

飞秒激光辅助的个性化准分子激光原位角膜磨镶术的临床应用进展

刘晓鹏,孙芳芳,王晓璇,雷玉琳

引用:刘晓鹏,孙芳芳,王晓璇,等. 飞秒激光辅助的个性化准分子激光原位角膜磨镶术的临床应用进展. 国际眼科杂志, 2025, 25(7):1116-1121.

作者单位:(250200)中国山东省济南市,济南明水眼科医院
作者简介:刘晓鹏,在读硕士研究生,研究方向:屈光。
通讯作者:雷玉琳,毕业于山东大学,博士,硕士研究生导师,主任医师,副院长,研究方向:屈光. leiyulin642@126.com
收稿日期:2024-11-26 修回日期:2025-05-21

摘要
随着屈光手术的不断发展和人们的关注点逐渐从视力提高转变为视觉质量的提高,个性化准分子激光原位角膜磨镶术(LASIK)手术逐渐成为人们的青睐选择,飞秒激光辅助制瓣为个性化LASIK手术提供了更好的优势。文章主要介绍近年来常用的个性化的飞秒激光辅助的准分子激光原位角膜磨镶术(FS-LASIK),如波前像差优化、波前像差引导、角膜地形图引导、Q值引导(非球面切削),个性化手术“全光塑”,以及包括在矫正伴有年龄相关性调节不足的患者时的个性化手术。文章重点分析了不同的个性化FS-LASIK的优缺点,以及近些年的研究进展,同时也重点对比了不同的个性化手术之间的差别。
关键词:飞秒激光辅助的准分子激光原位角膜磨镶术;波前像差优化;波前像差引导;角膜地形图引导;Q值引导;全光塑
DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2025.7.14

Clinical application progress of femtosecond laser - assisted in situ keratomileusis

Liu Xiaopeng, Sun Fangfang, Wang Xiaoxuan, Lei Yulin

Jinan Mingshui Eye Hospital, Jinan 250200, Shandong Province, China
Correspondence to:Lei Yulin. Jinan Mingshui Eye Hospital, Jinan 250200, Shandong Province, China. leiyulin642@126.com
Received:2024-11-26 Accepted:2025-05-21

Abstract

• With the continuous development of refractive surgery, people's focus has gradually shifted from improving vision to improving visual quality, and personalized laser-assisted *in situ* keratomileusis (LASIK) surgery has gradually become people's preferred choice.

Femtosecond laser - assisted keratoplasty provides better advantages for personalized LASIK surgery. This article mainly introduces the commonly used femtosecond laser-assisted personalized LASIK surgery (FS-LASIK) in recent years, such as wavefront-optimized, wavefront-guided, topography-guided, Q value-guided (aspheric cutting), personalized surgery “Wavelight Plus” and personalized surgery when correcting patients with age - related inadequate accommodation. This article focuses on analyzing the advantages and disadvantages of different personalized FS-LASIK, as well as the research progress in recent years, and also focuses on comparing the differences between different personalized surgeries.
• **KEYWORDS:** femtosecond laser - assisted *in situ* keratomileusis; wavefront-optimized; wavefront-guided; topography-guided; Q value-guided; Wavelight Plus

Citation: Liu XP, Sun FF, Wang XX, et al. Clinical application progress of femtosecond laser-assisted *in situ* keratomileusis. Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci), 2025,25(7):1116-1121.

0 引言

随着行角膜屈光手术人群量的增大,出现了各种各样的手术需求,手术效果的关注点不再仅仅局限于视力提高,并且在临床工作中会遇到部分患者术后裸眼视力达到甚至超过术前全矫视力但仍反映术后有夜间视力下降、眩光、光晕、星芒等视觉质量下降的症状。研究表明,术后视觉质量下降的主要原因与手术源性的高阶像差增加和术后角膜非球面性的改变有关^[1]。为了更高的术后视觉质量,“个性化”一词逐渐出现在大众视野,飞秒激光辅助制瓣更是为个性化提供了更好的优势^[2]。其手术过程主要分为两个步骤,首先利用飞秒激光制瓣,再利用准分子激光进行个性化切削,旨在矫正低阶像差的同时减少高阶像差的引入量或者通过调整术后角膜的非球面形态,来实现术后更好的视觉质量。

1 传统的 LASIK 手术

准分子激光原位角膜磨镶术(laser-assisted *in situ* keratomileusis, LASIK),自1990年推出以来,现已经成为主要的屈光手术方式之一^[3]。LASIK手术可以治疗一系列视力问题,包括近视、远视、散光,也可以结合单眼视原理治疗老视问题,其工作原理是利用微型机械刀或者飞秒激光在角膜上制作一个角膜瓣,掀起角膜瓣后用激光在角膜基质层进行消融来解决屈光不正问题^[4]。研究表明LASIK术后有着好的长期疗效和患者满意度^[5]。早期的LASIK手术是用微型机械刀制作角膜瓣的,存在一些角膜瓣相关的并发症,如不规则切口、重复性差、游离角膜瓣等,而飞秒激光的应用大大降低了因机械刀制瓣带来的并

发病,从而飞秒激光辅助制瓣逐渐替代微型机械刀制瓣^[6]。传统的 LASIK 手术主要用于矫正低阶像差(如近视、远视、散光),对于高阶像差的矫正存在局限性,术后视觉质量的下降主要与高阶像差的引入有关,为了解决这一问题,出现了多种个性化 LASIK 手术。

2 飞秒激光辅助制瓣的优势

飞秒激光为波长 1 053 nm 的红外激光,其脉冲时间极短,只有几个到几百个飞秒,具有短脉冲、高瞬时功率及高精度定位等特性,能够聚焦到微米级超细空间,在角膜组织一定深度进行光爆破,进而对角膜目的切面进行连续的微米级切削,取代传统机械刀来制作角膜瓣^[7]。这种利用飞秒激光制作角膜瓣的激光原位角膜磨镶术称为飞秒激光辅助的准分子激光原位角膜磨镶术(femtosecond laser-assisted *in situ* keratomileusis, FS-LASIK),同样飞秒激光制瓣也是个性化 FS-LASIK 的关键一步。

通过飞秒激光制作角膜瓣可以弥补传统机械刀面对高曲率角膜、薄角膜、不规则角膜等问题时的窘境。飞秒激光制作的角膜瓣具有更好的预测性、更高的质量、更好的均匀性^[8],并且可以根据患者的角膜形态进行个性化的处理,大大降低了手术的风险,提高了手术的安全性^[9]。研究表明,通过飞秒激光制作角膜瓣的 LASIK 术后干眼发生率和程度低于机械刀制瓣的 LASIK 手术,可以使患者获得良好的术后生活质量^[10]。李莹^[11]曾对机械刀制瓣(MK)和飞秒激光制瓣(FS)的 LASIK 术后主观感觉及客观指标泪液三项检查(泪液分泌试验、泪膜破裂时间、角膜荧光染色)和角膜地形图进行分析,结果显示术后 3 mo MK 和 FS 的主诉眼干涩的患者分别为 30%和 10%,泪液分泌三项和角膜地形图两者之间无明显差异。飞秒激光制作的角膜瓣相较于机械刀制作的角膜瓣具有更薄的优势,一项研究报道了飞秒激光制作的 90 μm 的角膜瓣和 110 μm 的角膜瓣辅助的 LASIK 术后均可以达到不错的治疗效果,但是 90 μm 的角膜瓣更能有效改善视力及散光程度,更快恢复视力,预后的视觉质量更好^[12]。有研究证实,飞秒激光辅助制作角膜瓣的 LASIK 手术在薄角膜中同样可以获得较高的安全性、稳定性,飞秒激光辅助的 LASIK 手术具有更广泛的手术适应证^[13]。Chan 等^[14]对飞秒激光小切口角膜基质透镜摘除术(small incision lenticule extraction, SMILE)和 FS-LASIK 的术后疗效进行分析,发现相较于 SMILE,FS-LASIK 在矫正散光方面更有优势,且术后 3 mo 的疗效更好。

飞秒激光制作的角膜瓣明显优于机械刀制作的角膜瓣,并且也可以大大提高患者的舒适度,实现患者的个性化定制,飞秒激光辅助制作角膜瓣使得 LASIK 手术变得更加安全,术后视觉质量更好。虽然 SMILE 手术有着小切口的优势,近些年备受患者的青睐,但是仍然无法完全取代 LASIK 手术在散光矫正等方面的优势,且 FS-LASIK 手术可以实现个性化的处理。

3 常规的个性化 FS-LASIK

3.1 波前像差相关的个性化 FS-LASIK

波前像差相关的 FS-LASIK 主要目的就是减少手术源性的高阶像差引入,以及减少术前本身就存在的高阶像差。目前波前像差相关的 FS-LASIK 手术主要有两种形式:波前像差优化的 FS-LASIK 手术(wavefront-optimized femtosecond LASIK, WFO FS-LASIK)和波前像差引导的 FS-LASIK 手术(wavefront-guided femtosecond LASIK, WFG FS-LASIK)。

3.1.1 WFO FS-LASIK

人眼的角膜是一个弯曲的非球面,当激光进行组织切削时,同样的激光斑落在中央角膜和周边角膜将产生不同的效应,落在周边的激光斑形状和能量均会产生变化,导致高阶像差(higher-order aberrations, HOA)的引入^[15]。WFO FS-LASIK 手术是根据角膜曲率的变化,在切削周边区域时进行额外的能量补偿,减少高阶像差的引入,而保留了原有的高阶像差,达到提高视觉质量的效果^[15]。可以进行波前像差优化的准分子激光设备需要配备波前像差分析仪(如 Alcon Wavelight EX500 等)。有研究发现 WFO FS-LASIK 术后患者的对比敏感度较术前有所提高^[16]。并且在远视及远视散光的治疗中展现出令人满意的结果^[17]。WFO FS-LASIK 治疗不同角膜曲率的患者时术后效果并无明显的区别,因此其对更广泛的角膜曲率范围均可以安全有效的进行^[18]。相对于 SMILE 手术,WFO FS-LASIK 有着更好的低对比度视力^[19]。赵晓彬等^[20]的研究发现,虽然 WFO FS-LASIK 较普通 LASIK 手术术后产生的总高阶像差及球差更少,但角膜前表面总高阶像差、球差、慧差仍比术前高。在其另一项研究^[21]中发现,在针对术前全眼高阶像差大于 0.3 的近视散光患者中,WFO FS-LASIK 和 WFG FS-LASIK 均可以达到不错的治疗效果,但是对于降低高阶像差的增幅波前优化相对更差。Moshirfar 等^[22]针对 WFO FS-LASIK 和 WFG FS-LASIK 术后的主观体验(包括眩光、光晕、星芒、视力模糊等)和眼部症状(包括光敏感性、干眼、异物感、眼疼等)进行研究,发现两者之间无明显差异,也无明显的眼睛偏好。另有研究者^[23]分析出 WFO FS-LASIK 和 WFG FS-LASIK 术后总高阶像差的引入并无明显差异,但是对于术后平均等效球镜改善程度 WFO 优于 WFG。并且 WFG 比 WFO 有着更大的消融深度和角膜非球面性的改变^[24],但是在一项研究^[25]中发现高分辨率的像差仪引导的 LASIK 手术相较于 WFO FS-LASIK 有着更多的优势。在与角膜地形图引导的个性化手术比较中,不少的报道均证明地形图引导的个性化手术更优,但在 MEL90 上进行的 3A 级 WFO FS-LASIK 手术其视觉效果和高阶像差分布可以与地形图引导的 FS-LASIK 相媲美,并且还有着更短的消融时间的优势^[15]。

WFO FS-LASIK 是一种减少手术源性高阶像差引入的个性化屈光手术,可以提高术后视觉质量。但是术后总高阶像差仍然是增加的,并且在与像差引导的 LASIK 手术的比较中,有研究报道称其术后高阶像差的引入更多,当然在这方面的研究结果目前并不统一,仍需更多的研究深入探讨。随着技术的进步,该方式在不同平台上也逐渐优化,为视觉质量的进一步提高做出贡献。

3.1.2 WFG FS-LASIK

WFG FS-LASIK 是通过波前像差仪捕获整个眼球的像差情况,然后将像差数据传输到准分子激光系统,引导激光器进行个性化消融的一种手术。所需要的设备需集成波前像差仪的高端准分子激光设备(如 Zeiss MEL 90、Alcon Wavelight EX500、VISX Star S4 IR+iDesign 2.0 或 AMARIS 1050RS 等)。消融轮廓需考虑并治疗原本存在的 HOA,并尽可能减少新的 HOA 的引入^[26]。WFG FS-LASIK 已被证实优于传统的 LASIK 手术^[27]。Zhang 等^[28]曾针对术前不同程度的 HOA 行 WFG FS-LASIK 术后的视觉质量效果,发现对于术前 HOA 大于 0.3 的患者术后诱导的 HOA 和慧差明显更小,视觉质量更好。与其他个性化屈光手术术后疗效进行对比时,该手术

方式既有优势也有缺点。与 WFO FS-LASIK 的比较前文已经讲述。在与角膜地形图引导的飞秒激光辅助的准分子激光原位角膜磨镶术 (topography-guided femtosecond LASIK, TG FS-LASIK) 比较中,有报道称术后两者均能引起 HOA 的增加,但是 WFG 组术后继发的散光更小^[29]。与 SMILE 比较中发现两者各有优缺点,SMILE 虽然确实有着小切口以及术后反应更轻的优势,但是对于术后的视觉质量的提高,后者有着明显的优势,例如 Wei 等^[30]对 SMILE 和 WFG FS-LASIK 的 Meta 分析中,发现后者有更低的手术误差角、更高的散光矫正指数和更少的慧差引入量。并且 WFG FS-LASIK 有术后视力恢复更快和更好的低对比度视力等优势^[19,31]。

WFG FS-LASIK 是一种是通过测量整个眼球的像差来引导的手术,但是全眼的像差受到很多因素的影响以及我们无法预测或控制手术和愈合的过程会带来新问题,而且人眼的总体像差是随着年龄不断变化的,综合而言种种问题使这项技术变得步履维艰。基于人们对眼球的进一步认识,人们发现大部分人全眼规则散光和不规则散光主要来源于角膜前表面,因此临床上很多医生更倾向于角膜地形图引导的个性化手术。但这并不能完全掩盖波前像差引导在某些方面的优势。

3.2 TG FS-LASIK TG FS-LASIK 是通过角膜地形图仪获取准确的角膜地形图数据,并提交到设计程序,结合显然验光的结果,得到个体化切削方案,再传输到准分子激光器,计算机指导激光按照个性化方案进行切削治疗,从而获得光滑平整的角膜表面,减少高阶像差,提高视觉质量的一种手术方式。进行该手术的设备需要有角膜地形图仪 (如 Pentacam 等) 配合的准分子激光设备 (如 SCHWIND AMARIS、Wavelight EX500 等)^[32]。最初该方式被称为是一种解决不规则角膜的修复术,但在后来发现其也可以为健康眼提供更好的视觉质量^[33]。该方式相较于其他方式有着许多优势,其通过结合角膜地形图数据可以解决角膜周边异常^[33],以及矫正角膜不规则散光和表面的不规则^[34]。此外,该方式通过地形图引导,对角膜曲率的测量不受瞳孔的限制,以角膜顶点为中心,尽可能减少了 Kappa 角的问题^[35]。并且该方式切削的角膜组织更少,可以扩大角膜屈光手术的适用范围^[36]。虽然角膜地形图引导可以获得更多的角膜信息,但是整个眼球的屈光状态包含很多方面,为了实现更好的视觉质量,屈光手术方案的设计近些年也在不断地完善,最新的一种方案是 PAE (phorocides analytical engine),该方案考虑了前后角膜散光、角膜地形不规则和眼内散光,根据这些数据形成最终的方案和建议^[37]。大量的研究均证明了该方式的术后疗效好^[34, 38],并且是优于基于显然验光或其他治疗方案的治疗效果^[34, 39]。已有研究证实 PAE 在治疗斜轴散光时的疗效是确切的^[34],但是在治疗高残余散光 (ORA: 角膜前散光和临床测量散光之间的差异) 患者时,残余散光显著增加,有过度矫正顺规散光的趋势^[40]。相较于其他屈光手术, TG FS-LASIK 既有优势也有不足。与 SMILE 手术相比, TG FS-LASIK 具有诱导的 HOA 更少,术后的视觉质量更好,且术后视力恢复更快,暗视力下更好的对比敏感度等优势^[41-42]。同时 TG FS-LASIK 有眼球旋转补偿和眼球追踪技术,确保了术后更好的视觉质量^[43]。与 WFO FS-LASIK 相比,有报道称在高度近视人群中, TG FS-LASIK 诱导的三叶草更少,且术后角膜混浊的发生率

更低,夜间清晰度更高,总质量评分高^[44];两者虽然均能获得较高的满意度,但是但有研究表明 TG FS-LASIK 术后裸眼视力 (uncorrected visual acuity, UDVA) 达到 20/20、20/15 的比例更多^[45]。与 WFG FS-LASIK 比较中,既有优点又有缺点,似乎 TG FS-LASIK 可以提供更好的视力矫正^[46],但是 WFG FS-LASIK 术后继发的散光更少^[29],患者主观感觉更好和视觉质量更好^[47]。

TG FS-LASIK 在临床应用中表现良好,与其他角膜屈光手术相比也可圈可点,且在矫正角膜异常的患者中有着显著的优势,针对目前的几种术前设计方案,不能绝对的说出哪种最好,但是 PAE 方案是目前相对临床效果更显著的一种。当然仍然需要更多的研究去比较证实,可能随着时间的推移会出现更标准化的方案。

3.3 Q 值引导的非球面个性化 LASIK Q 值是指人眼中的角膜非球面特性,过大或者过小均会影响视觉质量,角膜 Q 值在 -0.6 左右可达到视物最舒服的状态。而绝大多数手术因对角膜进行切削会改变角膜的非球面性,进而会产生夜间视力差、眩光等视觉干扰。角膜 Q 值引导的个性化手术是通过预先输入患者术前角膜地形图的个性化 Q 值,并引导准分子激光进行个性化切削,使得术后的角膜 Q 值仍然保持与术前基本一致的负值状态,以维持角膜的非球面性达到提高术后视觉质量的效果。所以 Q 值引导的个性化手术又称为非球面个性化手术。支持 Q 值引导的准分子激光设备主要有 Wavelight EX500^[48]。研究证实, Q 值引导的 LASIK 手术术后的视觉质量优于常规 LASIK 手术,尤其是在夜间视力和低对比度下视力^[49]。该方式主要通过减少术后球差的引入来提高术后的视觉质量^[50]。但是有研究发现该方式相比较 WFO FS-LASIK 和 WFG FS-LASIK 在减少术后球差和高阶像差的效果上较差^[51],但也有研究发现 Q 值引导的 LASIK 相较于 WFO FS-LASIK 和 TG FS-LASIK 具有更少的客观散射 (OSI),球差、Q 值,具有更佳的视觉质量^[52]。该方式与 SMILE 手术相比,术后引入的 HOA 更少^[53],且两者术后角膜生物力学变化无明显差异^[54]。近些年 Q 值引导的 LASIK 手术在矫正年龄相关性调节不足的屈光不正的群中展现出独特的优势。例如 Zhang 等^[55]对比了 SMILE 和 Q 值引导的 LASIK 矫正伴有年龄相关性调节不足的患者,后者保留了原有的角膜形态,具有更卓越的视觉质量。另有研究也同样表明, Q 值引导的 LASIK 在矫正伴有年龄相关性调节不足的患者时,可以在不损失远视力的影响下,获得满意的近视力和视觉质量^[56]。

Q 值引导的 LASIK 手术可以尽可能保持与术前相同的角膜非球面性,从而拥有更好的视觉质量,在矫正伴年龄相关性调节不足的患者时显示出更卓越的优势。当然在与其它屈光手术的比较中各有优劣,但是仍不能掩饰其在提高视觉质量上的作用。

4 全眼定制个性化 LASIK 手术——“全光塑”

“全光塑”是 2023 年进入我国近视治疗领域的新名词,是爱尔康公司推出的个性化屈光手术方案,通过 3D 眼球模型重构和光迹追踪 (Ray-Tracing) 技术,实现全眼制定的治疗,显著提升了屈光术后的精准性、安全性和视觉效果。全光塑技术采用了多维度、138 000 个信息点的数据采集,形成真实的 3D 全眼模型,这个模型不仅仅考虑角膜地形图或波前像差,还包括角膜厚度、前房深度、晶状体厚度和眼轴长度等信息,所有信息均由一个设备

(InnovEyes Sightmap) 进行采集, 通过智能迭代算法 (InnovEyes 算法), 多次迭代计算优化角膜切削形态, 根据每个患者的独特眼球模型进行个性化定制, 在 Wavelight EX500 准分子激光平台进行切削。Kanellopoulos^[57] 的两项研究中均取得了相当不错的疗效。在其初步研究的结果中显示术后 6 mo 68% 的患者术后视力增加 1 行, 38% 术后视力增加 2 行, 术后对比敏感度改善, 高阶像差平均值从 0.25 μm 变到 0.35 μm 。在其另一项为期 2 a 的研究中, 展示了客观和主观视觉功能均明显改善, 并且在高阶像差的矫正也有明显的改善^[58]。He 等^[59] 的研究中, “全光塑” 术后约有一半人的 UDVA 达到 $\geq 20/12.5$, 8% 达到 20/10 的 UDVA, 全眼 HOA 没有临床意义的增加。Yuan 等^[60] 的一项研究中对比了“全光塑”和 Q 值优化的 LASIK 手术的术后疗效, 结果显示虽然“全光塑”的角膜消融量更高一些, 但是术后的视力效果和高阶像差的引入量均有更出色的表现。Cao 等^[61] 对“全光塑”与角膜地形图引导的 LASIK 之间进行了对比研究, “全光塑”的视力效果和像差的表现均更优。

全光塑本质上是一种传统 FS-LASIK 的升级版, 仍是一种先利用飞秒激光制瓣, 然后利用准分子激光进行切削的手术, 与传统的 LASIK 或常规的个性化 LASIK 相比, 从数据采集上结合了全眼的光学系统不再仅仅局限于角膜, 并构建了独属于患者的 3D 眼数字模型, 真正实现了“全眼定制”; 从技术层面引入了光迹追踪和人工智能迭代技术, 使手术精准度更高; 从视觉效果方面, 使患者的视力更清晰, 视觉质量更好, 实现了从“矫正视力”到“优化视觉质量”的跨越。该技术目前已取得了非常可观的临床治疗效果, 但是对于术后长期的疗效观察仍有欠缺, 后期可以针对术后长期疗效以及患者的满意度方面做出相应的随访研究, 进一步探索该手术的术后疗效。

5 与老视相关的个性化 LASIK 手术

随着屈光手术的发展, 不少的中年人为了提高生活质量也选择行屈光手术来解决屈光不正。但是该部分人在解决屈光不正时需要考虑到调节力下降的问题。屈光医生为了避免该部分人群刚做完屈光手术后就需要配戴老花镜的问题, 在手术方式的选择上也做出了相应的个性化处理。单眼视原理、优化单眼视原理、角膜多焦点原理是矫正老视的主要原理^[62], 单眼视原理是在非主视眼上保留相应的度数用于视近, 主导眼全矫用于视远, 与常规的 LASIK、SMILE、PRK 等屈光手术结合即可达成。而优化单眼视和角膜多焦点原理则是对该部分人群进行的个性化处理。目前临床上在矫正老视方面主要用到的是 PresbyLASIK 技术, 主要有中央型 PresbyLASIK、周围型 PresbyLASIK 和激光融合视觉 (PresbyLBV)^[63]。中央型 PresbyLASIK 主要包括德国阿玛仕公司的 PresbyMAX 和德国博士伦公司的 SUPRACOR^[64], 该技术主要是通过对角膜进行多焦点消融, 实现角膜中央视近, 周边视远的目的。周围型 PresbyLASIK 是对角膜进行消融, 使得中央视远, 周边增加景深用来视近^[65]。PresbyLBV 是德国卡尔·蔡司公司的, 通过增加景深来控制双眼的球差或者仅在非主视眼调整非球面性 (上文中提到的 Q 值调整) 来实现^[66]。Ryu 等^[67] 的研究中术后 6 mo 所有行 PresbyMAX 手术的患者双眼裸眼远视力均达到 20/20, 双眼裸眼近视力均达到 J2 或更好, 83% 达到 J1; Ang 等^[68] 的研究中术后 6 mo 所有行 SUPRACOR 的患者平均双眼远、中、近视力均

达到 20/20、20/20、J1; Brar 等^[69] 对 PresbyLBV 的研究中, 术后 6 mo 阅读速度显著提高, 视功能令人满意, 立体视和对比敏感度没有变化。无论是哪种方式在临床上均获得了不错的临床效果, 对于矫正伴有年龄相关性调节力不足的屈光不正患者做出了个性化处理, 有着实际的临床意义^[63]。

6 小结

我国屈光手术矫正需求具有较大的潜力, 屈光手术从原先的“四性”, 即安全性、有效性、稳定性和可预测性, 逐渐向“四化”进行转变, 即微创化、个性化、多元化、智能化^[70]。本文将各种不同的 FS-LASIK 手术进行了对比分析, 对飞秒激光辅助制瓣的优势进行了描述, 还对近些年个性化的 FS-LASIK 做出了相应的总结, 可以看出每种个性化手术均有着相应的优势, 但同时也存在着相应的弊端。“全光塑”手术考虑了更多的眼部屈光因素, 理论上更优的个性化手术, 期待该手术方式为我们带来更多的惊喜。近些年随着行屈光手术的人群年龄的扩大, 为伴有年龄相关性调节不足的患者的屈光手术设计也存在不同的个性化设计, 为该部分人群弥补调节力下降的问题, 旨在为其提供更好的远近视力。“个性化”是现在屈光手术的发展趋势, 未来的角膜屈光手术一定是全方位的个性化设计。

利益冲突声明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 刘晓鹏论文选题与修改, 初稿撰写, 文献检索; 孙芳芳、王晓璇文献查阅和修改; 雷玉琳选题指导, 论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

[1] Pesudovs K. Wavefront aberration outcomes of LASIK for high myopia and high hyperopia. *J Refract Surg*, 2005, 21(5):S508-S512.
[2] Gurnani B, Kaur K. Recent advances in refractive surgery: an overview. *Clin Ophthalmol*, 2024, 18:2467-2472.
[3] Chua D, Htoon HM, Lim L, et al. Eighteen-year prospective audit of LASIK outcomes for myopia in 53 731 eyes. *Br J Ophthalmol*, 2019, 103(9):1228-1234.
[4] Kates MM, Tuli S. What is LASIK eye surgery? *JAMA*, 2020, 324(8):815.
[5] 田春雨, 荣丽媛, 黄金峰, 等. LASIK 术后 20 年患者远期视力效果与安全性. *国际眼科杂志*, 2022, 22(10):1707-1711.
[6] Santhiago MR, Kara - Junior N, Waring GO 4th. Microkeratome versus femtosecond flaps: accuracy and complications. *Curr Opin Ophthalmol*, 2014, 25(4):270-274.
[7] 于杰. 飞秒激光在角膜屈光手术中的研究进展. *中国医疗器械信息*, 2023, 29(8):49-51.
[8] Rattan SA, Rashid RF, Mutashar MK, et al. Comparison of corneal flap thickness predictability and architecture between femtosecond laser and sub - Bowman keratomileusis microkeratome in laser *in situ* keratomileusis. *Int Ophthalmol*, 2023, 43(5):1553-1558.
[9] 陆岩, 夏丽坤, 柴广睿. VisuMax 飞秒激光制作超薄角膜瓣 LASIK 术疗效观察. *国际眼科杂志*, 2013, 13(1):191-192.
[10] Salomão MQ, Ambrósio R Jr, Wilson SE. Dry eye associated with laser *in situ* keratomileusis; Mechanical microkeratome versus femtosecond laser. *J Cataract Refract Surg*, 2009, 35(10):1756-1760.
[11] 李莹. 重视飞秒激光角膜屈光手术的个性化选择. *眼科新进展*, 2013, 33(3):201-203.
[12] 甘小林, 邹世鑫, 鲁江. 不同飞秒激光制瓣厚度辅助 LASIK 矫正治疗近视的效果及 1 年随访观察. *海南医学*, 2022, 33(23):

3045-3048.

[13] Tomita M, Watabe M, Mita M, et al. Long-term observation and evaluation of femtosecond laser - assisted thin - flap laser *in situ* keratomileusis in eyes with thin corneas but normal topography. J Cataract Refract Surg, 2014,40(2):239-250.

[14] Chan TC, Ng AL, Cheng GP, et al. Vector analysis of astigmatic correction after small - incision lenticule extraction and femtosecond - assisted LASIK for low to moderate myopic astigmatism. Br J Ophthalmol, 2016,100(4):553-559.

[15] Rani D, Khokhar S, Rathod A, et al. Clinical outcomes of topography-guided versus wavefront-optimized LASIK for correction of myopia and compound myopic astigmatism. Indian J Ophthalmol, 2024, 72(11):1598-1604.

[16] Heralgi MM, Kavitha V, Dwivedi M, et al. Study of change in contrast sensitivity in relation to depth of ablation after wavefront optimized myopic laser - assisted *in situ* keratomileusis. Indian J Ophthalmol, 2020,68(12):2975-2980.

[17] Humayun S, Ishaq M, Fawad A, et al. Assessment of refractive outcomes of femtosecond-assisted laser *in situ* keratomileusis (LASIK) for hyperopia. J Coll Physicians Surg Pak, 2021,31(4):434-439.

[18] Arnon R, Levinger E, Pikkell J, et al. Laser-assisted *in situ* keratomileusis in flat, normal, and steep corneas. Cornea, 2024,44(6):701-708.

[19] Sia RK, Eaddy I, Beydoun H, et al. Low contrast acuity outcomes after SMILE and LASIK. J Refract Surg, 2024,40(9):e667-e671.

[20] 赵晓彬, 齐惠, 李科军. 波前像差优化 LASIK 对角膜前表面高阶像差的影响. 解放军医药杂志, 2015,27(12):67-70,85.

[21] 赵晓彬, 李科军, 赵智华, 等. 波前像差引导与波前像差优化 LASIK 对视力及全眼高阶像差影响的比较研究. 现代中西医结合杂志, 2016,25(3):232-234,238.

[22] Moshirfar M, Megerdichian A, West WB, et al. Comparison of visual outcome after hyperopic LASIK using a wavefront - optimized platform versus other excimer lasers in the past two decades. Ophthalmol Ther, 2021,10(3):547-563.

[23] Li SM, Kang MT, Wang NL, et al. Wavefront excimer laser refractive surgery for adults with refractive errors. Cochrane Database Syst Rev, 2020,12(12):CD012687.

[24] Elshawarby MA, Saad A, Helmy T, et al. Functional optical zone after wavefront - optimized versus wavefront - guided laser *in situ* keratomileusis. Med Hypothesis Discov Innov Ophthalmol, 2021,10(3):129-137.

[25] Roe JR, Manche EE. Prospective, randomized, contralateral eye comparison of wavefront-guided and wavefront-optimized laser *in situ* keratomileusis. Am J Ophthalmol, 2019,207:175-183.

[26] Kim A, Chuck RS. Wavefront-guided customized corneal ablation. Curr Opin Ophthalmol, 2008,19(4):314-320.

[27] Gui X, Zhang R, Li S, et al. Comparative analysis of the clinical outcomes between wavefront-guided and conventional femtosecond LASIK in myopia and myopia astigmatism. Int J Ophthalmol, 2021,14(10):1581-1588.

[28] Zhang Y, Du Y, He M, et al. Comparison of visual quality after wavefront-guided LASIK in patients with different levels of preoperative total ocular higher-order aberrations; a retrospective study. PeerJ, 2024, 12:e17940.

[29] Taskov G, Taskov T. Higher order aberrations (HOA) changes after femto-LASIK in topography and wavefrontguided treatments. Folia Med (Plovdiv), 2020,62(2):331-337.

[30] Wei C, Liu J, Zhang C, et al. Clinical outcomes of SMILE and WFG-LASIK used to treat myopia and astigmatism: a systematic review and meta-analysis. J Fr Ophthalmol, 2024,47(4):104085.

[31] Chiang B, Valerio GS, Manche EE. Prospective, randomized contralateral eye comparison of wavefront - guided laser *in situ* keratomileusis and small incision lenticule extraction refractive surgeries. Am J Ophthalmol, 2022,237:211-220.

[32] Li L, Zhang B, Liu SX, et al. Comparison of clinical outcomes of 2 platforms for topography - guided LASIK in primary eyes. J Cataract Refract Surg, 2021,47(9):1183-1190.

[33] Stulting RD, Fant BS, T-CAT Study Group, et al. Results of topography-guided laser *in situ* keratomileusis custom ablation treatment with a refractive excimer laser. J Cataract Refract Surg, 2016,42(1):11-18.

[34] Brunson P, Mann PM 2nd, Mann PM, et al. Comparison of refractive and visual acuity results after Contoura® Vision topography-guided LASIK planned with the Phorides Analytic Engine to results after wavefront-optimized LASIK in eyes with oblique astigmatism. PLoS One, 2022,17(12):e0279357.

[35] Onishi AC, Lee - Choi C, Marvasti AH. Topography - guided excimer laser ablation. Curr Opin Ophthalmol, 2023,34(4):296-302.

[36] Jain AK, Malhotra C, Pasari A, et al. Outcomes of topography-guided versus wavefront-optimized laser *in situ* keratomileusis for myopia in virgin eyes. J Cataract Refract Surg, 2016,42(9):1302-1311.

[37] Lobanoff M, Stonecipher K, Tooma T, et al. Clinical outcomes after topography - guided LASIK: comparing results based on a new topography analysis algorithm with those based on manifest refraction. J Cataract Refract Surg, 2020,46(6):814-819.

[38] Stulting RD, Lobanoff M, Mann PM 2nd, et al. Clinical and refractive outcomes after topography-guided refractive surgery planned using Phorides surgery planning software. J Cataract Refract Surg, 2022,48(9):1010-1015.

[39] Stulting RD, Durrie DS, Potvin RJ, et al. Topography-guided refractive astigmatism outcomes: predictions comparing three different programming methods. Clin Ophthalmol, 2020,14:1091-1100.

[40] Yuan YF, Zhang Y, Sun T, et al. Topography-guided FS-LASIK with PAE algorithm and Sirius tomography data for correction of myopia and myopic astigmatism. J Refract Surg, 2022,38(4):235-242.

[41] Kang EM, Ryu IH, Lee IS, et al. Comparison of corneal higher-order aberrations following topography-guided LASIK and SMILE for myopic correction: a propensity score matching analysis. J Clin Med, 2022,11(20):6171.

[42] Moin KA, Manion GN, Pandiri S, et al. Three - month comprehensive outcomes of topography - guided LASIK versus keratorefractive lenticule extraction (KLEx): a prospective contralateral study. Ophthalmol Ther, 2024,13(8):2265-2284.

[43] Kanellopoulos AJ. Topography-guided LASIK versus small incision lenticule extraction: long-term refractive and quality of vision outcomes. Ophthalmology, 2018,125(10):1658-1659.

[44] Mai EL, Chang CK, Lee CY, et al. Higher-order aberrations of topography-guided LASIK and wavefront-optimized LASIK in high- and low-myopic eyes: a non-randomized controlled trial. J Pers Med, 2023, 13(3):399.

[45] Ma J, Pillar A, Krueger R. Quality of life and satisfaction among physicians after wavefront-optimized vs topography-guided laser vision correction. J Cataract Refract Surg, 2020,46(11):1466-1473.

[46] Schallhorn JM, Seifert S, Schallhorn SC. SMILE, topography-guided LASIK, and wavefront - guided LASIK: review of clinical outcomes in premarket approval FDA studies. J Refract Surg, 2019,35(11):690-698.

[47] Toda I, Ide T, Fukumoto T, et al. Visual outcomes after LASIK using topography - guided *vs* wavefront - guided customized ablation systems. J Refract Surg, 2016,32(11):727-732.

- [48] Lyra AFV, AlvesEM, Montenegro AA, et al. Corneal higher order aberrations and epithelial remodeling with femtosecond laser – assisted LASIK topography – guided and customized asphericity ablation in the contralateral eye: a randomized, double – blind, prospective study. J Refract Surg, 2023,39(11):751–758.
- [49] 李婧, 沈政伟, 叶娅. Q 值引导和标准 LASIK 对视觉质量影响的比较研究. 眼科新进展, 2012,32(1):52–55.
- [50] Zhang KP, Fang X, Zhang Y, et al. Comparison of Q – value – guided laser – assisted *in situ* keratomileusis and standard laser *in situ* keratomileusis for myopia: a meta – analysis. Medicine (Baltimore), 2020,99(45):e21563.
- [51] Liu S, Sun H, Nie X, et al. Changes of ocular aberration after wavefront – guided aspherical LASIK for myopia. Zhonghua Yan Ke Za Zhi, 2014,50(1):27–31.
- [52] 何茂竹. 波前像差优化、角膜地形图引导和 Q 值引导 FS-LASIK 术后视觉质量的对比分析. 川北医学院, 2021.
- [53] Zhang J, Zheng L, Zhao X, et al. Corneal aberrations after small – incision lenticule extraction versus Q value – guided laser – assisted *in situ* keratomileusis. Medicine (Baltimore), 2019,98(5):e14210.
- [54] Zhang J, Zheng L, Zhao X, et al. Corneal biomechanics after small – incision lenticule extraction versus Q – value – guided femtosecond laser – assisted *in situ* keratomileusis. J Curr Ophthalmol, 2016,28(4):181–187.
- [55] 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.
- [56] Zhang RY, Yuan YF, Zhang Y, et al. Q – value – guided femtosecond laser – assisted *in situ* keratomileusis for low – to – moderate myopia with age – related accommodation deficiency. Zhonghua Yan Ke Za Zhi, 2024,60(8):658–664.
- [57] Kanellopoulos AJ. Initial outcomes with customized myopic LASIK, guided by automated ray tracing optimization: a novel technique. Clin Ophthalmol, 2020,14:3955–3963.
- [58] Kanellopoulos AJ. Ray – tracing customization in myopic and myopic astigmatism LASIK treatments for low and high order aberrations treatment: 2 – year visual function and psychometric value outcomes of a consecutive case series. Clin Ophthalmol, 2024,18:565–574.
- [59] He G, Bala C. Ray – tracing – guided myopic LASIK: real – world clinical outcomes. J Cataract Refract Surg, 2023,49(11):1140–1146.
- [60] Yuan YF, Zhang RY, Wang ZZ, et al. Ray – tracing – guided or Q – value – adjusted FS – LASIK for correction of myopia and myopic astigmatism: a comparative contralateral eye study. J Refract Surg, 2024,40(11):e804–e813.
- [61] Cao XF, Zhang J, Shao J, et al. Study of the InnovEyes sightmap platform in comparing ray – tracing – guided LASIK and topography – guided LASIK. J Refract Surg, 2024,40(12):e994–e1002.
- [62] 刘晓鹏, 雷玉琳. 激光类手术矫正老视的新进展. 国际眼科杂志, 2024,24(11):1753–1758.
- [63] Shetty R, Brar S, Sharma M, et al. PresbyLASIK: a review of PresbyMAX, supracor, and laser blended vision: principles, planning, and outcomes. Indian J Ophthalmol, 2020,68(12):2723–2731.
- [64] Saib N, Abrieu – Lacaille M, Berguiga M, et al. Central PresbyLASIK for hyperopia and presbyopia using micro – monovision with the technolas 217P platform and SUPRACOR algorithm. J Refract Surg, 2015,31(8):540–546.
- [65] Epstein RL, Gurgos MA. Presbyopia treatment by monocular peripheral presbyLASIK. J Refract Surg, 2009,25(6):516–523.
- [66] Stival LR, Figueiredo MN, Santhiago MR. Presbyopic excimer laser ablation: a review. J Refract Surg, 2018,34(10):698–710.
- [67] Ryu S, Jun I, Kang DSY, et al. Presbyopia correction using the monocular bi – aspheric ablation profile in myopic eyes. J Cataract Refract Surg, 2023,49(1):69–75.
- [68] Ang RE, Cruz EM, Pisig AU, et al. Safety and effectiveness of the SUPRACOR presbyopic LASIK algorithm on hyperopic patients. Eye Vis (Lond), 2016,3:33.
- [69] Brar S, Sute SS, Bagare SN, et al. Functional outcomes and reading speeds following PRESBYOND LBV using nonlinear aspheric ablation profiles combined with micro – monovision. J Ophthalmol, 2021, 2021(1):2957443.
- [70] 王雁, 马娇楠. 屈光手术未来发展方向及趋势. 中华实验眼科杂志, 2021,39(12):1025–1030.