

# 角膜屈光手术中眼压波动对眼后段结构及功能的影响

苏日也·艾合买提,易湘龙,李瑶,张莉言,焦丽

引用:苏日也·艾合买提,易湘龙,李瑶,等.角膜屈光手术中眼压波动对眼后段结构及功能的影响.国际眼科杂志,2024,24(12):1927-1931.

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金重点项目(No.2022D01D68)

作者单位:(830000)中国新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市,新疆医科大学第一附属医院眼科

作者简介:苏日也·艾合买提,女,在读硕士研究生,研究方向:屈光不正、白内障。

通讯作者:易湘龙,男,博士,博士研究生导师,主任医师,研究方向:屈光不正、白内障、角膜病. yixianglong1010@163.com

收稿日期:2024-04-01 修回日期:2024-10-22

## 摘要

角膜屈光手术作为矫正屈光不正的常用方法,已在全球范围内广泛开展,其安全性、有效性和可预测性得到了大量临床和实验研究的验证。有研究表明手术过程中眼压可能会出现不同程度的波动,而术中一过性眼压波动因手术方式、设备、技术及患者个体差异等因素可能会对眼后段结构和功能造成影响。尽管在大多数患者术后的短期随访中并未发现视功能障碍,但术中一过性高眼压是否存在对眼后段结构和功能的长期影响和潜在风险仍不明确。因此,在临床实践中,对角膜屈光术后眼后段并发症的评估至关重要。文章将探讨角膜屈光手术中眼压波动的特点以及对玻璃体、视网膜、视神经等眼后段结构和功能的影响,分析可能的原因及危险因素,探讨其对于当前临床治疗的影响和未来发展趋势,以期为临床实践提供参考。

关键词:角膜屈光手术;眼压;眼后段;机制

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2024.12.12

## Effect of intraocular pressure fluctuations on the structure and function of posterior segment in corneal refractive surgery

Suriye Aihemaiti, Yi Xianglong, Li Yao, Zhang Liyan, Jiao Li

Foundation item: Key Project of Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No.2022D01D68)

Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Correspondence to: Yi Xianglong, Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. yixianglong1010@163.com

Received:2024-04-01 Accepted:2024-10-22

## Abstract

• Corneal refractive surgery, a widely adopted method for correcting refractive errors, has demonstrated its safety, efficacy, and predictability in extensive research. Studies indicate varying degrees of intraoperative fluctuations in intraocular pressure, potentially impacting the posterior segment structures and functions due to surgical techniques, equipment, technical proficiency, and patient-specific factors. Although short-term postoperative follow-up in most patients does not reveal visual dysfunction, the long-term effects and potential risks of transient high intraocular pressure during surgery on the posterior segment structures and functions remain unclear. Therefore, the assessment of posterior segment complications following corneal refractive surgery is of paramount importance in clinical practice. This review aims to explore the characteristics of intraocular pressure fluctuations during corneal refractive surgery and their effects on structures and functions of the vitreous, retina, and optic nerve in the posterior segment, analyze possible causes and risk factors, discuss their implications for current clinical treatment, and consider future trends, providing insights for clinical practice.

• KEYWORDS: corneal refractive surgery; intraocular pressure; posterior segment; mechanisms

Citation: Suriye A, Yi XL, Li Y, et al. Effect of intraocular pressure fluctuations on the structure and function of posterior segment in corneal refractive surgery. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2024,24(12):1927-1931.

## 0 引言

近视的全球流行,尤其在东亚地区已成为一个重要的公共卫生问题<sup>[1]</sup>。未矫正的近视可能发展为高度近视,增加严重并发症如黄斑病变、青光眼和视网膜脱离的风险,可能导致不可逆视力损失<sup>[2]</sup>。

对于近视的治疗,临床上仍是以对症治疗为主如框架眼镜、隐形眼镜、角膜塑形镜等。然而,自十九世纪末 Lendeer Jans Lans 提出通过改变角膜形态纠正屈光不正的概念以来,角膜屈光手术实现了突破性发展<sup>[2-3]</sup>。现代角膜屈光手术通过调整角膜曲率改善视力,减少对眼镜的依赖,提高患者的生活质量。

尽管角膜屈光手术在临床上取得了成功,但其长期影响的研究仍在进行中。目前的研究主要集中在角膜生物力学特性及眼前节结构变化上,而对于眼后段的影响,尚未有充分的系统性研究和明确的结论<sup>[4-5]</sup>。尽管角膜屈光手术后出现眼后段并发症如玻璃体后脱离、视网膜裂孔、视网膜脱离和视神经病变的案例不多,但已有个别病例报道,其机制尚未明确,可能与术中眼压升高和全眼生物力学改变有关<sup>[6-7]</sup>。本研究旨在通过回顾和分析角膜

屈光手术后眼后段变化的相关文献,以期对角膜屈光手术后眼后段的变化获得更深入和全面的理解。

### 1 角膜屈光手术中眼压波动的特点及影响因素

**1.1 角膜屈光手术中眼压波动的特点** 在当前的在体人眼角膜屈光手术过程中,尚未普及实时眼压监测系统。然而,许多研究者已在离体人眼、猪眼和活体兔眼上进行角膜屈光手术对术中眼压变化进行了实时观察,发现手术过程中眼压呈现不规则波动并高于基础眼压<sup>[8]</sup>。在角膜屈光手术中无论是传统的机械刀切割还是飞秒激光技术切割,均需用负压吸引来吸附固定眼球进行角膜切割,因此负压吸引的使用很大程度上导致了角膜屈光手术中眼压的波动<sup>[9]</sup>。Bradley等<sup>[6]</sup>在对离体人眼进行板层角膜切割(lamellar microkeratotomy, LMK)时通过视神经插管监测角膜瓣制作过程中眼内压(intraocular pressure, IOP)的变化,发现在负压吸引固定眼球阶段, IOP显著升高,峰值超过了150 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa, 1 cm H<sub>2</sub>O=0.098 kPa)。Cheng等<sup>[8]</sup>研究团队利用光纤压力传感器(optic fiber pressure sensor, OFPS)对兔眼进行飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(small incision lenticule extraction, SMILE)过程中的玻璃体腔内眼内压进行了实时监测,发现在手术过程中,实时 IOP显著升高,尤其是在负压吸引开始阶段,峰值可达86.55±22.36 mmHg。Lauzirika等<sup>[10]</sup>在离体猪眼模型中进行术中前房眼内压检测,该研究观察到在进行机械角膜刀制瓣的准分子激光原位角膜磨镶术(laser *in situ* keratomileusis, LASIK)手术过程中, IOP均出现了升高,在负压吸引阶段和切割阶段较基线平均增加32.33±11.3 mmHg和38.22±11.3 mmHg。尽管动物模型和离体人眼为研究角膜屈光手术中眼压变化提供了重要信息,但它们与在体人眼在生理反应和生物活性上存在差异,这可能影响对人眼术中眼压波动的精确评估。此外,不同研究中所采用的眼压测量技术,也可能导致测量结果存在差异。但广泛的研究共识表明角膜屈光手术会引起一定程度的眼压暂时性增高。

**1.2 角膜屈光手术中眼压波动的影响因素** 在角膜屈光手术过程中,还有一些因素会影响眼压的水平,比如手术类型、角膜切割工具、负压吸引时间、激光设备特性、及患者界面适配性等。

**1.2.1 手术类型和角膜切割工具及负压吸引时间** 不同类型的角膜屈光手术,术中所使用的角膜切割工具及负压吸引时间对 IOP 的影响有所差异。以 SMILE 和飞秒激光辅助准分子激光原位角膜磨镶术(femtosecond laser-assisted laser *in situ* keratomileusis, FS-LASIK)为例,两种手术术中均需使用飞秒激光,研究表明两种手术方式术中眼压升高幅度并无差异,但 SMILE 手术在制作角膜帽及切削基质透镜的整个过程中需要持续的负压吸引,这一步骤的时间通常长于 FS-LASIK 手术中单纯制作角膜瓣所需的时间,因此 SMILE 手术中眼睛要处于更长时间的眼压升高状态<sup>[11]</sup>。Bradley等<sup>[6]</sup>比较 Carriazo-Barraquer、Innovatome 和 Hansatome 不同微型角膜刀在 LMK 中对 IOP 的影响,结果表明,所有微角膜刀在负压吸引固定眼球阶段时均引起 IOP 显著上升, Carriazo-Barraquer 组 IOP 平均可达 150 mmHg。与此同时也有研究比较了 LASIK 手术使用不同方式制作角膜瓣时眼内压的变化发现使用飞秒激光制作的角膜瓣期间的 IOP 波动显著低于微角膜刀,然而飞秒激光需要的时间是微角膜刀的两倍<sup>[12]</sup>。这表明不同手术

方式、同种手术方式采用不同角膜切割工具及术中负压吸引时间均会对眼压波动的影响存在差异。

**1.2.2 激光设备特性** 特别是患者适配界面设计,适配界面的设计要素如形状、尺寸和材料等决定了与患者眼球的密封性和手术过程的舒适度。不良的界面适配可能加剧患者的紧张或不适,引发眼球运动,这可能导致负压吸引不均匀或失效,进而引起 IOP 的急剧波动。在 Strohmaier等<sup>[9]</sup>研究中,比较了四种不同接触面设计的飞秒激光平台如 IntraLase、VisuMAX、Femto LDV 和 SmartTech Laser,通过离体人眼模型对 LASIK 术中负压吸引阶段对 IOP 的潜在影响进行了分析。发现 IntraLase 在负压吸引时 IOP 最高(328.3±29.8 mmHg),而 VisuMAX 呈现出了最小的 IOP 波动(88.9±8.2 mmHg),这种改变考虑可能与 IntraLase 平面负压环的设计,而 VisuMAX 采用弧形角膜压平模式有关。有研究分析了 iFS 150 kHz、Victus、LenSx 三种飞秒激光平台在 LASIK 角膜瓣制作中的负压时间和 IOP 变化。结果显示,具有平面负压环设计的 iFS 150 kHz 平台术中平均 IOP 增加显著高于 Victus 平台和 LenSx 平台,而具有弯曲界面和水凝胶患者接口的 LenSx 平台手术时间短且 IOP 增幅较小<sup>[13-14]</sup>。

## 2 一过性眼压升高对眼内组织的影响

**2.1 对眼血流动力学的影响** 眼灌注压(ocular perfusion pressure, OPP)是指眼内血液供应的压力,它是眼动脉血压与眼内压之间的差值<sup>[15]</sup>。OPP 是眼球血液供应的决定性因素,视网膜和脉络膜的血流状况直接受到其影响。研究发现眼底血流的稳定性不仅依赖于 OPP,还与眼压的变化有关<sup>[16]</sup>。在其他条件不变的情况下,眼底血供与眼压之间存在非线性的负相关关系,在一定范围内,眼压的适度波动并不影响眼底血流的稳定性,但如果眼压波动超出了这个范围,眼底血流可能会失去代偿能力。

既往多项眼部血流评估技术的研究结果表明,高度近视患者视网膜血流呈减少趋势<sup>[17-18]</sup>。高度近视眼的眼轴增长和玻璃体腔的延长导致眼球受到更大的机械牵拉力,这种机械牵拉力的增加,导致视网膜和脉络膜变薄,导致血管变直、变窄,这种血管结构的改变,最终导致视网膜血流供应的减少<sup>[19]</sup>。而血管管径的变化与眼内压敏感性改变也直接相关,因此在近视人群中眼内压波动是影响眼部血液循环和视网膜血流动力学的关键<sup>[20-21]</sup>。轻度至中度眼内压升高时,视网膜血流通过自身调节保持稳定,但在眼内压显著上升时,OPP 下降,眼内机械压力增加,可能导致眼底血流量减少,进而引起视网膜和脉络膜缺血缺氧,诱发缺血-再灌注损伤,促进视网膜神经节细胞凋亡,损害视神经和视网膜<sup>[22]</sup>。

当前,关于角膜屈光手术对眼血流动力学影响的研究主要依赖于光学相干断层扫描血管成像(optic coherence tomography angiography, OCTA)技术,但目前已有的结论仍存在分歧。Yalçınkaya等<sup>[23]</sup>提出,在 FS-LASIK 和 SMILE 术后,黄斑区微血管密度和视盘血流可能暂时性增加。然而,Wang等<sup>[24]</sup>则认为血流参数呈现下降趋势。此外,杨彩玲等<sup>[25]</sup>研究则发现,在 FS-LASIK 和前弹力层下激光角膜磨镶术(sub-Bowman's keratomileusis, SBK)术后,深层视网膜血流密度术前与术后并无显著差异。关于不同近视程度的患者,李玉等<sup>[26]</sup>研究显示,高度近视患者在进行 SMILE 及 FS-LASIK 术后,视网膜浅层血流并没有显著变化。而 Chen等<sup>[27]</sup>和吴娇阳<sup>[28]</sup>则报道,SMILE 治疗高度近

术后,浅层视网膜血管密度会显著下降,但这种下降会随着时间的推移逐渐恢复。

目前基于现有研究,对于角膜屈光手术后眼部血流动力学变化有两种主要解释:(1)手术过程中眼压的急剧升高和波动,广泛被认为是导致视网膜及视神经血管缺血再灌注损伤的关键因素<sup>[29-30]</sup>,这种损伤不仅影响眼部组织的正常代谢,还可能显著减少眼部血流量。(2)角膜屈光手术后,角膜基质的散射和水肿可能改变角膜的折射率,从而影响图像信号的强度,导致测量的视网膜血流密度降低,属于测量误差。对于术后血流暂时增加的现象,推测这可能与视网膜微循环的自身负反馈调节机制密切相关。屈光手术可能暂时性地干扰黄斑区视网膜和视乳头的正常血液供应,导致局部缺血。在缺氧的刺激下,视网膜会启动内在的调节机制,如增加血管分布,以改善局部血供,适应这种血流动力学上的变化<sup>[31]</sup>。总体而言,研究显示角膜屈光手术后眼部血流动力学的变化通常在术后1 wk-1 mo内逐渐恢复到术前水平。尽管这些暂时性的血流变化存在,但尚无法证明其会显著影响术后视力的恢复。

**2.2 对玻璃体形态的影响** 角膜屈光手术后可能发生玻璃体后脱离 (posterior vitreous detachment, PVD),这是由于玻璃体液化及与视网膜内界膜黏连力减弱导致的分离。因此任何降低玻璃体黏连力或促进液化的因素都可能诱发或加剧 PVD。

目前的研究认为,在角膜屈光手术过程中,眼内压的急剧升高以及随之发生的生物力学变化可能影响玻璃体视网膜结构。Mirashi 等<sup>[32]</sup>通过 A 超测量发现 LASIK 术后晶状体厚度减少、晶状体后囊到视网膜的距离增加,而眼轴长度稳定。进一步地,Flaxel 等<sup>[33]</sup>指出负压吸引下,眼轴平均延长了 1.125 mm,而前房深度变化不大。樊郑军等<sup>[34]</sup>通过离体猪眼研究发现,LASIK 手术的负压吸引前后,眼轴和玻璃体腔前后径长度变化,且玻璃体向前轻度动。上述研究表明,角膜屈光术中负压可能扰动玻璃体腔结构,增加后部玻璃体脱离风险,并加剧近视眼中玻璃体视网膜病变的进展。基于当前的研究推测角膜屈光手术后玻璃体形态变化的影响因素主要包括以下几个方面:(1)负压吸引导致眼球几何形态的改变:在进行 FS-LASIK 和 SMILE 等角膜屈光手术时,负压吸引环的使用可能会在玻璃体基底部形成一个巩膜嵴并引发机械牵拉,使眼球沿前后轴伸长、赤道部直径缩短。眼球作为一个封闭系统,其前节结构在牵拉作用下前移,晶状体变薄,对玻璃体尤其在高度黏连区域如玻璃体基底和黄斑区产生向前的牵拉。负压解除后,眼球赤道部扩张,前后径缩短,可能反向震荡后极部视网膜,加速玻璃体后脱离或对基底部施加牵拉<sup>[35]</sup>。(2)激光对眼部结构的机械冲击:在 LASIK 手术中,准分子激光切削角膜产生振动波,其振幅与激光能量和光束大小相关<sup>[36]</sup>。Krueger 等<sup>[37]</sup>研究显示,猪角膜在大约 80 个标准大气压下的最大应力波振幅约在 4.0-6.0 mm 深处,人眼中最大振幅约 100 个大气压,位于后晶状体或前玻璃体区域,而视网膜处振幅降至 10 个大气压,不足以引起病变。然而,Arevalo 等<sup>[38]</sup>指出即使是 10 个大气压的声冲击波也可能对眼内组织,特别是玻璃体施加压力,可能引起 Bruch 膜破裂。此外 Vilaplana 等<sup>[39]</sup>报告了准分子激光屈光性角膜切削术 (photorefractive keratectomy, PRK) 术后的视网膜撕裂和脱离,表明激光冲击可能对眼后段有潜在影响。

**2.3 对视网膜功能的影响** 视网膜功能的评价主要涵盖视力、视野以及视觉电生理三个关键方面。其中视觉电生理测试通过测量生物电活动客观反映视网膜功能<sup>[40]</sup>。研究发现,高眼压可导致视网膜电图 (electroretinogram, ERG) 变化,然而这些变化在 OCT 视网膜神经纤维层 (retina nerve fiber layer, RNFL) 或视网膜神经节细胞 (retinal ganglion cells, RGCs) 结构分析中不明显<sup>[41]</sup>,视觉电生理检查如模式视网膜电图 (pattern electroretinogram, PERG)、明视负波反应 (photopic negative response, PhNR)、多焦视网膜电图 (multifocal electroretinogram, mfERG)、多焦视觉诱发电位 (multifocal visual evoke potential, mfVEP) 能早期发现 RGCs 功能变化,已被用于在青光眼领域检查早期高眼压所致的视网膜功能改变。在角膜屈光手术中,由于眼内压力的急剧上升,RGCs 的功能也有可能受到影响。

Bui 等<sup>[42]</sup>和 Zheng 等<sup>[43]</sup>通过大鼠模型证实了急性眼压升高可能损害视网膜功能,研究观察到,视网膜的正向阈值反应 (pSTR)、负向阈值反应 (nSTR) 和振荡电位 (OP) 对 IOP 升高极为敏感,并且 IOP 峰值决定视网膜功能损失和恢复速度。Luna 等<sup>[7]</sup>对猪眼进行 LASIK 手术时发现在负压吸引时猪眼瞬时眼压超 55 mmHg,ERG b 波振幅显著降低,但在负压移除后 30 min 恢复。Lauzirika 等<sup>[44]</sup>用 pERG 评估 FS-LASIK 对 RGCs 的影响,发现术后 16 h 低对比度刺激的幅度值仅有轻微暂时性下降,在 1 mo 内可恢复正常。研究表明,视网膜功能异常可能源于视神经在穿越筛板过程中的机械性压迫。当眼压升高时,筛板可能发生变形,对通过的视神经轴突产生挤压效应,进而引发视乳头组织的微观损伤。这种损伤可能阻碍视神经轴浆的正常流动,扰乱细胞内外的物质运输机制,最终导致视网膜和视神经的光学信号接收及传导功能受损<sup>[45-47]</sup>。在角膜屈光手术中,瞬态高眼压可能对视网膜功能产生暂时性影响,但这通常是可逆的,并且在短期内能够自行恢复,不会造成长期或病理性损害。

**2.4 对视神经的影响** Mitchell 等<sup>[48]</sup>研究表明近视与青光眼之间存在显著的相关性,近视者患青光眼的可能性是无近视者的 2-3 倍,尤其是超过 -3.00 D 的近视。眼压的测量对于青光眼的诊断和监测至关重要,但角膜屈光手术后角膜变化可能影响眼压测量的准确性。已有研究报告指出,FS-LASIK 和 SMILE 术后眼压测量值降低<sup>[49]</sup>。这一发现对于眼压作为传统青光眼筛查的重要参数提出了质疑。为了提高青光眼早期诊断的准确性,RNFL 和黄斑区神经节细胞复合体 (Ganglion cell complex, GCC) 的评估起到重要指导作用。这些指标能够作为青光眼发生进展的早期标志,并且显示出良好的鉴别性能。

国内外众多学者利用偏振激光扫描仪 (scanning laser polarimetry, SLP) 及 OCT 等仪器研究角膜屈光手术对 RNFL 厚度的影响,然而,术后早期 RNFL 厚度变化的结果仍不一致。有研究用 OCT 观察角膜屈光术后 RNFL 的变化,如 Chen 等<sup>[50]</sup>观察到在 LASIK 术后早期,RNFL 厚度相较于术前水平有所上升,而另一些研究,如马艳丽<sup>[51]</sup>、Jiang 等<sup>[52]</sup>研究则指出,术后早期 RNFL 厚度会出现下降,随后逐步恢复至术前水平,也有研究表明术后 RNFL 厚度无显著变化<sup>[53]</sup>。Holló 等<sup>[54]</sup>使用固定角度角膜 SLP 测得 LASIK 后 RNFL 厚度减少,这一发现引发了一些学者的思考,他们认为 SLP 测量可能受到手术前后角膜曲率和厚

度变化的影响,这些变化可能导致角膜球面像差的改变,从而干扰测量过程。因此 Halkiadakis 等<sup>[55]</sup>及 Dada 等<sup>[56]</sup>研究者采用了可变角膜补偿的 SLP 技术,发现术后 1 mo RNFL 厚度无显著变化。

对于角膜屈光术后 RNFL 的变化,认为可能有以下几点假设:(1)近视患者通常伴有眼轴延长,这可能导致巩膜厚度尤其是在筛板区域变薄。筛板处胶原纤维的伸展性增大和稳定性减弱,可能破坏其对神经纤维的分隔、缓冲以及保护作用。手术过程中,负压的使用可能影响视神经轴突轴浆流的正常运输,特别是在筛板处受阻时,可能导致视神经节细胞的营养不良、缺血和缺氧,进而引发轴突萎缩和 RNFL 变薄<sup>[51]</sup>。(2)近视眼眼球壁的扩张可能改变视网膜微循环,导致视网膜血供不足。这种血供不足状态使视网膜神经节细胞更容易受损。手术时,负压吸引导致眼压瞬间升高,可能引发视神经和视网膜的短暂时缺血;吸引停止后,眼压骤降可能引起缺血再灌注损伤,表现为术后早期视网膜神经纤维层的水肿增厚<sup>[57]</sup>。(3)不同型号的测量仪器在精度、扫描深度、分辨率和算法等方面可能存在差异,这些差异可能导致测量误差,进而影响对术后 RNFL 变化和血流动力学的准确评估。

Zhao 等<sup>[53]</sup>通过 OCT 分析了 SMILE 术前、术后 3 mo 的视网膜结构的变化,结果显示 RNFL 和黄斑区 GCC 厚度与术前相比无显著变化。另一项由 Özüken 等<sup>[58]</sup>进行的研究探讨了 FS-LASIK 手术后早期黄斑区 GCC 厚度、RNFL 厚度的变化,发现并无显著变化,这与 Zivkovic 等<sup>[59]</sup>、Hosny 等<sup>[60]</sup>发现相一致。而 Ozsaygili 等<sup>[61]</sup>通过 OCT 观察 FS-LASIK 和 PRK 手术对单层视网膜厚度的影响,发现接受 FS-LASIK 手术后 1 d 内核层(inner nuclear layer, INL)厚度显著增加,但黄斑区 GCC 厚度未见显著变化。他们推测,这种变化可能源于手术过程中吸引阶段引起的眼压急剧升高,导致暂时性的视网膜中央动脉阻塞,从而损害视网膜微循环。这种损害可能引起 INL 层内细胞肿胀,但局部水肿并未扩散至视网膜的其他层次,因此黄斑区的 GCC 厚度未受到显著影响。

### 3 小结

综上所述,角膜屈光手术中眼压的波动可能引起眼后段的改变,尽管大部分研究中发现这些变化在术后能够逐渐恢复,但这一过程的具体生物学机制仍需进一步的临床和动物实验研究加以明确。对于近视患者,尤其是高度近视人群,由于眼部结构的特殊性,更容易发生眼底退行性病变,这增加了术后眼后段并发症的风险,并可能对视力恢复构成潜在威胁。为了尽可能避免角膜屈光手术中一过性高眼压的不良影响,可采取以下措施:(1)进行详尽的术前眼部评估,特别是散瞳后的眼底检查,以便及时发现并评估任何潜在的眼底问题。(2)提高手术技巧,在手术过程中尽可能缩短操作时间,以减少高眼压状态的持续时间。(3)加强术前患者教育,确保患者充分理解手术过程,减少因紧张情绪导致的术中配合问题。目前,角膜屈光手术对眼后段结构的影响因素复杂,尚未完全明确仍需更全面的研究。对于术后眼后段结构恢复后的长期视功能影响研究较少,同时术中实时眼压的测量技术尚未实现。因此,未来的研究需要在临床深度和长期性上进行拓展,同时在技术层面寻求创新,以精确测量和分析眼压波动,明确其对视功能的长期影响。最大限度地减少手术可能带来的眼后段潜在风险,保障患者的视力健康。

### 参考文献

- [1] Holden BA, Fricke TR, Wilson DA, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050. *Ophthalmology*, 2016,123(5):1036-1042.
- [2] Morgan IG, Ohno-Matsui K, Saw SM. Myopia. *Lancet*, 2012, 379(9827):1739-1748.
- [3] Wang M. History of refractive surgery. In: LASIKVision Correction. Provo, UT:Med World Publishing,2000[ March 5, 2024]. <http://www.drmingwang.com/book/chap-03.html>.
- [4] 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.
- [5] Zhao J, Li Y, Yu TY, et al. Anterior segment inflammation and its association with dry eye parameters following myopic SMILE and FS-LASIK. *Ann Med*, 2023,55(1):689-695.
- [6] Bradley JC, McCartney DL, Craenen GA. Continuous intraocular pressure recordings during lamellar microkeratotomy of enucleated human eyes. *J Cataract Refract Surg*, 2007,33(5):869-872.
- [7] Luna JD, Artal MN, Reviglio VE, et al. Vitreoretinal alterations following laser *in situ* keratomileusis: clinical and experimental studies. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2001,239(6):416-423.
- [8] Cheng WB, Liu LJ, Yu SS, et al. Real-time intraocular pressure measurements in the vitreous chamber of rabbit eyes during small incision lenticule extraction (SMILE). *Curr Eye Res*, 2018, 43(10):1260-1266.
- [9] Strohmaier C, Runge C, Seyeddain O, et al. Profiles of intraocular pressure in human donor eyes during femtosecond laser procedures—a comparative study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2013,54(1):522-528.
- [10] Lauzirika G, Garcia-Gonzalez M, Bolivar G, et al. Measurement of the intraocular pressure elevation during laser-assisted *in situ* keratomileusis flap creation using a femtosecond laser platform. *Transl Vis Sci Technol*, 2021,10(3):9.
- [11] Ang M, Chaurasia SS, Angunawela RI, et al. Femtosecond lenticule extraction (FLEX): clinical results, interface evaluation, and intraocular pressure variation. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2012,53(3):1414-1421.
- [12] Chaurasia SS, Luengo Gimeno F, Tan K, et al. *In vivo* real-time intraocular pressure variations during LASIK flap creation. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2010,51(9):4641-4645.
- [13] Roberts TV, Lawless M, Sutton G, et al. Update and clinical utility of the LenSx femtosecond laser in cataract surgery. *Clin Ophthalmol*, 2016,10:2021-2029.
- [14] Bolivar G, Garcia-Gonzalez M, Laucirika G, et al. Intraocular pressure rises during laser *in situ* keratomileusis: comparison of 3 femtosecond laser platforms. *J Cataract Refract Surg*, 2019, 45(8):1172-1176.
- [15] Moss SE, Klein R, Klein BE. Ocular factors in the incidence and progression of diabetic retinopathy. *Ophthalmology*, 1994, 101(1):77-83.
- [16] Hayreh SS. Neovascular glaucoma. *Prog Retin Eye Res*, 2007,26(5):470-485.
- [17] Su L, Ji YS, Tong NT, et al. Quantitative assessment of the retinal microvasculature and choriocapillaris in myopic patients using swept-source optical coherence tomography angiography. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2020,258(6):1173-1180.
- [18] Liu MM, Wang P, Hu XJ, et al. Myopia-related stepwise and quadrant retinal microvascular alteration and its correlation with axial length. *Eye*, 2021,35(8):2196-2205.
- [19] Tan CS, Hariprasad SM, Lim LW, et al. Evaluation of the retinal and choroidal vasculature with OCT angiography versus conventional angiography. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*, 2016, 47(12):1081-1085.
- [20] Alshareef RA, Khuthaila MK, Januwada M, et al. Choroidal

vascular analysis in myopic eyes: evidence of foveal medium vessel layer thinning. *Int J Retina Vitreous*, 2017,3;28.

[21] Guidoboni G, Harris A, Cassani S, et al. Intraocular pressure, blood pressure, and retinal blood flow autoregulation: a mathematical model to clarify their relationship and clinical relevance. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2014,55(7):4105-4118.

[22] 刘晓静, 李杰, 吴峥峰. 应用 SS-OCTA 分析白内障术中不同眼内压对黄斑区血流的影响. *国际眼科杂志*, 2022,22(4):554-559.

[23] Yalçınkaya G, Yıldız BK, Çakır İ, et al. Evaluation of peripapillary - macular microvasculature and choroidal vasculature index after refractive surgery. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2022,37:102714.

[24] Wang P, Hu XJ, Zhu CC, et al. Transient alteration of retinal microvasculature after refractive surgery. *Ophthalmic Res*, 2021,64(1):128-138.

[25] 杨彩玲, 贺鹏媛. 飞秒激光制瓣准分子激光原位角膜磨镶术治疗高度近视疗效及对患者眼底微结构的影响. *陕西医学杂志*, 2021,50(10):1253-1256.

[26] 李玉, 杨文利, 张丰菊. OCTA 观察高度近视眼行 SMILE 与 FS-LASIK 后浅层视网膜血流密度的变化. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2019,21(6):401-407.

[27] Chen MJ, Dai JH, Gong L. Changes in retinal vasculature and thickness after small incision lenticule extraction with optical coherence tomography angiography. *J Ophthalmol*, 2019,2019:3693140.

[28] 吴骄阳. 应用 OCTA 观察近视眼行 SMILE 和 ICL 植入术后视网膜厚度及浅层视网膜血流密度的变化. *四川大学*, 2021.

[29] Nucci C, Tartaglione R, Rombolà L, et al. Neurochemical evidence to implicate elevated glutamate in the mechanisms of high intraocular pressure (IOP) - induced retinal ganglion cell death in rat. *Neurotoxicology*, 2005,26(5):935-941.

[30] Cho KJ, Kim JH, Park HY, et al. Glial cell response and iNOS expression in the optic nerve head and retina of the rat following acute high IOP ischemia-reperfusion. *Brain Res*, 2011,1403:67-77.

[31] Puchner S, Schmidl D, Ginner L, et al. Changes in retinal blood flow in response to an experimental increase in IOP in healthy participants as assessed with Doppler optical coherence tomography. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2020,61(2):33.

[32] Mirshahi A, Kohnen T. Effect of microkeratome suction during LASIK on ocular structures. *Ophthalmology*, 2005,112(4):645-649.

[33] Flaxel CJ, Choi YH, Sheety M, et al. Proposed mechanism for retinal tears after LASIK: an experimental model. *Ophthalmology*, 2004,111(1):24-27.

[34] 樊郑军, 朱月珍, 杨明迪, 等. 准分子激光原位角膜磨镶术中负压吸引对玻璃体腔的扰动. *中华眼科杂志*, 2001,37(4):266.

[35] Arevalo JF, Ramirez E, Suarez E, et al. Rhegmatogenous retinal detachment in myopic eyes after laser *in situ* keratomileusis. Frequency, characteristics, and mechanism. *J Cataract Refract Surg*, 2001,27(5):674-680.

[36] Gavrilov JC, Gaujoux T, Sellam M, et al. Occurrence of posterior vitreous detachment after femtosecond laser *in situ* keratomileusis: ultrasound evaluation. *J Cataract Refract Surg*, 2011,37(7):1300-1304.

[37] Krueger RR, Seiler T, Gruchman T, et al. Stress wave amplitudes during laser surgery of the Cornea. *Ophthalmology*, 2001,108(6):1070-1074.

[38] Arevalo JF, Freeman WR, Gomez L. Retina and vitreous pathology after laser - assisted *in situ* keratomileusis: is there a cause - effect relationship? *Ophthalmology*, 2001,108(5):839-840.

[39] Vilaplana D, Guinot A Escoto R. Giant retinal tears after photorefractive keratectomy. *Retina*, 1999,19(4):342-343.

[40] 徐琼, 赵明威. 急性高眼压引起的视网膜功能改变及结构损伤研究进展. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2014,16(12):764-768.

[41] Turkey E, Elsanabary ZSE, Elshazly LHM, et al. Role of pattern electroretinogram in ocular hypertension and early glaucoma. *J Glaucoma*, 2019,28(10):871-877.

[42] Bui BV, Edmunds B, Cioffi GA, et al. The gradient of retinal

functional changes during acute intraocular pressure elevation. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2005,46(1):202-213.

[43] He Z, Bui BV, Vingrys AJ. The rate of functional recovery from acute IOP elevation. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2006,47(11):4872-4880.

[44] Lauzirika G, Arranz - Marquez E, Garcia - Gonzalez M, et al. Impact of femtosecond laser - assisted *in situ* keratomileusis on retinal ganglion cell function. *Eur J Ophthalmol*, 2022,32(3):1441-1447.

[45] 马丽萍, 刘浏, 郭学谦, 等. 急性高眼压作用下视神经轴浆运输与视网膜光学功能的关系. *中国医学物理学杂志*, 2017,34(10):1035-1040.

[46] Peng F, Ma LP, Liu L, et al. Preliminary study on the blockade of axonal transport by activated astrocytes in optic nerve head under chronic ocular hypertension. *J Mech Med Biol*, 2019,19(7):1940040.

[47] 张婷, 李龙, 宋凡. 青光眼发病机理——筛板变形研究进展. *力学学报*, 2019,51(5):1273-1284.

[48] Mitchell P, Hourihan F, Sandbach J, et al. The relationship between glaucoma and myopia: the blue mountains eye study. *Ophthalmology*, 1999,106(10):2010-2015.

[49] Chen SH, Lopes BT, Huang W, et al. Effectiveness of 4 tonometers in measuring IOP after femtosecond laser - assisted LASIK, SMILE, and transepithelial photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg*, 2020,46(7):967-974.

[50] Chen YW, Liao HP, Sun Y, et al. Short-term changes in the anterior segment and retina after small incision lenticule extraction. *BMC Ophthalmol*, 2020,20(1):397.

[51] 马艳丽. SMILE 术后视网膜神经纤维层厚度的变化. *郑州大学*, 2018.

[52] Jiang Y, Wang ZH, Li Y, et al. Retinal nerve fibre layer thickness change following femtosecond laser - assisted *in situ* keratomileusis. *Front Med*, 2021,8:778666.

[53] Zhao ZL, Michée S, Faure JF, et al. Effects of SMILE surgery on intraocular pressure, central corneal thickness, axial length, peripapillary retinal nerve fiber layer, and macular ganglion cell complex thickness. *J Ophthalmol*, 2020,2020:4934196.

[54] Holló G, Katsanos A, Kóthy P, et al. Influence of LASIK on scanning laser polarimetric measurement of the retinal nerve fibre layer with fixed angle and customised corneal polarisation compensation. *Br J Ophthalmol*, 2003,87(10):1241-1246.

[55] Halkiadakis I, Anglonto L, Ferensowicz M, et al. Assessment of nerve fiber layer thickness before and after laser *in situ* keratomileusis using scanning laser polarimetry with variable corneal compensation. *J Cataract Refract Surg*, 2005,31(5):1035-1041.

[56] Dada T, Chaudhary S, Muralidhar R, et al. Evaluation of retinal nerve fiber layer thickness measurement following laser *in situ* keratomileusis using scanning laser polarimetry. *Indian J Ophthalmol*, 2007,55(3):191-194.

[57] 门洁, 张晓辉, 黄丹, 等. LASIK 术后早期视网膜神经纤维层变化及相关因素的分析研究. *中国实用眼科杂志*, 2017,35(6):610-612,616.

[58] Özüilken K, İlhan Ç. Evaluation of retinal ganglion cell layer thickness in the early period after femtosecond LASIK surgery. *Turk J Ophthalmol*, 2020,50(4):211-215.

[59] Zivkovic M, Jaksic V, Giarmoukakis A, et al. The effect of LASIK procedure on peripapillary retinal nerve fiber layer and macular ganglion cell - inner plexiform layer thickness in myopic eyes. *Biomed Res Int*, 2017,2017:8923819.

[60] Hosny M, Zaki RM, Ahmed RA, et al. Changes in retinal nerve fiber layer thickness following mechanical microkeratome - assisted versus femtosecond laser - assisted LASIK. *Clin Ophthalmol*, 2013,7:1919-1922.

[61] Ozsaygili C, Altunel O, Duru N. Evaluation of the change in retinal thickness after femtosecond laser - assisted laser *in situ* keratomileusis and photorefractive keratectomy. *Curr Eye Res*, 2022,47(1):18-24.