

doi:10.6040/j.issn.1673-3770.0.2023.176

# 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术对眼高阶像差影响的研究进展

杜一帆<sup>1</sup>, 齐林嵩<sup>2</sup>, 李莹<sup>1</sup>

1. 中国医学科学院北京协和医学院 眼科, 北京 100730

2. 空军特色医学中心 眼科, 北京 100142

**摘要:** 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 是目前临床矫正近视的主流手术方式之一, 由于其具有准确、安全、可预测及恢复快等优点, 目前已在临床广泛开展。但术后由高阶像差 (high order aberration, HOA) 产生的夜间视力下降、眩光、光晕、星芒等视觉症状影响着手术人群的视觉质量。本文通过总结有关 SMILE 术后 HOA 的变化研究, 发现虽然 SMILE 不可避免引入 HOA, 但相比于部分其他类型的屈光手术能够明显地减少术后 HOA 的诱导, 尤其是总 HOA 及球差的诱导, 甚至与波前像差引导的个性化切削无明显差异。而术前近视及散光程度、术中角膜帽厚度、激光能量、集中度及定位方法的选择等也均会影响着术后 HOA 的大小, 各类 HOA 的产生的影响机制及与 SMILE 的关系尚待进一步研究。

**关键词:** 高阶像差; 近视; 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术

**中图分类号:** R778 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3770(2025)01-0152-10

**引用格式:** 杜一帆, 齐林嵩, 李莹. 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术对眼高阶像差影响的研究进展[J]. 山东大学耳鼻喉眼学报, 2025, 39(1):152-161. DU Yifan, QI Linsong, LI Ying. Advancements in understanding how small incision lenticule extraction impacts ocular high order aberrations[J]. Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University, 2025, 39(1):152-161.

## Advancements in understanding how small incision lenticule extraction impacts ocular high order aberrations

DU Yifan<sup>1</sup>, QI Linsong<sup>2</sup>, LI Ying<sup>1</sup>

1. Department of Ophthalmology, Peking Union Medical College, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100730, China

2. Department of Ophthalmology, Air Force Medical Center, Beijing 100142, China

**Abstract:** Small incision lenticule extraction (SMILE) is a prominent corneal refractive surgery method for addressing myopia. It employs femtosecond laser technology to create a lenticule within the cornea, which is then removed through small incisions around the cornea. This procedure has gained popularity in clinical practice due to its notable advantages including precision, safety, predictability, and swift recovery times. However, post-SMILE surgery, some patients experience visual symptoms like reduced nighttime vision, glare, halos, and starbursts, attributed to high order aberrations (HOAs), which affect the visual quality of the patients. This review examines the impact of SMILE surgery on HOAs and observes that while SMILE does introduce HOAs, it tends to minimize the induction of postoperative HOAs compared to certain other refractive surgery techniques. Notably, it significantly reduces total HOAs and spherical aberrations and, in some cases, even shows no significant difference when compared to personalized treatments guided by wavefront aberrations. Several factors influence the extent of post-SMILE HOAs, including the degree of preoperative myopia and astigmatism, corneal cap thickness during surgery, laser energy, concentration, and choice of positioning methods. However, further research is required to delve into the mechanisms behind various HOAs and their relationship with SMILE surgery.

**Key words:** High order aberration; Myopia; Small incision lenticule extraction

预计到 2050 年, 全世界约有 49.8% 人口将患有不同程度的近视, 其中高度近视约占总人口的 9.8%<sup>[1]</sup>。目前东亚地区年轻人近视患病率达 80%~90%<sup>[2]</sup>。飞秒激光小切口角膜基质透镜取出

术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 作为一种目前临床广泛开展的角膜屈光手术, 利用飞秒激光产生的光裂解作用对角膜基质进行切割, 分离出基质内透镜后通过微小切口取出的方式来减小角

收稿日期: 2023-04-05

基金课题: 国家自然科学基金 (82000863)

通信作者: 李莹. E-mail: liyingpumch@126.com

膜屈光力,达到矫正近视的效果<sup>[3-4]</sup>。SMILE 减少了术后角膜的刺激症状,同时角膜生物力学稳定性更佳<sup>[5]</sup>。然而无论在哪种屈光性角膜手术中,医源性诱导的高阶像差(high order aberration, HOA)超过一定阈值会增加出现光晕、星芒和眩光等视觉症状的风险<sup>[6]</sup>,因此越来越多的学者开始关注于术后 HOA 诱导问题。Xia 等<sup>[7]</sup>发现与术前相比,SMILE 术后总 HOA 和垂直彗差明显升高,而 Kwak 等<sup>[8]</sup>发现 SMILE 不会引起球差,Zhong 等<sup>[9]</sup>则发现 SMILE 术后球差、彗差明显增加。随后有研究通过对术前角膜或眼波前像差进行“定制”,实现了角膜 HOA 的受控调制,解决先前存在的 HOA 并防止新的 HOA<sup>[10]</sup>。尽管有这些明显的技术优势,关于定制治疗与 SMILE 技术相比术后 HOA 水平是否更低,目前的数据非常矛盾<sup>[11]</sup>,术后 HOA 的大小及其对 HOA 变化的影响尚无明确定论。本文旨在通过总结归纳有关 HOA 的相关研究,并从中对比 SMILE 及其他屈光手术术后 HOA 引入差异,探讨影响 SMILE 诱导 HOA 大小的因素,进一步为选择更安全有效的方式减轻术后 HOA 提供指导和帮助。

## 1 HOA 的概念及其形成原因

### 1.1 波前像差及 HOA 的概念

传统光学理论认为,理想状况下光线经过折射可以很好地会聚成一个焦点。实际情况下由于光束的波长、不同介质的折射率、介质的均匀性及平整性等因素,光线不能完全会聚,最终使得成像与实际物像存在差距,这种差异即叫做像差<sup>[12]</sup>。从物理学角度来看,光线是一种行进电磁波,所以同一节点的所有光线构成的平面叫做波阵面,因此可将像差定义为参考波阵面与实际波阵面之间的差别,也称波前像差<sup>[13-14]</sup>。如何对波前像差进行描述一直是物理学中的难题。随着数学及计算机函数的发展,Zernike 等<sup>[15]</sup>归纳总结出了 Zernike 多项式来描述波前像差,其将波前像差分解成多个阶像差,从而更加具体化地描述波前像差的类型及高低。目前常用的 Zernike 多项式为 6 阶 27 项,其中 1 阶和 2 阶为低阶像差(如离焦及规则散光等),3 阶及以上的像差则称为 HOA,不能被传统的框架眼镜或接触镜所矫正<sup>[16]</sup>。正常情况下,人眼波前像差以低阶像差为主,HOA 极少<sup>[17]</sup>。最近的研究表明人眼波前像差尤其是 HOA 与视觉质量有着密切联系,HOA 的减少将可能是改善视觉质量及功能的关键因素<sup>[18-19]</sup>。

### 1.2 HOA 的形成原因及影响因素

人眼 HOA 的产生可由多种因素引起,角膜因素是其中最关键的一部分。首先角膜前表面类似于一种凸起的帽状结构,其中央 4 mm 区域近似球形,越往周边越平坦,其次角膜顶点处有时并不位于角膜的几何中心,光线被人眼屈光介质折射时并不能达到所有方向完全对称,且角膜为天然生长形成,无论先天异常还是后天损伤等均会导致角膜并不像理想光学平面那样平整,因此各点的厚度和曲率并不一致,而这些角膜不对称性和表面不规则性是影响人眼 HOA 的关键因素之一<sup>[20]</sup>。除了角膜因素,屈光介质的其他组成部分也或多或少决定着 HOA 的大小。晶状体作为人眼屈光力调节的关键,其前表面并不平滑,存在不对称性和表面不规则性。随着年龄增加,晶状体核发生硬化、皮质浑浊,引起各部分屈光力发生较大偏差,也会导致 HOA 的增加<sup>[21]</sup>。其他如泪膜的均匀和稳定性、房水的性状、玻璃体是否液化脱离、角膜和晶状体的光学中心对应程度、Kappa 角的大小等,他们互相叠加或抵消,形成了人眼最终的 HOA<sup>[13]</sup>。

此外人眼还有多种因素决定着 HOA 的大小。在年轻近视人群中,角膜 HOA 占主导地位,随着年龄的增长角膜和晶状体之间失去了像差平衡,眼介质的透明度下降(例如晶状体混浊、玻璃体变性),导致进一步的 HOA 变化<sup>[22]</sup>。屈光不正也是影响 HOA 的关键因素,Marcos 等<sup>[23]</sup>报道 HOA 会随着近视度数的增加而增加,但这种影响仅适用于  $7.0\text{ m}^{-1}$  至  $13.0\text{ m}^{-1}$  范围内的近视。Hughes 等<sup>[24]</sup>则发现了散光与 HOA 间的关系,他们的研究证实平均最陡 k 值与总 HOA 的相关性最高( $P < 0.001$ ),散光可能会限制未矫正的视力并导致夜间星芒和眩光。对于瞳孔大小,Martinez 等<sup>[25]</sup>发现当瞳孔从 3 mm 扩大到 7 mm 时,总 HOA 和彗差会明显增加。Peng 等<sup>[26]</sup>则证明,光学区直径大于暗瞳孔直径时,近视患者术后主观满意度明显提升,且角膜总 HOA、彗差及球差的增加相应减少。不同类型的白内障也可导致 HOA 增加<sup>[27]</sup>,如晶状体皮质浑浊可导致彗差及三叶草像差增加,晶状体核浑浊则可导致球差及三叶草像差增加。眼的调节也在决定 HOA 大小方面起着作用,Cheng 等<sup>[28]</sup>的调查研究发现,HOA 会随着眼的调节而变化,虽然其变化幅度无论如何也小于眼原有的 HOA。同时在全球 HOA 中,球差随调节的变化最大,而彗差也随调节变化,但并不规则。其他如眼部手术、眼别、角膜塑形镜的佩戴,甚至脉搏及心率均可能与 HOA 有关<sup>[13,29-30]</sup>,因此 HOA 受全身多种因素影响,他们的

相互关系还需进一步研究发现。

## 2 SMILE 及其他屈光手术对 HOA 引入大小的对比

### 2.1 SMILE 与准分子激光角膜切削术

准分子激光角膜切削术 (photorefractive keratectomy, PRK) 是角膜屈光手术中开展较早的一种类型,它通过准分子激光直接在角膜表面进行切削,安全性和矫正效果已得到了众多专家及学者的认可,但其术后恢复慢、疼痛及角膜上皮下雾状浑浊 (Haze) 等并发症的问题也无法忽视。PRK 引入 HOA 多与角膜切削的直径及深度、术后用药等相关<sup>[31]</sup>。Ganesh 等<sup>[32]</sup>对行 PRK 和 SMILE 的中低度近视人群 HOA 变化进行对比,结果显示术后 3 个月 SMILE 组和 PRK 组患者角膜 HOA 均增加,但 SMILE 引入的角膜 HOA 明显小于 PRK,且术后视觉质量更好。PRK 术后疼痛、Haze 及其他并发症的发生明显多于 SMILE,且需要角膜上皮愈合的时间更长,术后随访时间更久,因此在临床中多采用 SMILE 等屈光术式。PRK 适用于角膜厚度过薄患者以防止术后医源性角膜扩张的风险,但随着近视人群对术后视觉质量要求的不断提高,PRK 引入 HOA 的问题也应纳入手术方式选择的考虑范围。

### 2.2 SMILE 与上皮瓣下准分子激光角膜原位磨镶术

上皮瓣下准分子激光角膜原位磨镶术 (laser-assisted subepithelial keratomileusis, LASEK) 可被认为是改良的 PRK 手术,LASEK 需要制作一个直径 60~80  $\mu\text{m}$  的角膜瓣,并在瓣下通过准分子进行角膜切削。LASEK 具有很好的安全性、有效性和术后视觉质量,相较于 PRK 可以极大减少术后 Haze 的发生。Yu 等<sup>[33]</sup>发现 SMILE 术后患者的角膜总 HOA 和球差增加均明显低于 LASEK 组,同时无论在术后早期还是晚期,SMILE 在减少角膜 HOA 诱导方面均优于 LASEK。而 Fu 等<sup>[34]</sup>则发现 SMILE 与 LASEK 相比引入的角膜球差更小,但垂直彗差更大,研究推测这可能是切削时注视集中度不佳所致。我们认为 LASEK 引入球差更多的原因可能在于周边角膜与激光束并非完全的垂直关系,所以切削周边部时会导致准分子激光能量的丧失,进而使切削区边缘矫正不足,导致球差的增加。而 SMILE 手术则是直接采用飞秒激光切割透镜,因此不存在消融区边缘激光能量丧失的情况。相较于 SMILE, LASEK 保留了更多的角膜组织,术后发生角膜扩张的概率也大大降低。因此同样对于角膜厚度过薄而不宜行 SMILE 的近视人群来说,LASEK 也是安全

有效的手术方式,但同样应酌情考虑术后引入 HOA 的问题。

### 2.3 SMILE 与飞秒制瓣准分子激光角膜原位切削术

飞秒制瓣准分子激光角膜原位切削术 (femtosecond laser-assisted in situ keratomileusis, FS-LASIK) 是目前世界上矫正近视较为主流的角膜屈光手术之一,其通过飞秒制瓣加准分子切削的方式完成对角膜屈光力的改变,在矫正近视和散光等问题取得了良好的效果,且疗效以及安全性已得到广泛验证,术后大部分近视人群可以获得良好的视觉质量<sup>[35]</sup>。FS-LASIK 与 SMILE 对比最大的区别在于切口大小、角膜瓣的有无以及切削基质的方式,这些因素均影响着术后 HOA 的差异。Hu 等<sup>[36]</sup>发现 SMILE 术后的角膜 HOA 小于 FS-LASIK,但两组的角膜 HOA 均较术前增加,各指标差异有统计学意义。Ganesh 等<sup>[32]</sup>随机选取近视人群分别行 SMILE 与 FS-LASIK 手术,结果发现 SMILE 术后 3 个月角膜 HOA 的引入更少,可见飞秒激光切削角膜组织的形式比准分子切削提供了更光滑的平面,同时我们也认为小切口的设计也可一定程度地减轻角膜表面的不平整度。

对于各类 HOA, Li 等<sup>[37]</sup>对比了近视人群行 FS-LASIK 和 SMILE 术后 1、3 个月角膜 HOA 的变化,结果发现 SMILE 组术后角膜总 HOA 和球差的增多低于 FS-LASIK 组。Wang 等<sup>[38]</sup>则发现 FS-LASIK 术后 1 个月角膜 HOA 增加以球差、彗差、倾斜三叶草像差为主,SMILE 术后 1 个月角膜 HOA 增加以球差为主,且 SMILE 比 FS-LASIK 在术后 1 个月球差、倾斜三叶草像差、角膜总 HOA 的诱导方面明显减小。Wu 等<sup>[39]</sup>的研究也有相似的结果。我们认为这可能与激光切削模式、矫正距离、术后炎症等因素有一定关系,如前文所述,准分子激光对周边消融区存在欠矫现象,这会导致球差的增加,同时 FS-LASIK 行激光治疗时与角膜间隔一定距离,SMILE 则与角膜直接接触,因此 SMILE 对角膜光区定位更为准确,这也导致了 FS-LASIK 术后 HOA 的增加。由于角膜屈光术后的愈合是一个非常复杂的过程,而 SMILE 可避免因制作角膜瓣而产生过多的炎症,这也是减少 HOA 增加的有效途径。除上述原因之外,FS-LASIK 在术中及术后还可能发生如角膜瓣移位、愈合不良、上皮内植入等不良反应,以上均可引入 HOA,进而影响术后的视觉质量。虽然 SMILE 无论在切削平整性还是偏心切削发生率方面均比 FS-LASIK 具备优势,但这两种手术方式均会增加术后 HOA, SMILE 所带来的 HOA 比

LASIK 更小,尤其是球差。

## 2.4 SMILE 与波前像差引导的屈光手术

波前像差引导的个性化屈光手术可对不同类型的像差进行针对性矫正,尽可能地减少术后像差的增加。Lee 等<sup>[40]</sup>评价了波前像差引导的经上皮准分子激光角膜切削术(wavefront-guided trans-epithelial photorefractive keratectomy, WFG-TPRK)和 SMILE 术后角膜 HOA 的变化,结果发现 SMILE 术后角膜总 HOA 增加程度与 WFG-TPRK 相似,而 SMILE 诱导的球差更小、彗差更大。Ye 等<sup>[41]</sup>在 SMILE 与波前像差引导的 LASIK(wavefront-guided LASIK, WFG-LASIK)对比中也发现 SMILE 具有更好的降低球差诱导的能力,不过与 WFG-LASIK 相比,SMILE 也产生了更多的角膜彗差。我们认为这可能是由于 SMILE 在术中的程序集中度不如 WFG-LASIK 精确,同时这与 Chen 等<sup>[42]</sup>和 Dong 等<sup>[43]</sup>的发现相似。WFG 屈光手术拥有 SMILE 所

不具备的眼球追踪系统,因此减弱了注视集中度差导致的切削偏心的影响,这使得 WFG 屈光手术产生了更小的彗差。SMILE 球差更小的原因类似前文所述,应该与激光切削方式及有无角膜瓣相关。不过也有研究发现了不同的结果,Shetty 等<sup>[44]</sup>比较了 WFG-LASIK 和 SMILE 的术后全眼和角膜 HOA 差异,结果证实两者术后诱导的各类 HOA 差异无统计学意义,但 WFG-LASIK 术后的人群视力更好。以上研究说明 SMILE 与 WFG 屈光手术所带来的 HOA 引入差距甚小,只是在个别类型的 HOA 中还存在差异。但 SMILE 无法像准分子激光一样进行像差及散光的个性化定制,因此有理由相信 WFG 屈光手术的发展依然在降低术后 HOA 方面存在独特优势,这为传统的 LASIK 等术式提供了新的价值。相关研究中 SMILE 手术前后的 HOA 变化见表 1<sup>[8, 11, 33, 36-42, 45-52]</sup>。

表 1 相关研究中 SMILE 及其他屈光手术的术前与术后 HOA 的变化

Table 1 Preoperative and postoperative HOA of SMILE and other refractive surgeries in relevant studies

研究	时间	眼数	检查仪器/部位	手术方式	随访时间/月	总 HOA		球差		彗差		三叶草像差	
						术前	术后	术前	术后	术前	术后	术前	术后
胡裕坤等 <sup>[36]</sup>	2013	82	Pentacam HR/角膜	SMILE	3	0.11±0.02	0.19±0.05	0.16±0.08	0.29±0.11	0.03±0.11 <sup>①</sup>	0.08±0.20 <sup>①</sup>	0.05±0.08	0.06±0.14
Li 等 <sup>[37]</sup>	2015	55	Pentacam HR/角膜	SMILE	3	0.33±0.12	0.94±0.23	0.19±0.09	0.49±0.12	0.11±0.10 <sup>①</sup>	0.26±0.18 <sup>①</sup>		
Ye 等 <sup>[41]</sup>	2016	170	Pentacam HR/角膜	SMILE	6	0.15±0.06	0.22±0.06	0.21±0.15	0.38±0.14	0.01±0.13 <sup>①</sup>	0.09±0.22 <sup>①</sup>		
Wu 等 <sup>[39]</sup>	2016	73	Pentacam HR/角膜	SMILE	3	0.37±0.08	0.82±0.24	0.22±0.07	0.48±0.17	0.19±0.09	0.54±0.25	0.10±0.05	0.10±0.06
Chen 等 <sup>[42]</sup>	2017	39	WaveScan/全眼	SMILE	3	0.17±0.06	0.27±0.07	0.06±0.03	0.09±0.05	0.03±0.03 <sup>①</sup>	0.09±0.07 <sup>①</sup>		
李康寓等 <sup>[45]</sup>	2018	70	Pentacam HR/角膜	SMILE	3	0.37±0.02	0.37±0.13	0.20±0.01	0.23±0.11	0.04±0.19 <sup>①</sup>	0.03±0.01 <sup>①</sup>		
Lee 等 <sup>[40]</sup>	2018	81	Placido/角膜	SMILE	6	0.48±0.14	0.61±0.18	0.29±0.10	0.37±0.13	0.28±0.14	0.35±0.19		
Li 等 <sup>[46]</sup>	2019	68	Pentacam HR/角膜	SMILE	3	0.39±0.08	0.81±0.25	0.26±0.08	0.42±0.12	0.20±0.10	0.59±0.28		
Yu 等 <sup>[33]</sup>	2019	32	WASCA/全眼	SMILE	3	0.29±0.11	0.39±0.13	0.19±0.28	0.26±0.28	0.48±0.30	0.73±0.48	0.36±0.24	0.33±0.20
王嘉南等 <sup>[38]</sup>	2019	30	Keratron Scout/角膜	SMILE	1	1.17±0.43	1.14±0.37	0.23±0.09	0.38±0.18	0.04±0.13 <sup>①</sup>	0.09±0.17 <sup>①</sup>	0.01±0.11 <sup>②</sup>	0.03±0.12 <sup>②</sup>
Kwak 等 <sup>[8]</sup>	2020	57	iTrace/角膜	SMILE	3	0.32±0.14	0.46±0.22	0.21±0.08	0.21±0.14	0.14±0.11	0.28±0.17	0.14±0.08	0.17±0.12
Siedlecki 等 <sup>[47]</sup>	2020	394	Pentacam HR/角膜	SMILE	3	0.35±0.09	0.54±0.17	0.21±0.08	0.29±0.14	0.18±0.10	0.32±0.17	0.08±0.05	0.10±0.05
Li 等 <sup>[37]</sup>	2015	51	Pentacam HR/角膜	FS-LASIK	3	0.31±0.14	1.19±0.34	0.18±0.08	0.60±0.17	0.07±0.09 <sup>①</sup>	0.43±0.22 <sup>①</sup>		

续表

研究	时间	眼数	检查仪器/部位	手术方式	随访时间/月	总 HOA		球差		彗差		三叶草像差	
						术前	术后	术前	术后	术前	术后	术前	术后
Wu 等 <sup>[39]</sup>	2016	52	Pentacam HR/角膜	FS-LASIK	3	0.34±0.09	0.89±0.26	0.20±0.05	0.53±0.20	0.19±0.11	0.59±0.26	0.08±0.04	0.10±0.06
Ye 等 <sup>[41]</sup>	2016	88	Pentacam HR/角膜	FS-LASIK	6	0.15±0.04	0.25±0.07	0.23±0.14	0.52±0.20	0.00±0.16 <sup>①</sup>	0.01±0.57 <sup>①</sup>		
Li 等 <sup>[46]</sup>	2019	55	Pentacam HR/角膜	FS-LASIK	3	0.39±0.10	0.83±0.30	0.27±0.07	0.60±0.16	0.18±0.10	0.45±0.31		
Yang 等 <sup>[48]</sup>	2019	23	WASCA/全眼	FS-LASIK	6	0.30±0.12	0.49±0.10	0.07±0.18	0.33±0.13	0.14±0.10	0.27±0.17	0.13±0.07	0.12±0.06
Hamilton 等 <sup>[49]</sup>	2020	38	Galilei G4/角膜	FS-LASIK	1	0.38±0.12	0.57±0.13	0.20±0.06	0.39±0.11	0.24±0.10	0.32±0.14		
Yin 等 <sup>[50]</sup>	2021	49	iTrace/全眼	FS-LASIK	6	0.49±0.38	0.71±0.58	0.05±0.12	0.27±0.40	0.27±0.30	0.54±0.44	0.25±0.20	0.14±0.10
Jun 等 <sup>[51]</sup>	2018	44	Optikon/角膜	WFG-PRK	6	0.55±0.15	0.59±0.15	0.29±0.12	0.38±0.17	0.31±0.14	0.22±0.11	0.23±0.13	0.17±0.09
Lee 等 <sup>[40]</sup>	2018	77	Placido/角膜	WFG-PRK	6	0.50±0.13	0.68±0.20	0.29±0.08	0.51±0.20	0.28±0.14	0.27±0.14		
Ye 等 <sup>[41]</sup>	2016	119	Pentacam HR/角膜	WFG-LASIK	6	0.16±0.06	0.23±0.09	0.22±0.18	0.42±0.15	0.01±0.14 <sup>①</sup>	0.05±0.23 <sup>①</sup>		
Chen 等 <sup>[42]</sup>	2017	26	WaveScan/全眼	WFG-LASIK	3	0.16±0.06	0.25±0.09	0.05±0.03	0.07±0.05	0.05±0.04 <sup>①</sup>	0.08±0.06 <sup>①</sup>		
Gulmez 等 <sup>[52]</sup>	2020	94	WaveLight/角膜	WFG-LASIK	6	0.18±0.09	0.27±0.10	0.16±0.05	0.27±0.05	0.07±0.02	0.16±0.02	0.06±0.03	0.13±0.01
Zhang 等 <sup>[11]</sup>	2022	100	Sirius/角膜	WFG-LASIK	6	0.42±0.13	0.73±0.23	0.22±0.07	0.47±0.19	0.22±0.13	0.40±0.22		

注:①该项为水平彗差;②该项为水平三叶草像差。

### 3 SMILE 诱导 HOA 大小的影响因素

#### 3.1 切削透镜厚度

近视程度越高 SMILE 切削的透镜越厚,角膜不平整性、生物力学的不稳定性及术后视觉质量问题也会越容易发生。在分组对比中, Jin 等<sup>[53]</sup>研究发现高度近视组(球镜大于 $-6\text{ m}^{-1}$ )进行 SMILE 后角膜 HOA 的引入明显多于非高度近视组(球镜小于 $-6\text{ m}^{-1}$ ),且角膜 HOA 会随着切削角膜透镜厚度的增加而增大,这尤其体现在垂直彗差和球差中。Xia 等<sup>[7]</sup>的研究中证实了这一点,不过他们发现中高度近视进行 SMILE 手术前后的球差差异无统计学意义,我们认为这可能与研究选择的瞳孔直径较小(5 mm)有关。Gyldenkerne 等<sup>[54]</sup>发现在高度近视(球镜大于 $-6\text{ m}^{-1}$ )患者中行 FS-LASIK 比行 SMILE 时的角膜彗差增加了  $0.11\text{ }\mu\text{m}$ ,球差增加了  $0.13\text{ }\mu\text{m}$ 。而 Yin 等<sup>[50]</sup>发现在高度近视组中,虽然 FS-LASIK 及 SMILE 术后的角膜球差和彗差均明显增加,但 FS-LASIK 术后 1 个月时的角膜总 HOA 和彗差均高

于 SMILE 术后。我们认为切削透镜厚度影响 HOA 的作用机制应是厚度的增加导致术后角膜结构的不平整性越高,这会不可避免地引入更多的 HOA,而球差的增大也与切削透镜的厚度有关,切削区域与未切削区域连续性及平整性越差可导致更多的球差诱导。垂直彗差的增加可能与切削后不稳定的角膜结构相关,也可能与高度近视带来了更多的角膜不平整性有关。但无论近视程度大小,SMILE 相对而言依然是一种安全稳定的屈光手术选择,它在减少术后 HOA 诱导方面依然优于 FS-LASIK 及其他屈光手术。

#### 3.2 散光矫正程度

散光也是决定人眼 HOA 大小的影响因素之一。Zhong 等<sup>[9]</sup>发现 SMILE 术后高散光组(柱镜大于 $-2\text{ m}^{-1}$ )和低散光组(柱镜小于 $-2\text{ m}^{-1}$ )患者角膜总 HOA、球差及彗差均明显增加,但两组增加的角膜总 HOA、球差及彗差差异无统计学意义。Ding 等<sup>[55]</sup>的研究结果则证实低散光组(柱镜小于 $-2\text{ m}^{-1}$ )在 SMILE 术后引入的角膜球差明显高于高散光组(柱镜大于 $-2\text{ m}^{-1}$ ),两组术后的角膜总 HOA、彗差和三

叶草像差的引入差异无统计学意义。不一致的原因可能是该研究低散光组的球镜度数明显大于高散光组。由此可知,SMILE 矫正散光的大小对 HOA 的引入大小并未有明显的影 响,这可能是由于验光所得到的柱镜值并不能代表角膜表面的平整程度,因此角膜地形的不平整性可能是影响 HOA 引入大小的关键。由于研究数量较少、混杂因素多等原因也使得结果不确定性较高,同时缺乏进一步的对比研究,因此具体原因还需探讨。

### 3.3 术中角膜定位及注视集中方式

对于手术本身的效果而言,术中如何更好的对切削区域进行定位及保证手术人群注视集中是减少术后 HOA 的关键。Kappa 角的大小是术前衡量注视集中程度的指标之一。Kappa 角是瞳孔轴与视轴之间的夹角,Kappa 角越大患者注视集中度越差。Shao 等<sup>[56]</sup>探讨了 Kappa 角大小对 SMILE 前后全眼 HOA 的影响,结果发现术后较大 Kappa 角组全眼总 HOA、彗差及第三阶像差均大于较小 Kappa 角组,差异均有统计学意义,且 Kappa 角与眼总 HOA、彗差及第三阶像差呈正相关。SMILE 手术系统尚缺乏眼球跟踪系统,而这更容易导致偏中心切削及彗差的产生,Chan 等<sup>[57]</sup>的研究也证实 SMILE 术中注视的偏离与角膜彗差和总 HOA 的诱导有关。针对此问题,Kang 等<sup>[58]</sup>设计了一种术中三焦点定位法,它可通过术前提在裂隙灯处标记 3 个集中点(左、右及上方),术中可根据此三点引导正确的定位,随后研究测试了在 SMILE 术中利用三焦点法定位时对角膜 HOA 的诱导作用,结果发现仅角膜总 HOA 和垂直彗差存在明显引入。Jun 等<sup>[51]</sup>利用该技术改良后的 SMILE 与 WFG-TPRK 进行了矫正效果的对比,结果发现这两种手术方式在诱导角膜总 HOA 方面无显著差异,改良 SMILE 诱导更少的球差,但诱导更多的彗差及三叶草像差。除了三焦点定位法,Liu 等<sup>[59]</sup>还对比了 SMILE 利用传统瞳孔定位法与泪膜标记定位法对角膜 HOA 的诱导作用,结果发现传统瞳孔定位法术后的各类角膜 HOA 诱导均较显著,而泪膜定位法术后的角膜 HOA 引入不明显。由此可见,手术定位方式及注视集中度可影响 SMILE 引入 HOA 的大小,机制在于术中的集中可最大限度的减少偏心的发生,从而减少彗差引入,而切削过程中的稳定也可增加平整度,进而减少总 HOA 及其他类型 HOA 的引入。因此通过三焦点定位法、泪膜标记定位法等方式提高术中切削集中度,可明显减轻术后 HOA 的诱导,为改善近视人群术后视觉质量提供帮助。

### 3.4 其他因素

术中切削光学区的大小、飞秒激光能量的高低以及 SMILE 预留的角膜帽厚度等也影响着术后 HOA 引入的程度。Li 等<sup>[60]</sup>探讨了 SMILE 选择不同大小的切削光学区进行手术后全眼 HOA 的产生情况,结果发现在术后 1 个月 6.5 mm 光学区组的彗差明显低于 6.0 mm 光学区组,而其余各项全眼 HOA 差异均无统计学意义,这可能与特殊的手术方式及伤口愈合反应有关。Hamilton 等<sup>[49]</sup>比较了 SMILE 使用低能量(4.5 光斑间距/125~130 nJ)与高能量(3.0 光斑间距/125 nJ)激光的术后角膜 HOA 差异,结果发现高能量组比低能量组引入了更多的角膜总 HOA 及球差,而所有其他角膜 HOA 的诱导相似。这可能是由于较高的能量导致切削的不平整性增加,进而导致引入球差增大。Jun 等<sup>[61]</sup>比较了进行 SMILE 手术选择预留 120  $\mu\text{m}$  和 140  $\mu\text{m}$  角膜帽的术后角膜 HOA 变化,结果发现 120  $\mu\text{m}$  组术后角膜总 HOA 和球差明显低于 140  $\mu\text{m}$  组。尽管采用不同角膜帽厚度的 SMILE 均是有效的,但预留更厚的角膜帽可能与术后角膜 HOA 的增加有关,原因可能是较深的切削会导致角膜后部基质变得更薄,并对角膜生物力学造成影响。由于较浅的切削会影响角膜神经并导致术后干眼的加重,所以合适的切削深度还需要更多的研究探讨。其他例如术前中央角膜厚度(central corneal thickness, CCT)、角膜生物力学稳定性等因素也在部分 SMILE 的研究中涉及<sup>[62-63]</sup>,角膜生物力学稳定性与 SMILE 手术后诱发的角膜前表面和总角膜的 3~6 阶 HOAs、球差明显相关。而术前 CCT 的大小未发现对 HOA 的引入有明显影响。由于缺乏更多的研究,结论亦需进一步探讨。上述不同 SMILE 手术参数对术后 HOA 变化的影响见图 1~3。

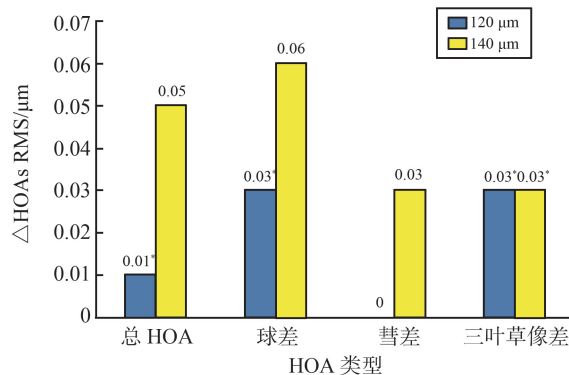


图 1 SMILE 手术前后 HOA 差异对比(不同角膜帽厚度)  
Figure 1 Comparison of differences in HOA before and after SMILE surgery (different corneal cap thickness)

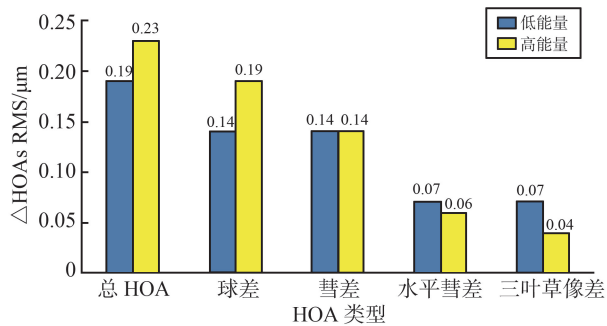


图 2 SMILE 手术前后 HOA 差异对比(不同激光能量)  
Figure 2 Comparison of differences in HOA before and after SMILE surgery (different laser energy)

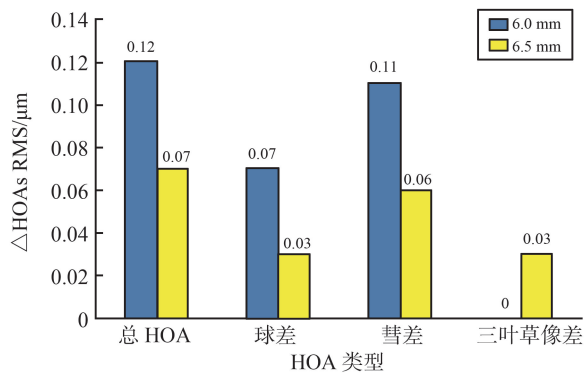


图 3 SMILE 手术前后 HOA 差异对比(不同光学区大小)  
Figure 3 Comparison of differences in HOA before and after SMILE surgery (different optical zone)

综上,切削透镜厚度越大、注视及切削集中越差、术前角膜生物力学稳定度差、角膜帽厚度越厚及激光能量更大等可导致 SMILE 诱导的术后 HOA 更高,而矫正散光程度、术前 CCT 因素目前还未发现与其有明显联系。就影响程度来看,由于角膜帽厚度、激光能量等较为固定,一般设置较少改动,所以在常规 SMILE 中对 HOA 引入不起决定作用,因此切削透镜厚度、注视集中程度及角膜生物力学稳定性是影响术后 HOA 变化的主要因素<sup>[53,57,63]</sup>。

## 4 小 结

SMILE 是一种较为安全有效的屈光手术方式,相比于 FS-LASIK、LASEK 及 PRK 而言,它能够明显减少术后 HOA 的诱导,尤其是减少总 HOA 及球差的引入,这与 SMILE 创造的小切口及激光切削类型有关,而术后彗差的增加则可能关联于术中切削中心的偏差程度。一定条件下 SMILE 降低术后 HOA 的能力可与波前像差引导的个性化屈光手术相媲美。即使在不同度数的近视及散光中,SMILE 依然体现出明显减少术后 HOA 增加的优点。由于不同近视人群的眼部条件、术前术中的各种参数设置等或多或少地影响着 SMILE 引入 HOA 的程度。

因此在临床中选择术式时除了考虑安全性、有效性及术后并发症多少等因素的同时还应重点考虑术后 HOA 的引入情况,并可根据相关影响因素尽可能的降低 HOA 引入,从而保证近视人群术后的视觉质量。

## 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] Wu PC, Huang HM, Yu HJ, et al. Epidemiology of Myopia[J]. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*, 2016, 5(6): 386-393. doi: 10.1097/APO.0000000000000236
- [3] Huang G, Melki S. Small incision lenticule extraction (SMILE): myths and realities[J]. *Semin Ophthalmol*, 2021, 36(4): 140-148. doi: 10.1080/08820538.2021.1887897
- [4] Blum M, Kunert KS, Sekundo W. Historical overview of the clinical development of the small incision lenticule extraction surgery (SMILE)[J]. *Klin Monbl Augenheilkd*, 2017, 234(1): 117-122. doi:10.1055/s-0042-115944
- [5] Krueger RR, Meister CS. A review of small incision lenticule extraction complications[J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2018, 29(4): 292-298. doi:10.1097/ICU.0000000000000494
- [6] Wen DZ, McAlinden C, Flitcroft I, et al. Postoperative efficacy, predictability, safety, and visual quality of laser corneal refractive surgery: a network meta-analysis[J]. *Am J Ophthalmol*, 2017, 178: 65-78. doi:10.1016/j.ajo.2017.03.013
- [7] Xia F, Shen Y, Han T, et al. Small incision lenticule extraction (SMILE) for moderate and high myopia: seven-year outcomes of refraction, corneal tomography, and wavefront aberrations[J]. *J Ophthalmol*, 2020; 3825864. doi:10.1155/2020/3825864
- [8] Kwak JJ, Jun I, Kim EK, et al. Clinical outcomes of small incision lenticule extraction in myopia: study of vector parameters and corneal aberrations[J]. *Korean J Ophthalmol*, 2020, 34(1): 76-84. doi: 10.3341/kjo.2019.0109
- [9] Zhong YY, Li M, Han T, et al. Four-year outcomes of small incision lenticule extraction (SMILE) to correct high myopic astigmatism[J]. *Br J Ophthalmol*, 2021, 105(1): 27-31. doi:10.1136/bjophthalmol-2019-315619
- [10] Manche E, Roe J. Recent advances in wavefront-guided LASIK[J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2018, 29(4): 286-291. doi:10.1097/ICU.0000000000000488
- [11] Zhang Y, Sun XX, Chen YG. Comparison of corneal

- optical quality after SMILE, wavefront-optimized LASIK and topography-guided LASIK for myopia and myopic astigmatism[J]. *Front Med*, 2022, 9: 870330. doi:10.3389/fmed.2022.870330
- [12] Atchison DA, Thibos LN. Optical models of the human eye[J]. *Clin Exp Optom*, 2016, 99(2): 99-106. doi: 10.1111/cxo.12352
- [13] Del águila-Carrasco AJ, Kruger PB, Lara F, et al. Aberrations and accommodation [J]. *Clin Exp Optom*, 2020, 103(1):95-103. doi: 10.1111/cxo.12938
- [14] Moshirfar M, McCaughey MV, Reinstein DZ, et al. Small-incision lenticule extraction[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2015, 41(3): 652-665. doi:10.1016/j.jcrs.2015.02.006
- [15] McAlinden C, McCartney M, Moore J. Mathematics of Zernike polynomials: a review[J]. *Clin Exp Ophthalmol*, 2011, 39(8): 820-827. doi: 10.1111/j.1442-9071.2011.02562.x
- [16] Gomes J, Sapkota K, Franco S. Central and peripheral ocular high-order aberrations and their relationship with accommodation and refractive error: a review [J]. *Vision*, 2023, 7(1): 19. doi:10.3390/vision7010019
- [17] Kaemmerer M, Mrochen M, Mierdel P, et al. Clinical experience with the tscherning aberrometer[J]. *J Refract Surg*, 2000, 16(5): S584-S587. doi: 10.3928/1081-597X-20000901-20
- [18] Lazaridis A, Droutsas K, Sekundo W, et al. Corneal Clarity and Visual Outcomes after Small-Incision Lenticule Extraction and Comparison to Femtosecond Laser-Assisted In Situ Keratomileusis [J]. *J Ophthalmol*, 2017; 5646390. doi: 10.1155/2017/5646390
- [19] Schmelter V, Dirisamer M, Siedlecki J, et al. Determinants of subjective patient-reported quality of vision after small-incision lenticule extraction[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2019, 45(11): 1575-1583. doi: 10.1016/j.jcrs.2019.06.012
- [20] Wang J, Ren YL, Liang K, et al. Changes of corneal high-order aberrations after femtosecond laser-assisted in situ keratomileusis [J]. *Medicine*, 2018, 97(18): e0618. doi:10.1097/MD.0000000000010618
- [21] Shao X, Zhou KJ, Pan AP, et al. Age-related changes in corneal astigmatism[J]. *J Refract Surg*, 2017, 33(10): 696-703. doi:10.3928/1081597X-20170718-04
- [22] Zhang M, Jing QH, Chen JH, et al. Analysis of corneal higher-order aberrations in cataract patients with high myopia[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2018, 44(12): 1482-1490. doi:10.1016/j.jcrs.2018.07.048
- [23] Marcos S, Barbero S, Llorente L, et al. Optical response to LASIK surgery for myopia from total and corneal aberration measurements [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2001, 42(13): 3349-3356
- [24] Hughes RP, Vincent SJ, Read SA, et al. Higher order aberrations, refractive error development and myopia control: a review[J]. *Clin Exp Optom*, 2020, 103(1): 68-85. doi:10.1111/cxo.12960
- [25] Martínez CE, Applegate RA, Klyce SD, et al. Effect of pupillary dilation on corneal optical aberrations after photorefractive keratectomy [J]. *Arch Ophthalmol*, 1998, 116(8): 1053-1062. doi:10.1001/archoph.116.8.1053
- [26] 彭娇, 钟定娟, 陈蛟, 等. 光学区直径与暗瞳直径的关系对不同程度近视患者 SMILE 术后视觉质量的影响 [J]. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2022, 36(2): 100-107. doi:10.6040/j.issn.1673-3770.0.2021.539  
PENG Jiao, ZHONG Dingjuan, CHEN Jiao, et al. The effect of the relationship between the diameter of the optical zone and the diameter of the dark pupil on the visual quality of patients with different degrees of myopia after SMILE[J]. *Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University*, 2022, 36(2): 100-107. doi:10.6040/j.issn.1673-3770.0.2021.539
- [27] Sachdev N, Ormonde SE, Sherwin T, et al. Higher-order aberrations of lenticular opacities[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2004, 30(8): 1642-1648. doi: 10.1016/j.jcrs.2004.02.048
- [28] Cheng H, Barnett JK, Vilupuru AS, et al. A population study on changes in wave aberrations with accommodation [J]. *J Vis*, 2004, 4(4): 272-280. doi:10.1167/4.4.3
- [29] 毛俊杰, 吕帆, 瞿佳. 配戴角膜矫形镜对角膜形态和单色光波阵面像差的影响 [J]. *中华眼科杂志*, 2004, 40(7): 471-473. doi:10.3760/j.issn: 0412-4081.2004.07.009
- [30] Zhu MX, Collins MJ, Robert Iskander D. Microfluctuations of wavefront aberrations of the eye[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2004, 24(6): 562-571. doi: 10.1111/j.1475-1313.2004.00237.x
- [31] Netto MV, Mohan RR, Sinha S, et al. Stromal haze, myofibroblasts, and surface irregularity after PRK[J]. *Exp Eye Res*, 2006, 82(5): 788-797. doi:10.1016/j.exer.2005.09.021
- [32] Ganesh S, Brar S, Patel U. Comparison of ReLEx SMILE and PRK in terms of visual and refractive outcomes for the correction of low myopia[J]. *Int Ophthalmol*, 2018, 38(3): 1147-1154. doi: 10.1007/s10792-017-0575-6
- [33] Yu MR, Chen MJ, Liu WY, et al. Comparative study of wave-front aberration and corneal Asphericity after SMILE and LASEK for myopia: a short and long term study[J]. *BMC Ophthalmol*, 2019, 19(1): 80. doi:10.1186/s12886-019-1084-3
- [34] Fu MJ, Li MY, Wei RY, et al. Long-term visual quality

- after small incision lenticule extraction (SMILE) and laser assisted subepithelial keratomileusis (LASEK) for low myopia[J]. *BMC Ophthalmol*, 2022, 22(1): 347. doi:10.1186/s12886-022-02568-8
- [35] 周其亮, 周跃华, 周春阳, 等. Trans-PRK、FS-LASIK 和 SMILE 矫正近视散光的对比观察[J]. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2023, 37(1): 85-93. doi:10.6040/j.issn.1673-3770.0.2021.465
- ZHOU Qiliang, ZHOU Yuehua, ZHOU Chunyang, et al. Comparative observation of trans-PRK, FS-LASIK, and SMILE for myopia with astigmatism[J]. *Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University*, 2023, 37(1): 85-93. doi: 10.6040/j.issn.1673-3770.0.2021.465
- [36] 胡裕坤, 李文静, 高晓唯, 等. 飞秒激光微小切口角膜基质透镜切除术治疗近视对角膜波前像差的影响[J]. *眼科新进展*, 2013, 33(7): 651-655. doi:10.13389/j.cnki.rao.2013.07.015
- HU Yukun, LI Wenjing, GAO Xiaowei, et al. Effects of femtosecond laser small incision lenticule extraction on corneal wavefront aberration in the treatment of myopia[J]. *Recent Advances in Ophthalmology*, 2013, 33(7): 651-655. doi:10.13389/j.cnki.rao.2013.07.015
- [37] Li XJ, Wang Y, Dou R. Aberration compensation between anterior and posterior corneal surfaces after Small incision lenticule extraction and Femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2015, 35(5): 540-551. doi:10.1111/opo.12226
- [38] 王嘉南, 肖玥言, 郝平, 等. FS-LASIK 与 SMILE 矫正近视术后角膜高阶像差的变化[J]. *眼科新进展*, 2019, 39(6): 540-543. doi:10.13389/j.cnki.rao.2019.0124
- WANG Jianan, XIAO Yueyan, XI Ping, et al. Changes in higher order aberrations after FS-LASIK versus SMILE for myopia[J]. *Recent Advances in Ophthalmology*, 2019, 39(6): 540-543. doi:10.13389/j.cnki.rao.2019.0124
- [39] Wu WJ, Wang Y. Corneal higher-order aberrations of the anterior surface, posterior surface, and total Cornea after SMILE, FS-LASIK, and FLEx surgeries[J]. *Eye Contact Lens*, 2016, 42(6): 358-365. doi:10.1097/ICL.0000000000000225
- [40] 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
- [41] Ye MJ, Liu CY, Liao RF, et al. SMILE and wavefront-guided LASIK out-compete other refractive surgeries in ameliorating the induction of high-order aberrations in anterior corneal surface [J]. *J Ophthalmol*, 2016; 8702162. doi:10.1155/2016/8702162
- [42] Chen XQ, Wang Y, Zhang JM, et al. Comparison of ocular higher-order aberrations after SMILE and Wavefront-guided Femtosecond LASIK for myopia[J]. *BMC Ophthalmol*, 2017, 17(1): 42. doi:10.1186/s12886-017-0431-5
- [43] 董海曙, 林芳宇, 杨亚波. SMILE 术与波前像差引导的 LASIK 术后视觉质量的短期疗效比较[J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2014, 16(7): 426-429. doi:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.07.010
- [44] Shetty R, Matalia H, Nandini C, et al. Wavefront-guided LASIK has comparable ocular and corneal aberrometric outcomes but better visual acuity outcomes than SMILE in myopic eyes[J]. *J Refract Surg*, 2018, 34(8): 527-532. doi:10.3928/1081597X-20180607-02
- [45] 李康寓, 张凌子, 宋小翠, 等. SMILE 和 ICL 矫正中低度近视术后角膜前后表面和总角膜高阶像差的变化[J]. *国际眼科杂志*, 2018, 18(12): 2289-2292. doi:10.3980/j.issn.1672-5123.2018.12.42
- [46] Li MY, Li M, Chen YJ, et al. Five-year results of small incision lenticule extraction (SMILE) and femtosecond laser LASIK (FS-LASIK) for myopia[J]. *Acta Ophthalmol*, 2019, 97(3): e373-e380. doi:10.1111/aos.14017
- [47] Siedlecki J, Schmelter V, Schworm B, et al. Corneal wavefront aberrations and subjective quality of vision after small incision lenticule extraction[J]. *Acta Ophthalmol*, 2020, 98(7): e907-e913. doi:10.1111/aos.14420
- [48] Yang WM, Liu ST, Li MY, et al. Visual outcomes after small incision lenticule extraction and femtosecond laser-assisted LASIK for high myopia[J]. *Ophthalmic Res*, 2020, 63(4): 427-433. doi:10.1159/000504304
- [49] Hamilton DR, Chen AC, Khorrami R, et al. Comparison of early visual outcomes after low-energy SMILE, high-energy SMILE, and LASIK for myopia and myopic astigmatism in the United States[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2021, 47(1): 18-26. doi:10.1097/j.jcrs.0000000000000368
- [50] Yin YW, Lu Y, Xiang AQ, et al. Comparison of the optical quality after SMILE and FS-LASIK for high myopia by OQAS and iTrace analyzer: a one-year retrospective study[J]. *BMC Ophthalmol*, 2021, 21(1): 292. doi:10.1186/s12886-021-02048-5
- [51] Jun I, Kang DSY, Reinstein DZ, et al. Clinical outcomes of SMILE with a triple centration technique and corneal wavefront-guided transepithelial PRK in high astigmatism[J]. *J Refract Surg*, 2018, 34(3): 156-163. doi:10.3928/1081597X-20180104-03

- [52] Gulmez M, Tekce A, Kamis U. Comparison of refractive outcomes and high-order aberrations after small incision lenticule extraction and wavefront-guided femtosecond-assisted laser in situ keratomileusis for correcting high myopia and myopic astigmatism [J]. *Int Ophthalmol*, 2020, 40(12): 3481-3489. doi:10.1007/s10792-020-01534-x
- [53] Jin HY, Wan T, Yu XN, et al. Corneal higher-order aberrations of the anterior surface, posterior surface, and total cornea after small incision lenticule extraction (SMILE): high myopia versus mild to moderate myopia [J]. *BMC Ophthalmol*, 2018, 18(1): 295. doi:10.1186/s12886-018-0965-1
- [54] Gyldenkerne A, Ivarsen A, Hjortdal J. Comparison of corneal shape changes and aberrations induced By FS-LASIK and SMILE for myopia [J]. *J Refract Surg*, 2015, 31(4): 223-229. doi: 10.3928/1081597X-20150303-01
- [55] Ding X, Fu D, Wang L, et al. Functional optical zone and visual quality after small-incision lenticule extraction for high myopic astigmatism [J]. *Ophthalmol Ther*, 2021, 10(2): 273-288. doi: 10.1007/s40123-021-00330-9
- [56] 邵婷, 王雁, 郝维婷, 等. Kappa 角大小对 SMILE 手术后全眼像差的影响及其意义 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2022, 40(6): 525-532. doi: 10.3760/cma.j.cn115989-20190305-00098
- SHAO Ting, WANG Yan, HAO Weiting, et al. Influence and significance of angle Kappa on total ocular aberrations before and after SMILE surgery [J]. *Chinese Journal of Experimental Ophthalmology*, 2022, 40(6): 525-532. doi: 10.3760/cma.j.cn115989-20190305-00098
- [57] Chan TCY, Wan KH, Kang DSY, et al. Effect of corneal curvature on optical zone decentration and its impact on astigmatism and higher-order aberrations in SMILE and LASIK [J]. *Albrecht Von Graefes Arch Fur Klin Und Exp Ophthalmol*, 2019, 257(1): 233-240. doi:10.1007/s00417-018-4165-8
- [58] Kang DSY, Lee H, Reinstein DZ, et al. Comparison of the distribution of lenticule decentration following SMILE by subjective patient fixation or triple marking centration [J]. *J Refract Surg*, 2018, 34(7): 446-452. doi:10.3928/1081597X-20180517-02
- [59] Liu ST, Zhang XX, You ZP, et al. Comparison of the distribution of lenticule decentration following SMILE by pupil center or tear film mark centration [J]. *J Refract Surg*, 2020, 36(4): 239-246. doi:10.3928/1081597X-20200310-01
- [60] 李浏洋, 王雁, 李华, 等. 不同光学区 SMILE 术后全眼高阶像差比较 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2015, 17(11): 649-653. doi:10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2015.11.003
- [61] Jun I, Kang DSY, Roberts CJ, et al. Comparison of clinical and biomechanical outcomes of small incision lenticule extraction with 120- and 140- $\mu$ m cap thickness [J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2021, 10(8): 15. doi:10.1167/tvst.10.8.15
- [62] Mao X, Ji S, Chen H, et al. Comparison of postoperative safety, efficacy, and visual quality after SMILE for myopic patients with different corneal thicknesses [J]. *Curr Eye Res*, 2023, 48(1): 18-24. doi: 10.1080/02713683.2022.2117382
- [63] Wu W, Wang Y. The correlation analysis between corneal biomechanical properties and the surgically induced corneal high-order aberrations after small incision lenticule extraction and femtosecond laser in situ keratomileusis [J]. *J Ophthalmol*, 2015; 758196. doi: 10.1155/2015/758196

(编辑:曾婕)