mechanical strength. *J Cataract Refract Surg*, 2021,47 (5):602-610.
[21] Zhao Y, Fu D, Chen ZY, et al. Three-year follow-up of posterior corneal elevation in thin corneas after small incision lenticule extraction. *Front Med (Lausanne)*, 2022,9:758223.
[22] Lee CY, Jeng YT, Yang SF, et al. Topographic and surgical risk factors for early myopic regression between small incision lenticule extraction and laser *in situ* keratomileusis. *Diagnostics (Basel)*, 2024,14 (12):1275.
[23] Guo L, Cheng ZX, Kong XM, et al. The effect of different angle kappa on higher - order aberrations after small incision lenticule extraction. *Lasers Med Sci*, 2023,38(1):277.
[24] Lin M, Zhou HT, Hu ZL, et al. Comparison of small incision lenticule extraction and transepithelial photorefractive keratectomy in

terms of visual quality in myopia patients. *Acta Ophthalmol*, 2021,99(8):e1289–e1296.

[25] Zhang RY, Yuan YF, Zhang Y, et al. Comparison of visual quality after Q value-guided FS-LASIK and SMILE for correction of myopia with age – related accommodation deficiency. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2025,263(2):571–580.

[26] Yue PQ, Wang Z, Wu D, et al. The effect of small incision lenticule extraction on contrast sensitivity. *Front Neurosci*, 2023, 17:1132681.

[27] Cui G, Wang TJ, Di Y, et al. Changes of dry eye parameters after small incision lenticule extraction surgery in patients with different ocular surface disease index scores. *Sci Rep*, 2024,14(1):863.

[28] Brar S, Sriganesh S, Sute SS, et al. Comparison of long – term outcomes and refractive stability following SMILE versus SMILE combined with accelerated cross – linking (SMILE XTRA). *J Ophthalmol*, 2022, 2022:4319785.

[29] Brar S, Gautam M, Sute SS, et al. Refractive surgery with simultaneous collagen cross – linking for borderline corneas – A review of different techniques, their protocols and clinical outcomes. *Indian J Ophthalmol*, 2020,68(12):2744–2756.

[30] Sánchez-González JM, Rocha-de-Lossada C, Borroni D, et al. Prophylactic corneal crosslinking in myopic small – incision lenticule extraction – Long – term visual and refractive outcomes. *Indian J Ophthalmol*, 2022,70(1):73–78.

[31] Mo F, Di Y, Li Y. Changes in corneal morphology and biomechanics in cases of small incision lenticule extraction with prophylactic accelerated collagen cross – linking. *J Ophthalmol*, 2022, 2022:1640249.

[32] Hyun S, Lee S, Kim JH. Visual outcomes after SMILE, LASEK, and LASEK combined with corneal collagen cross – linking for high myopic correction. *Cornea*, 2017,36(4):399–405.

[33] Yü F, Strang N, Bernabeu MO, et al. Corneal biomechanics are not exclusively compromised in high myopia. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2024,44(5):977–986.