

· 专家述评 ·

屈光手术未来发展方向及趋势

王雁 马娇楠

天津市眼科医院 天津医科大学眼科临床学院 天津市眼科学与视觉科学重点实验室 南开大学附属眼科医院 南开大学眼科学研究院, 天津 300020

通信作者: 王雁, Email: wangyan7143@vip. sina. com

【摘要】 屈光手术是目前屈光不正矫正的重要方法之一, 主要包括角膜屈光手术和眼内屈光手术。近年来, 屈光手术相关研究整体发展趋势迅猛, 但仍存在潜在发展空间及市场需求。各种新技术的临床应用使我国屈光手术的发展进入了一个新阶段, 无论是角膜屈光手术还是眼内屈光手术, 其最终目标是追求“更安全”的微创以及更个性化的矫正, 手术中不仅引入角膜地形图引导、波前像差引导、Q 值调整的个性化切削以及手术中 Kappa 角的调整等技术以追求最佳的视觉质量, 而且还出现了个性化的角膜交联手术等多种方式。各种手术方式及研究方向的多元化交叉融合也是屈光手术研究新的发展方向, 此外, 提升诊疗效率并使矫正效果更加精准智能化也是发展新趋势之一。眼科临床医师应密切关注我国屈光手术的发展变革和未来的可能的发展方向及趋势。

【关键词】 屈光手术; 交叉学科; 人工智能; 趋势

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81873684)

DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20210804-00446

Future developments and trends in refractive surgery

Wang Yan, Ma Jiaonan

Tianjin Eye Hospital, Clinical College of Ophthalmology of Tianjin Medical University, Tianjin Key Laboratory of Ophthalmology and Vision Science, Nankai University Affiliated Eye Hospital, Institute of Ophthalmology of Nankai University, Tianjin 300020, China

Corresponding author: Wang Yan, Email: wangyan7143@vip. sina. com

【Abstract】 Refractive surgery is one of the important methods for refractive error correction, which include corneal refractive surgery and intraocular refractive surgery. In recent years, refractive surgery has a rapid development, and there is still development space and potential market demand. The clinical application of various new technologies has brought the refractive surgery to a new stage. The ultimate aim of refractive surgery is to pursue safer minimally invasive approaches and more customized correction for better visual quality. The new approaches including the guidance of corneal topography and wavefront aberration, the Q-value adjustment, Kappa angle adjustment, and customized corneal cross-linking during the surgery have been developed. The integration of various surgical approaches and research is also a new development direction. The combination with intelligent operation to improve the efficiency and accuracy of treatment seems to be one new direction, too. Ophthalmologists should pay attention to the current development and the possible future directions and trends of refractive surgery in China.

【Key words】 Refractive surgical procedures; Interdisciplinary research; Artificial intelligence; Trends

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81873684)

DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20210804-00446

近视是全球范围内视力损害的常见原因, 未矫正的近视是远视力障碍的主要原因。研究表明, 近视及高度近视患病率仍有逐渐升高的趋势^[1]。屈光矫正手术是除配戴框架眼镜和角膜接触镜之外矫正屈光不正的另一选择, 主要包括角膜屈光手术和眼内屈光手

术, 前者指通过重塑角膜的形状或改变角膜的屈光性达到矫正眼屈光状态的手术, 后者主要指有晶状体眼人工晶状体 (intraocular lens, IOL) 植入和屈光性晶状体置换术, 从而达到矫正屈光状态的目的^[2]。近年来, 屈光矫正手术新技术层出不穷, 先进的手术设备、

材料科学及显微手术技术快速进步,标志着屈光手术即将进入一个崭新的发展阶段^[3]。我国屈光手术的快速发展、潜在的市场需求及未来的发展趋势对临床医生的学习和工作提出了新的要求和挑战。

1 我国屈光矫正手术发展沿革

随着视觉科学研究的不断进展、眼科研究者对屈光不正发病机制认识的逐渐深入、屈光手术技术和设备的不断改良和进步,屈光矫正手术技术不断发生变革,目前正处于一个快速发展时期。我国角膜屈光矫正手术的发展经历了几个关键节点,最早是 19 世纪 70 年代俄罗斯的放射状角膜切开术 (radial keratotomy, RK) 的引入,当时该手术方法对屈光不正的矫正取得了令人满意的效果,且临床实施的成本较低,临床应用日益广泛,但长期随访发现该手术方法对近视矫正的预测性较差^[4],且术后并发症影响远期矫正效果,并易发生远视漂移,这些缺点大大限制了其在临床上的应用。随着激光技术在眼科手术中的应用,我国屈光手术出现了第 2 个发展节点:(1)准分子激光技术在角膜屈光不正矫正手术中的应用 主要代表术式为准分子激光屈光性角膜切削术 (photorefractive keratectomy, PRK) 和准分子激光角膜原位磨镶术 (laser in situ keratomileusis, LASIK)^[5-6],后者具有术后眼无疼痛、视力恢复较快等优点,加之准分子激光手术与计算机技术的结合使得手术设计参数和手术操作的精准度明显提高。随着角膜地形图及波前像差技术与屈光矫正手术的结合,手术设计更加优化,手术的安全性、有效性和可预测性得到明显提升,受到医生和患者的关注,临床应用更为广泛。(2)飞秒激光技术在角膜屈光矫正手术中的应用 主要代表性的手术方法为飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE)。2011 年中国开展了第 1 例 SMILE 手术,该手术无需制作角膜瓣,避免了 LASIK 术中制作角膜瓣可能引发的相关并发症,具有术后干眼发生率低、角膜生物力学稳定性较好等优势^[7-9],主流屈光手术发展趋势已由 LASIK 手术逐步转向 SMILE 手术。

眼内屈光手术主要包括有晶状体眼 IOL 植入术和屈光性晶状体置换术,作为屈光不正矫正的一种选择,多年来也发生了较大的变化。目前,前房角支撑型 IOL 及虹膜夹持型 IOL 因其各种并发症已较少应用于临床,而后房型可植入式 IOL 植入术成为主要手术方式^[10]。以往认为眼内屈光手术是角膜屈光手术之外较少应用的技术和补充手段,近年来因在 IOL 材料、设

计及应用技术方面的不断改进和创新,眼内屈光手术呈现出良好的有效性、可预测性、安全性和稳定性,加之该手术的可逆性及可对高度近视和超高度近视进行矫正的特殊优势,被越来越多屈光手术医生和患者所接受^[11]。屈光性晶状体置换术主要适用于 40 岁以上有晶状体混浊、薄角膜的超高度近视患者,尽管近年来多焦 IOL 的出现为老视的中老年屈光不正人群治疗提供了新的选择,因具有白内障手术并发症的风险,如视网膜脱离等,适应人群仍受到极大的限制^[12]。

2 我国屈光矫正手术的潜在需求

现阶段,国内外屈光矫正手术技术呈快速发展态势,从手术量来看,据美国眼科协会统计,美国 5 岁以上近视人群为 9 000 万~1 亿,年近视人群手术量稳定在 60 万例/年,屈光矫正手术比例为 0.6%~0.7%^[13]。据中国眼科网及角膜屈光手术白皮书统计,目前中国屈光矫正的手术量已达到平均 100 万例/年,按 7 亿近视人群计算,中国年屈光手术比例约为 0.3%^[3,14]。因此我国的屈光矫正手术需求潜力较大,临床医生应密切关注屈光矫正手术技术的发展方向及趋势。

3 屈光矫正手术的发展趋势

随着屈光矫正手术新技术的不断融入,近年来手术技术和设备得到了飞速发展,手术矫正的目标也发生了很大变化。早期的屈光矫正手术主要是追求术后的矫正效果,可概括为“四性”,即安全性、有效性、稳定性和可预测性,而现阶段的屈光矫正手术正朝着“四化”的方向发展,即微创化、个性化、多元化和智能化。

3.1 微创化:追求“更安全”

目前角膜屈光矫正手术包括多种术式,从最开始要求手术的安全性、有效性到现在手术的发展,均希望术眼受到的损伤最小及手术效果最佳。PRK 手术的应用使得角膜屈光手术进入了激光精准切削时代,而 LASIK 手术的出现又避免了 PRK 手术后术眼的疼痛和角膜上皮雾状混浊的发生,提高了术眼术后视力恢复的速度和患者的舒适度^[5-6]。LASIK 与 PRK 手术各有优势,但 LASIK 术后角膜上皮损伤面积明显减小,角膜上皮细胞损伤可能引起的“级联”不良反应较少,由此引起的细胞因子释放、组织伤口愈合反应及创伤反应较小^[15-16]。飞秒激光用于手术中制作角膜瓣,即飞秒激光辅助的 LASIK 手术可不用去除大面积角膜上皮,角膜伤口愈合反应较轻^[16-17],手术后无明显疼痛。SMILE 手术采用飞秒激光在角膜基质内制作 1 个光学透镜,并从周边角膜 1 个 2~4 mm 的小切

口将其取出,对角膜表层及上皮的损伤更轻微,对角膜表面神经破坏较少,术后发生干眼的风险也明显降低^[7,18-21],开启了微创手术的新时代。

未来角膜屈光矫正手术的发展将朝着更加微创的方向发展,已有研究者提出了一种新型的、非侵入性屈光矫正方法,其基于不同的激光-角膜互动模式诱导组织产生 1 个低密度等离子体,产生活性氧,与角膜组织中的胶原纤维发生交联反应,从而改变角膜的屈光力,但目前该技术用于人眼的安全性和稳定性仍需进一步研究^[22]。

3.2 个性化:追求更好的矫正效果及“视觉质量”

个性化是角膜屈光手术的发展趋势,个性化角膜屈光手术已从最初的仅考虑年龄、职业的个体化发展到了根据患者某些光学特性及形态特征设计的个性化手术,如波前像差引导或角膜地形图引导的个性化手术^[23],近年来还出现了根据角膜厚度、前房深度、瞳孔大小、Kappa 角度等解剖参数差异设计的个性化定制手术方案,加之根据患者的生活、工作等需要设计的功能性个性化手术,未来的角膜屈光手术一定是全方位的个性化设计。

3.2.1 角膜地形图引导的个性化切削 角膜地形图引导的角膜屈光手术用于角膜前表面不规则眼的屈光矫正,手术中通过对瞳孔及虹膜纹理的识别技术实现眼球的跟踪,具有术中补偿静态眼球自旋等功能,消除个体的低阶像差(如近视、远视及散光)和部分明显的高阶像差(角膜前表面不规则),使角膜形态达到最优化,可获得良好的裸眼视力,提高术后视觉质量^[24]。

3.2.2 波前像差引导的个性化切削 依据波前像差仪测量的像差值引导角膜的切削并改变角膜形态,以减少眼球的整体像差,可矫正球差、彗差和三叶草像差等高阶像差,减少激光源性、手术源性高阶像差的产生,达到有效改善夜间视力、降低术后眩光的目的,获得更佳的视觉质量^[25]。

3.2.3 Q 值调整的个性化切削 该技术以角膜的目标 Q 值为基础,在切削角膜的同时增加周边切削能量进行补偿,维持并优化前角膜的非球面性。Q 值调整的个性化切削包括 Q 值引导的 LASIK 和 PRK 等手术、Q 值调整补偿老视(通过引入额外球差增加景深来补偿老视的调节力降低)以及 Q 值引导的合并远视的老视矫正等^[26]。

3.2.4 手术中 Kappa 角的调整 准分子激光辅助的角膜屈光手术从最初需手动调整 Kappa 角发展至可实现设置后 Kappa 角自动调整,SMILE 手术也应实施 Kappa 角的调整。本团队研究结果显示,调整 Kappa

角术后 6 mm 瞳孔状态下彗差的增加量明显少于未调整 Kappa 角者,可使术眼术后获得更好的视觉质量^[27]。因此,手术中调整 Kappa 角已成为角膜屈光矫正手术的发展趋势。

3.2.5 个性化的屈光性角膜交联手术 对于屈光不正患者来说,角膜交联术(corneal crosslinking, CXL)不仅能够治疗可能存在的圆锥角膜,同时还可进行屈光矫正,是一种屈光不正矫正的角膜力学加强手术(Xtra)。此类手术可通过调整交联过程中紫外线照射能量和时间、核黄素浓度和浸润时间等达到个性化诊疗的目的。与标准 CXL 相比,个性化 CXL 术后角膜上皮愈合时间更短,角膜形态恢复得更规则^[28]。随着研究的进展,个性化的屈光性 CXL 可能成为未来矫正低度近视的一种选择。

3.3 多元化:追求深度的交叉融合

屈光矫正手术的多元化发展主要体现在 2 个方面,即手术方式的多元化及相关研究的多元化。

3.3.1 手术方式的多元化 除了现有的角膜表层与板层屈光矫正手术、眼内屈光手术外,由于患者之间存在着个体差异和眼部解剖差异,故手术时既可以采取单一的手术方式,也可选择 2 种或 3 种联合术式。例如,可植入式眼内镜(implantable collamer lens, ICL)植入术可联合飞秒激光辅助的散光性角膜切开术^[29],改善高度散光眼的矫正效果;ICL 术后行波前像差引导的角膜屈光手术可进一步优化患者术后的视觉质量^[30];角膜地形图引导的 PRK 联合 CXL 和/或角膜基质环植入术可实现对圆锥角膜的治疗^[31-32];采用飞秒激光进行 IOL 屈光度的调整可以实现 IOL 的个性化调整^[33]。

此外,角膜屈光手术和眼内屈光手术中均融入了飞秒激光技术,可获得更好的视觉质量,屈光手术和眼内屈光手术之间也会存在一定的交叉融合。例如,尽管手术部位不同、角膜与晶状体的位置不同以及 2 种组织结构存在差异,但角膜和晶状体均为屈光间质,在像差方面是相互补偿的。角膜屈光手术和眼内屈光手术领域的交叉融合可为眼科患者提供更多的选择,促进整个眼科事业更好地发展。

3.3.2 相关研究的多元化 角膜屈光手术的设计涉及到物理光学、计算机科学和生物力学等多个学科的知识,促进了屈光手术与相关学科之间的交叉融合,可以更深入地了解临床手术涉及的科学背景,包括揭示手术治疗的相关机制并有效控制并发症等,主要体现在:(1)屈光手术与视觉科学的交叉研究 目前无论是屈光手术,还是眼部的其他手术,治疗的最终目标并

非仅仅提高视力,还应提升视觉质量。本研究团队及国外研究者围绕此目的进行了一系列的研究,不仅建立了以视觉科学为核心的视觉矫正新体系,还构建了个性化眼模型和视觉仿真研究平台,包括基于高阶像差、视轴光轴夹角、可见光波段和加载 IOL 等系列个性化眼模型^[34-36],模拟人的视觉矫正效果,揭示视觉形成和优化的内在光学机制,优化实验方法,极大改善了实验研究中动物实验周期长、消耗大的缺陷。同时,研究者借助物理光学手段探索出多项视觉科学的新概念和新规律,发现了横向色像差对光晕和虹视等症状的影响以及近视眼高阶像差量值随瞳孔变化的非线性规律^[37-38]。这些研究成果均有助于屈光手术矫正效果的进一步优化。(2) 屈光手术与生物力学的交叉研究 目前人体组织的生物力学特性是医学研究的热点之一,但以往眼科对于眼组织生物力学方面的研究较少。一些眼部疾病,特别是角膜相关疾病的发生和发展与角膜和巩膜组织生物力学特性有关。角膜屈光手术的主要靶组织为角膜,目前关于其生物力学的研究主要是在宏观层面,如借助拉伸实验、膨胀实验了解角膜的弹性、黏性和各向异性等生物力学特性^[39-40],或利用有限元模型模拟角膜屈光手术设计及术后的效果^[41],而借助在体生物力学测量设备获取人眼角膜动态运动特性可进一步优化屈光手术设计^[42-44]。另外,还可以从微观角度加深对角膜屈光手术与生物力学相关的科学认知,从分子水平、细胞水平观察角膜等屈光间质在受到机械刺激后对于角膜细胞凋亡、细胞增生及蛋白降解的影响^[45],进一步量化角膜生物力学特性在角膜屈光手术设计中的作用,也为近视的精准矫正奠定理论基础。

3.4 智能化:提升屈光不正的诊疗效率

由于屈光矫正设计存在患者间的个体差异、临床医生经验水平的参差不齐、不同年间屈光数据的多源性及内部的复杂关系,影响了屈光手术精准性的进一步提升。然而,屈光手术的术前筛查积累了大量多源数据,包括屈光信息、角膜形态学、生物力学数据、像差数据、前房深度及晶状体的厚度等,加之每年接受屈光手术的人群庞大,积累了海量手术参数、录像资料及随访信息,这些多源化的大数据为屈光手术的智能化发展奠定了基础。

目前,屈光手术的智能化发展方向包括术前筛查、术中设计及术后的处理方法等,有望实现人工智能(artificial intelligence, AI)辅助的屈光临床诊疗。(1) 屈光手术标准数据库的建立^[46]。(2) 基于 AI 技术实现屈光手术前圆锥角膜筛查,将专家临床经验转

化为数字化模型,可极大提升年轻医师和基层医师的临床诊断效率和准确率,降低手术风险^[47-48]。(3) 目前借助 AI 模型已经可以预测 SMILE 手术中 Nomogram 值,其输出的设计值明显提高了屈光不正的矫正效果,甚至部分超越了专家术者的手术效果,可广泛用于视觉矫正,缩短屈光手术医生的学习周期^[49]。(4) 基于 AI 模型更有助于眼内屈光手术中屈光性 IOL 度数的计算和位置的量化^[50-51]。目前角膜屈光手术接受率较高,随着人口老龄化社会的到来,预计未来需要进行白内障手术但有角膜屈光手术史的患者数量将会增加,借助 AI 算法可实现更加精准的 IOL 屈光度计算^[52]。(5) 屈光手术智能化还体现在其他方面,如利用 AI 算法挖掘复杂视觉成像规律、优化屈光手术诊疗流程、预测最适宜手术方式、行屈光手术后角膜上皮重塑以及机器人辅助的屈光手术,提高手术精准性等^[53]。

AI 技术融入屈光手术的智能化发展是必然趋势,现有的 AI 技术主要集中在诊断方面,未来将越来越多地指导治疗。结合医学大数据,AI 将进一步帮助医生解决临床难题,提升医疗效率。

屈光矫正手术种类多,接受手术的人群数量大,且屈光矫正手术是在“健康眼”上进行的,矫正对象对手术效果要求较高,因此屈光矫正手术方式的选择、手术操作的技术要求及术后处理方法等方面与其他医疗领域明显不同,屈光矫正手术的快速发展是机遇也充满了挑战。近年来屈光矫正手术的新技术层出不穷,涉及激光技术、电子技术和计算机技术等融入,此外随着与物理学、光学、AI 和材料科学等学科的融合发展,对手术医生提出了较高的要求。手术医生不仅应具有扎实的眼科学基础知识和娴熟的显微手术技巧,也应了解眼科学和视觉科学及其他交叉学科的相关知识。如果说微创、个性化是屈光矫正手术要追求的目标,那么多元化、智能化等的发展或许能够反映屈光诊疗领域未来几年的发展趋势,需要眼科医生、技术人员、科研专家以及数据科学家等进行更广泛、更深入的合作,以实现屈光矫正手术设计的最优化及矫正效果的最优质,为屈光不正患者提供更安全、更精准和更趋于自然状态的视觉矫正效果。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

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 [J]. *Ophthalmology*, 2016, 123(5): 1036-1042. DOI: 10.1016/j.ophtha.2016.01.006.

- [2] Kim TI, Alió Del Barrio JL, Wilkins M, et al. Refractive surgery [J]. *Lancet*, 2019, 393 (10185): 2085–2098. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)33209-4.
- [3] 王雁, 史伟云, 李莹. 我国角膜屈光手术的快速发展和变迁 [J]. *中华眼科杂志*, 2020, 56 (2): 81–85. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2020.02.001.
Wang Y, Shi WY, Li Y. The rapid development and changes of corneal refractive surgery in China [J]. *Chin J Ophthalmol*, 2020, 56 (2): 81–85. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2020.02.001.
- [4] Waring GO 3rd, Lynn MJ, McDonnell PJ. Results of the prospective evaluation of radial keratotomy (PERK) study 10 years after surgery [J]. *Arch Ophthalmol*, 1994, 112 (10): 1298–1308. DOI: 10.1001/archophth.1994.01090220048022.
- [5] Munnerlyn CR, Koons SJ, Marshall J. Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery [J]. *J Cataract Refract Surg*, 1988, 14 (1): 46–52. DOI: 10.1016/s0886-3350(88)80063-4.
- [6] Pallikaris IG, Siganos DS. Excimer laser in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy for correction of high myopia [J]. *J Refract Corneal Surg*, 1994, 10 (5): 498–510.
- [7] Sekundo W, Kunert K, Russmann C, et al. First efficacy and safety study of femtosecond lenticule extraction for the correction of myopia: six-month results [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2008, 34 (9): 1513–1520. DOI: 10.1016/j.jcrs.2008.05.033.
- [8] Shah R, Shah S. Effect of scanning patterns on the results of femtosecond laser lenticule extraction refractive surgery [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2011, 37 (9): 1636–1647. DOI: 10.1016/j.jcrs.2011.03.056.
- [9] 王雁, 鲍锡柳, 汤欣, 等. 飞秒激光角膜微小切口基质透镜取出术矫正近视及近视散光的早期临床研究 [J]. *中华眼科杂志*, 2013, 49 (4): 292–298. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2013.04.002.
Wang Y, Bao XL, Tang X, et al. Clinical study of femtosecond laser corneal small incision lenticule extraction for correction of myopia and myopic astigmatism [J]. *Chin J Ophthalmol*, 2013, 49 (4): 292–298. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2013.04.002.
- [10] 王晓瑛, 周行涛. 从忽视到重视——可植入式眼内镜的最新进展及发展趋势 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2015, 17 (8): 449–452. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2015.08.001.
Wang XY, Zhou XT. From neglect to recognition—the latest developments in the implantable collamer lens [J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2015, 17 (8): 449–452. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2015.08.001.
- [11] 张志华, 廉井财. 眼内屈光手术研究进展 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2010, 28 (8): 791–795. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0808.2010.08.027.
Zhang ZH, Lian JC. Research progress in intraocular refractive surgery [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2010, 28 (8): 791–795. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0808.2010.08.027.
- [12] 沈晔. 重视眼内屈光手术的安全性 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2014, 16 (12): 705–707. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.12.001.
Shen Y. Intraocular refractive surgery on the premise of safety [J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2014, 16 (12): 705–707. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.12.001.
- [13] Ang M, Gatineau D, Reinstein DZ, et al. Refractive surgery beyond 2020 [J]. *Eye (Lond)*, 2021, 35 (2): 362–382. DOI: 10.1038/s41433-020-1096-5.
- [14] Morgan IG, French AN, Ashby RS, et al. The epidemics of myopia: aetiology and prevention [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2018, 62: 134–149. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.09.004.
- [15] Liu L, Cheng W, Wu D, et al. The differential expression of cytokines and growth factors after SMILE compared with FS-LASIK in rabbits [J/OL]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2020, 61 (5): 55 [2021-07-25]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32460319/>. DOI: 10.1167/iovs.61.5.55.
- [16] Wilson SE. Biology of keratorefractive surgery-PRK, PTK, LASIK, SMILE, inlays and other refractive procedures [J/OL]. *Exp Eye Res*, 2020, 198: 108136 [2021-07-25]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32653492/>. DOI: 10.1016/j.exer.2020.108136.
- [17] Stonecipher K, Ignacio TS, Stonecipher M. Advances in refractive surgery: microkeratome and femtosecond laser flap creation in relation to safety, efficacy, predictability, and biomechanical stability [J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2006, 17 (4): 368–372. DOI: 10.1097/01.icu.0000233957.88509.2d.
- [18] Wu W, Wang Y, Zhang H, et al. One-year visual outcome of small incision lenticule extraction (SMILE) surgery in high myopic eyes: retrospective cohort study [J/OL]. *BMJ Open*, 2016, 6 (9): e010993 [2021-07-26]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27655258/>. DOI: 10.1136/bmjopen-2015-010993.
- [19] Wu Z, Wang Y, Zhang J, et al. Comparison of corneal biomechanics after microincision lenticule extraction and small incision lenticule extraction [J]. *Br J Ophthalmol*, 2017, 101 (5): 650–654. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2016-308636.
- [20] Wei S, Wang Y, Wu D, et al. Ultrastructural changes and corneal wound healing after SMILE and PRK procedures [J]. *Curr Eye Res*, 2016, 41 (10): 1316–1325. DOI: 10.3109/02713683.2015.1114653.
- [21] Zhang H, Wang Y. Dry eye evaluation and correlation analysis between tear film stability and corneal surface regularity after small incision lenticule extraction [J]. *Int Ophthalmol*, 2018, 38 (6): 2283–2288. DOI: 10.1007/s10792-017-0717-x.
- [22] Wang C, Fomovsky M, Miao G, et al. Femtosecond laser crosslinking of the cornea for non-invasive vision correction [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12 (7): 416–422. DOI: 10.1038/s41566-018-0174-8.
- [23] 张丽, 翟长斌, 周跃华, 等. 近视患者角膜地形图引导与波前像差优化的 FS-LASIK 术后视觉质量比较 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2019, 37 (11): 914–920. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2019.11.012.
Zhang L, Zhai CB, Zhou YH, et al. Comparison of visual quality after topography-guided and wavefront-optimized FS-LASIK in myopic eyes [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2019, 37 (11): 914–920. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2019.11.012.
- [24] 中华医学会眼科学分会眼视光学组. 我国角膜地形图引导个性化激光角膜屈光手术专家共识 (2018 年) [J]. *中华眼科杂志*, 2018, 54 (1): 23–26. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2018.01.005.
- [25] 王雁, 赵堪兴, 王肇峰, 等. 波前像差与临床视觉矫正 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 190–212.
- [26] 苏小连, 王雁. 角膜的非球面形态及角膜屈光手术对其的影响 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2015, 33 (6): 552–555. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.06.015.
Su XL, Wang Y. Corneal asphericity and the effects of the corneal refractive surgery on it [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2015, 33 (6): 552–555. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.06.015.
- [27] 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 [J]. *Cornea*, 2020, 39 (5): 609–614. DOI: 10.1097/ICO.0000000000002274.
- [28] Subasinghe SK, Ogbuehi KC, Dias GJ. Current perspectives on corneal collagen crosslinking (CXL) [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2018, 256 (8): 1363–1384. DOI: 10.1007/s00417-018-3966-0.
- [29] Chang J. Femtosecond laser-assisted astigmatic keratotomy: a review [J/OL]. *Eye Vis (Lond)*, 2018, 5: 6 [2021-07-28]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29564359/>. DOI: 10.1186/s40662-018-0099-9.
- [30] Seiler TG, Wegner A, Senft T, et al. Dissatisfaction after trifocal IOL implantation and its improvement by selective wavefront-guided LASIK [J]. *J Refract Surg*, 2019, 35 (6): 346–352. DOI: 10.3928/1081597X-20190510-02.
- [31] Kanellopoulos AJ. Ten-year outcomes of progressive keratoconus management with the athens protocol (topography-guided partial-refraction PRK combined with CXL) [J]. *J Refract Surg*, 2019, 35 (8): 478–483. DOI: 10.3928/1081597X-20190627-01.
- [32] Coskunseven E, Jankov MR 2nd, Grentzelos MA, et al. Topography-guided transepithelial PRK after intracorneal ring segments implantation and corneal collagen CXL in a three-step procedure for keratoconus [J]. *J Refract Surg*, 2013, 29 (1): 54–58. DOI: 10.3928/1081597X-20121217-01.



- [33] Nguyen J, Werner L, Ludlow J, et al. Intraocular lens power adjustment by a femtosecond laser: *in vitro* evaluation of power change, modulation transfer function, light transmission, and light scattering in a blue light-filtering lens [J]. J Cataract Refract Surg, 2018, 44 (2) : 226-230. DOI: 10.1016/j.jcrs.2017.09.036.
- [34] Guo H, Wang Z, Wang Y, et al. A new method to calculate corneal ablation depth based on optical individual eye model [J]. Optik, 2005, 116(9) : 433-437. DOI: 10.1016/j.ijleo.2005.01.034.
- [35] Rao F, Wang ZQ, Wang Y, et al. Achromatic customized intraocular lens based on an individual pseudophakic eye model [J]. Optik, 2010, 121(4) : 366-372. DOI: 10.1016/j.ijleo.2008.07.020.
- [36] Zhang M, Wang ZQ, Wang Y, et al. Studies of transverse chromatic aberration based on individual eye model [J]. Optik, 2010, 121(22) : 2080-2086. DOI: 10.1016/j.ijleo.2009.07.009.
- [37] Wang Y, Zhao K, Jin Y, et al. Changes of higher order aberration with various pupil sizes in the myopic eye [J]. J Refract Surg, 2003, 19(2 Suppl) : S270-274.
- [38] He Y, Wang Y, Wang Z, et al. Study on chromatic aberration in a population of Chinese myopic eyes by means of optical design [J]. Biomed Opt Express, 2013, 4(5) : 667-679. DOI: 10.1364/BOE.4.000667.
- [39] Xue C, Xiang Y, Shen M, et al. Preliminary investigation of the mechanical anisotropy of the normal human corneal stroma [J/OL]. J Ophthalmol, 2018, 2018 : 5392041 [2021-07-29]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30416826/>. DOI: 10.1155/2018/5392041.
- [40] Xiang Y, Shen M, Xue C, et al. Tensile biomechanical properties and constitutive parameters of human corneal stroma extracted by SMILE procedure [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2018, 85 : 102-108. DOI: 10.1016/j.jmbm.2018.05.042.
- [41] Fang L, Wang Y, Yang R, et al. Effects of the LASIK flap thickness on corneal biomechanical behavior: a finite element analysis [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2020, 20(1) : 67 [2021-07-30]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32093676/>. DOI: 10.1186/s12886-020-01338-8.
- [42] 张耀花, 王雁. 飞秒激光角膜屈光手术生物力学效应研究进展 [J]. 中华实验眼科杂志, 2020, 38(6) : 534-538. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20200512-00339.
- Zhang YH, Wang Y. Advances in biomechanical effects of femtosecond laser corneal refractive surgery [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2020, 38(6) : 534-538. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20200512-00339.
- [43] Dou R, Wang Y, Xu L, et al. Comparison of corneal biomechanical characteristics after surface ablation refractive surgery and novel lamellar refractive surgery [J]. Cornea, 2015, 34(11) : 1441-1446. DOI: 10.1097/ICO.0000000000000556.
- [44] Wu D, Wang Y, Zhang L, et al. Corneal biomechanical effects: small-incision lenticule extraction versus femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis [J]. J Cataract Refract Surg, 2014, 40(6) : 954-962. DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.07.056.
- [45] Zhang J, Yang S, Tan Y, et al. Effects of mechanical compression on cell morphology and function in human corneal fibroblasts [J]. Curr Eye Res, 2021, 46(10) : 1467-1473. DOI: 10.1080/02713683.2021.1904510.
- [46] 邹昊翰, 季书帆, 朱天晨, 等. 屈光手术标准化数据平台构建及应用 [J]. 医学信息学杂志, 2020, 41(6) : 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6036.2020.06.014.
- Zou HH, Ji SF, Zhu TC, et al. Building and application of standardization data platform of refractive surgery [J]. J Med Intel, 2020, 41(6) : 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6036.2020.06.014.
- [47] 邹昊翰, 徐佳慧, 张琳, 等. 基于机器学习的数据模型辅助诊断亚临床期圆锥角膜的研究 [J]. 中华眼科杂志, 2019, 55(12) : 911-915. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2019.12.008.
- Zou HH, Xu JH, Zhang L, et al. Assistant diagnose for subclinical keratoconus by artificial intelligence [J]. Chin J Ophthalmol, 2019, 55(12) : 911-915. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2019.12.008.
- [48] Xie Y, Zhao L, Yang X, et al. Screening candidates for refractive surgery with corneal tomographic-based deep learning [J]. JAMA Ophthalmol, 2020, 138(5) : 519-526. DOI: 10.1001/jamaophthalmol.2020.0507.
- [49] Cui T, Wang Y, Ji S, et al. Applying machine learning techniques in nomogram prediction and analysis for SMILE treatment [J]. Am J Ophthalmol, 2020, 210 : 71-77. DOI: 10.1016/j.ajo.2019.10.015.
- [50] Xin C, Bian GB, Zhang H, et al. Optical coherence tomography-based deep learning algorithm for quantification of the location of the intraocular lens [J/OL]. Ann Transl Med, 2020, 8(14) : 872 [2021-08-01]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32793716/>. DOI: 10.21037/atm-20-4706.
- [51] Carmona González D, Palomino Bautista C. Accuracy of a new intraocular lens power calculation method based on artificial intelligence [J]. Eye (Lond), 2021, 35(2) : 517-522. DOI: 10.1038/s41433-020-0883-3.
- [52] Koprowski R, Lanza M, Irregolare C. Corneal power evaluation after myopic corneal refractive surgery using artificial neural networks [J/OL]. Biomed Eng Online, 2016, 15(1) : 121 [2021-08-01]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27846894/>. DOI: 10.1186/s12938-016-0243-5.
- [53] Khamar P, Chandapura R, Shetty R, et al. Epithelium zernike indices and artificial intelligence can differentiate epithelial remodeling between flap and flapless refractive procedures [J]. J Refract Surg, 2020, 36(2) : 97-103. DOI: 10.3928/1081597X-20200103-01.

(收稿日期:2021-08-04 修回日期:2021-11-01)

(本文编辑:尹卫靖 刘艳)

读者·作者·编者

本刊投稿方式

初次投稿作者请按照下列步骤投稿:登陆中华医学会网站(<http://www.cma.org.cn>)→点击页面右上角的“注册”→选项注册账号→返回首页→点击页面右下方的“申请成为杂志作者”成为本刊作者进行投稿。投稿时请使用 Word 格式(.doc 文件类型),投稿后请注意自留原稿,并保留论文相关的原始资料,以备稿件修改补充所用。投稿后请从“业务中心”下载“中华医学会系列杂志论文投送介绍信及授权书(中文版)”,填写有关项目并请每位作者亲笔签字,加盖单位公章后寄 2 份至本刊编辑部,其中作者签名顺序和作者单位著录名称应与投稿时文章中著录的相一致,如有变更应由每位作者同意并请通信作者告知编辑部。投稿请注意:(1)在非公开刊物发表的稿件、学术会议交流的文章、已用非中文文字期刊发表的文稿不属于一稿两投,但投稿时应向编辑部说明,非中文文字期刊已发表的文稿须征得首次发表期刊的同意。(2)作者须告知与该研究有关的利益冲突,如该研究被某机构资金资助的声明或与审稿人的利益关系。(3)如涉及保密问题,需附有关部门审查同意发表的证明。

(本刊编辑部)