

近视眼飞秒激光小切口基质透镜取出术后角膜光学质量的客观评估

徐路路 王雁 吴雅楠 吴文静 李晓晶 窦瑞 张佳媚

300020 天津市眼科医院 天津市眼科学与视觉科学重点实验室 天津市眼科研究所 天津医科大学眼科临床学院 南开大学眼科临床学院

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

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.02.010

【摘要】 背景 目前评价飞秒激光小切口基质透镜取出术(SMILE)术后角膜光学质量的方法多基于单一的散射、衍射或像差因素,因此不能对角膜光学质量进行全面和客观评价,而调制传递函数(MTF)及斯特列尔比(SR)综合了上述多因素评价方法,是评估术后角膜光学质量方法学的研究方向。目的 利用角膜 MTF 及 SR 客观分析 SMILE 术后术眼在明视和暗视环境下(分别为 3 mm 和 6 mm 瞳孔直径)角膜光学质量的变化。方法 采用系列病例观察研究方法和术眼手术前后自身对照研究设计,纳入 2013 年 12 月至 2014 年 3 月在天津市眼科医院接受 SMILE 的患者 32 例 63 眼,分别于术前、术后 1 周、1 个月及 3 个月记录裸眼视力(UCVA)、最佳矫正视力(BCVA)和有效性指数(术后 UCVA/术前 BCVA);分别于上述时间点对术眼行电脑验光和综合验光仪验光,记录手术前后术眼屈光度变化;采用 Sirius 眼前节分析系统测定 3 mm 和 6 mm 瞳孔直径下不同空间频率(10、20、30、40、50 和 60 c/d)角膜前表面 MTF 和 SR 值,并测定术眼手术前后角膜前表面总高阶像差均方根值(RMS),以评估术眼 SMILE 手术前后角膜光学质量变化。结果 术后 1 周、1 个月、3 个月 UCVA(LogMAR) ≥ 0.8 者分别为 59、62 和 63 眼,分别占 93.65%、98.41% 和 100%,术眼上述时间点有效性指数分别为 1.104 ± 0.128 、 1.126 ± 0.145 和 1.158 ± 0.208 。术眼术后 3 个月等效球镜度和柱镜度均在正常范围。术眼术后各时间点 3 mm 瞳孔直径垂直及水平子午线各空间频率下 MTF 值较术前均明显增加,6 mm 瞳孔直径下垂直子午线 10、20、30 和 40 c/d 空间频率 MTF 值较术前明显增加,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$),而手术前后不同时间点 6 mm 瞳孔直径下水平子午线各空间频率 MTF 值总体比较差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)。术眼术后各时间点 3 mm 及 6 mm 瞳孔直径下的 SR 与术前相比呈上升趋势,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$);且各时间点 3 mm 瞳孔直径下 SR 均大于相应的 6 mm 瞳孔直径下 SR 值,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。术眼手术前后不同时间点 3 mm 及 6 mm 瞳孔直径下角膜前表面 RMS 总体比较差异均无统计学意义(3 mm 瞳孔直径: $F = 1.348$, $P = 0.184$;6 mm 瞳孔直径: $F = 1.990$, $P = 0.137$)。结论 SMILE 手术可有效改善近视及近视散光患者术后角膜光学成像质量,术眼术后明视环境下较暗视环境下角膜光学质量改善更为明显。

【关键词】 角膜光学质量;激光角膜手术;准分子激光/治疗用途;近视;调制传递函数;斯特列尔比;飞秒激光小切口基质透镜取出术

基金项目: 国家自然科学基金项目(81170873);天津市应用基础与前沿技术研究重点项目(14JCZDJC35900)

Assessment of corneal optical quality following small incision lenticule extraction for myopia Xu Lulu, Wang

Yan, Wu Yanan, Wu Wenjing, Li Xiaojing, Dou Rui, Zhang Jiamei

Tianjing Eye Hospital, Tianjin Institute of Ophthalmology, Tianjin Ophthalmology and Visual Development Key Laboratory, Tianjin Medical University, Nankai University, Tianjin 300020, China

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

【Abstract】 **Background** The current evaluation of corneal optical quality after small incision lenticule extraction (SMILE) is based on the single factor, such as scattering, diffraction or aberration, and all of them are not comprehensive and objective methods. Modulation transfer function (MTF) and Strehl ratio (SR) are novel

parameters of corneal optical quality, which can be used to assess the optical quality comprehensively. **Objective** This study was to evaluate the change of MTF and SR under the photopic and scotopic environment (3 mm and 6 mm pupil size, respectively) after SMILE procedure. **Methods** The study protocol was approved by Ethic Committee of Tianjin Eye Hospital, and written informed consent was obtained from each patient before any medical procedure. A series cases-observational study with self-control design was carried out. Sixty-three eyes of 32 myopia or myopic astigmatism patients who underwent SMILE surgery in Tianjin Eye Hospital were included from December 2013 to March 2014. The uncorrected visual acuity (UCVA), best corrected visual acuity (BCVA) (LogMAR), the effective index (postoperative UCVA/preoperative BCVA) and refractive diopter were examined, and the MTF, SR and root mean square (RMS) on the anterior corneal surface were measured under the 3 mm and 6 mm pupil size at different spatial frequencies (10, 20, 30, 40, 50 and 60 c/d) by Sirius anterior analyzer before surgery and 1 week, 1 month and 3 months after surgery, respectively. **Results** UCVA was ≥ 0.8 in 59, 62 and 63 eyes in 1 week, 1 month and 3 months after SMILE, with the percentage of 93.65%, 98.41% and 100%, and the effective index was 1.104 ± 0.128 , 1.126 ± 0.145 and 1.158 ± 0.208 , respectively. The refractive diopter was normal in the eyes at postoperative 3 months. The MTFs of various spatial frequencies on the vertical and horizontal meridian under the 3 mm pupil size after SMILE were significantly higher than those before SMILE, while under the 6 mm pupil size, the MTFs were higher only on vertical meridian and 10, 20, 30 and 40 c/d, and there were not significant differences on the horizontal meridian (all at $P < 0.05$). The SRs under the 3 mm and 6 mm pupil size showed increasing softly after surgery in comparison with before surgery, and the SRs were higher under the 3 mm pupil size than those under the 6 mm pupil size at various time points (all at $P < 0.05$). There were not significant differences in RMS among different time points under both 3 mm pupil size and 6 mm pupil size (3 mm pupil size: $F = 1.348$, $P = 0.184$; 6 mm pupil size: $F = 1.990$, $P = 0.137$). **Conclusions** SMILE provides a great improvement in corneal optical quality for myopia or myopic astigmatism patients, which is more distinct in photopic condition than that in scotopic condition.

[**Key words**] Optical quality, corneal; Cornea surgery, laser; Lasers, excimer/therapeutic use; Myopia; Modulation transfer function; Strehl ratio; Small incision lenticule extraction

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81170873); Tianjin Applied Basic and Frontier Technology Research Key Project (14JCZDJC35900)

飞秒激光小切口基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 在矫正近视及近视散光方面具有较高的安全性、有效性、可预测性及稳定性^[1-4], 其临床效果也得到屈光手术医师的肯定, 但如何更好地改善患者术后的视觉质量仍是屈光手术医师关注的焦点。角膜屈光手术可导致角膜形态结构的变化, 而角膜的切削也会对术后光学质量产生相应变化。有研究显示, SMILE 术后早期全眼高阶像差, 尤其是球差、彗差等均有所增加^[5-7], 但其仅部分地反映角膜的光学质量变化情况, 而忽略了衍射、散射等其他因素的影响, 且仅像差、散射、对比敏感度等单一因素很难全面评估角膜屈光手术后角膜的光学质量。Sirius 眼前节分析系统可综合像差、散射、衍射等多种影响光学质量的因素分析得出角膜前表面调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 及斯特尔比率 (strehl ratio, SR) 值, 较为全面和客观地评估角膜屈光手术后角膜的光学质量变化^[8]。本研究对 SMILE 术后眼 3 mm 及 6 mm 瞳孔直径下 MTF 值及 SR 值进行分析, 评估 SMILE 手术对术眼明或暗环境下角膜光学

质量的影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

采用系列病例观察的研究方法, 纳入 2013 年 12 月至 2014 年 3 月在天津市眼科医院接受 SMILE 的近视和近视散光患者 32 例 63 眼; 其中男 15 例 29 眼, 女 17 例 34 眼; 年龄 18 ~ 35 岁, 平均 (24 ± 2) 岁。术眼术前裸眼视力为 0.01 ~ 0.7, 中位数为 0.10; 术眼术前球镜度为 $-2.25 \sim -8.75$ D, 平均 (-4.58 ± 1.53) D; 柱镜度为 $0 \sim -3.5$ D, 平均 (-0.88 ± 0.73) D; 等效球镜度 (spherical equivalent, SE) 为 $-2.50 \sim -8.87$ D, 平均 (-5.02 ± 1.50) D; 术眼术前角膜厚度为 473 ~ 605 μm , 平均 (555.26 ± 28.51) μm 。纳入标准: (1) 年龄 18 ~ 45 岁; (2) 2 年内屈光度数稳定; (3) 停戴软性角膜接触镜 2 周以上, 停戴硬性角膜接触镜 4 周以上; (4) Pentacam 眼前节分析系统测得的角膜地形图显示中央角膜厚度为 480 μm 以上; 无可疑圆锥角膜或圆锥角膜倾向; (5) 暗室下瞳孔直径 < 7 mm; (6) 无眼部疾

病史及严重全身疾病。本研究经天津市眼科医院伦理委员会审核批准,所有患者均自愿接受手术并签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 SMILE 手术

所有患者手术均由同一经验丰富的医师完成。术眼术前 3 d 常规用质量分数 0.3% 左氧氟沙星滴眼液及质量分数 0.1% 普拉洛芬滴眼液点眼,行结膜囊冲洗和眼周皮肤消毒,在奥布卡因滴眼液表面麻醉下完成手术。采用 Visu Max 飞秒激光器(德国 Carl Zeiss 公司)对角膜进行扫描和切割,扫描频率为 500 kHz。设置角膜帽厚度为 110 μm ,直径为 7 mm,光学区为 6.0 ~ 6.5 mm,能量为 110 ~ 165 nJ。按飞秒激光仪预先设置的上述参数对角膜基质透镜后表面进行由周边至中央的扫描切削及基质透镜的侧切,然后对角膜基质透镜前表面行自中央区至周边的扫描,最后制作 2 ~ 3 mm 的小切口,透镜后表面和前表面的扫描点间距为 3.0 μm ,透镜的侧切点间距为 2.5 μm ,小切口和帽的侧切点间距为 2.0 μm 。扫描完毕后将术眼移至手术显微镜下,用透镜分离器分离透镜前表面和上方角膜组织,然后分离透镜后表面并将透镜游离后用显微镊取出。用平衡盐液适当冲洗,并用无菌海绵吸除多余水分。术后用 0.3% 左氧氟沙星滴眼液点眼 2 d,每日 4 次;用质量分数 0.1% 氟米龙滴眼液点眼,每日 4 次,每 2 周减药 1 次,共点眼 1 个月。

1.2.2 检查方法及评价指标

所有患者均于术前及术后 1 周、1 个月、3 个月行裸眼视力(uncorrected visual acuity, UCVA)、最佳矫正视力(best corrected visual acuity, BCVA)检查,将视力换算为 LogMAR 视力,并评价有效性指数,有效性指数 = 术后 UCVA/术前 BCVA。分别于上述时间点对术眼行电脑验光、综合验光仪验光、非接触眼压计(日本 Topcon 公司)测量、裂隙灯显微镜眼前节检查及 Sirius 角膜地形图(意大利 CSO 公司)检查。采用 Sirius 眼前节分析系统(phoenis 1.2)获取 3 mm 和 6 mm 瞳孔直径下的 MTF 及 SR 值,空间频率分别为 10、20、30、40、50 和 60 c/d,并测定角膜前表面总高阶像差均方根值(root mean square, RMS)。所有检查均由同一经验丰富的医师在暗室中完成。检查时患者取坐位,下颌置于下颌托上,受检眼注视固视灯,充分暴露角膜,操作者对图像进行调整和对焦,嘱患者瞬目后采集图像,用 Scheimpflug 摄像机在 2 s 内完成 360° 的旋转扫描,选取图像质量最高的 2 次结果进行分析,取其平均值。Sirius 眼前节分析系统可自动经 Phoenis 分析软件模拟得出 3、4、5、6 和 7 mm 角膜光学区域 MTF、点扩散函数(point

spread function, PSF) 及 RMS 值,分别记录 3 mm 及 6 mm 瞳孔直径下角膜前表面 RMS 值、PSF、SR 值及垂直和水平子午线方向的 MTF 曲线,从曲线上可以得到 10、20、30、40、50 和 60 c/d 的 MTF 值。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 17.0 统计学软件进行统计分析。本研究测试指标的数据资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用手术前后术眼自身对照研究设计,手术前及手术后 1 周、1 个月和 3 个月间 UCVA、BCVA、SE、柱镜度、各空间频率下 MTF 值和各瞳孔直径下 RMS 的总体差异比较均采用重复测量单因素方差分析,组间多重比较采用 Dunnett *t* 检验;不同时间点在不同瞳孔直径下 SR 值的总体差异比较采用重复测量两因素方差分析,组间多重比较采用 LSD-*t* 检验。采用双尾检测法,检验水准为 0.05。

2 结果

2.1 术眼 SMILE 术后 UCVA 和 BCVA 变化

术后 1 周,59 眼 UCVA ≥ 0.8 ,占 93.65%,其中 UCVA 为 0.5 者 1 眼,UCVA 为 0.6 者 2 眼,UCVA 为 0.7 者 1 眼;术后 1 个月,62 眼 UCVA ≥ 0.8 ,占 98.41%,其中 UCVA 为 0.7 者 2 眼,UCVA 为 1.0 及以上者 6 眼;术后 3 个月所有术眼 UCVA ≥ 0.8 ,其中 8 眼 UCVA 达 1.0 及以上。术后 1 周、1 个月、3 个月的有效性指数分别为 1.104 ± 0.128 、 1.126 ± 0.145 和 1.158 ± 0.208 ($F = 0.383$, $P > 0.05$)。术眼手术前后不同时间点 UCVA 总体比较,差异有统计学意义 ($F = 5.326$, $P = 0.001$),术后较术前均明显提高,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。(表 1)。

表 1 术眼 SMILE 术前及术后不同时间点 BCVA、UCVA 的比较 ($\bar{x} \pm s$)

时间	眼数	LogMAR 视力	
		BCVA	UCVA
术前	63	0.01 ± 0.05	1.10 ± 0.30
术后 1 周	63	-0.02 ± 0.06	0.02 ± 0.07 ^a
术后 1 个月	63	-0.03 ± 0.06	-0.01 ± 0.06 ^a
术后 3 个月	63	-0.03 ± 0.06	-0.03 ± 0.06 ^a
F 值		0.168	5.326
P 值		0.196	0.001

注:与术前比较,^a $P < 0.05$ (重复测量单因素方差分析,Dunnett *t* 检验) SMILE:飞秒激光小切口基质透镜取出术;BCVA:最佳矫正视力;UCVA:裸眼视力

2.2 术眼 SMILE 手术前后不同时间点屈光度的变化

SMILE 术后 1 周,无明显残余散光者 41 眼,占 65%;术后 3 个月所有术眼屈光状态稳定。术前及术

后 1 周、1 个月及 3 个月术眼的平均 SE 及柱镜度总体比较差异均有统计学意义 ($F = 9.036、6.564$, 均 $P < 0.05$), 其中术后 1 周、1 个月及 3 个月术眼 SE 及柱镜度均明显低于术前值, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$) (表 2)。且术后 1 周, 65% 术眼未见明显残余散光, 术后 1 个月为 78%, 术后 3 个月时达到 83%。

表 2 术眼 SMILE 术前及术后不同时间点屈光度比较 ($\bar{x} \pm s, D$)

时间	眼数	SE	柱镜度
术前	63	-5.02±1.50	-0.88±0.73
术后 1 周	63	-0.16±0.32 ^a	-0.03±0.26 ^a
术后 1 个月	63	-0.08±0.24 ^a	0.02±0.25 ^a
术后 3 个月	63	-0.01±0.28 ^a	0.01±0.23 ^a
F 值		9.036	6.564
P 值		<0.001	0.001

注: 与各自的术前值比较, ^a $P < 0.05$ (重复测量单因素方差分析, Dunnett t 检验) SMILE: 飞秒激光小切口基质透镜取出术; SE: 等效球镜度

2.3 术眼 SMILE 手术前后不同时间点 MTF 值变化

术眼 SMILE 手术前后不同时间点 3 mm 瞳孔直径下垂直及水平子午线 10、20、30、40、50 和 60 c/d 空间频率 MTF 值的总体比较, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.01$), 其中术后 1 周、1 个月、3 个月各空间频率下 MTF 值较术前均明显增加, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$) (表 3, 4)。SMILE 手术前后不同时间点 6 mm 瞳孔直径下垂直子午线 10、20、30、40、50 和 60 c/d 空间频率 MTF 值的总体比较, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$), 其中术后 1 周、1 个月、3 个月 10、20、30 和 40 c/d 空间频率 MTF 值均较术前明显增加, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$); SMILE 手术前后 6 mm 瞳孔直径下不同时间点水平子午线 10、20、30、40、50 和 60 c/d 空间频率 MTF 值总体比较差异均无统计学意义 (均 $P > 0.05$) (表 5, 6)。

2.4 术眼 SMILE 手术前后不同时间点 SR 值变化

术眼 SMILE 手术前后不同时间点

表 3 术前 SMILE 手术前后不同时间点 3 mm 瞳孔直径下垂直子午线不同空间频率 MTF 值比较 ($\bar{x} \pm s$)

时间	眼数	不同空间频率下 MTF 值					
		10 c/d	20 c/d	30 c/d	40 c/d	50 c/d	60 c/d
术前	63	0.28±0.19	0.12±0.10	0.07±0.07	0.04±0.05	0.03±0.03	0.02±0.03
术后 1 周	63	0.34±0.17 ^a	0.15±0.11 ^a	0.10±0.08 ^a	0.06±0.06 ^a	0.04±0.05 ^a	0.03±0.03 ^a
术后 1 个月	63	0.35±0.18 ^a	0.16±0.11 ^a	0.11±0.08 ^a	0.06±0.06 ^a	0.05±0.05 ^a	0.03±0.03 ^a
术后 3 个月	63	0.38±0.16 ^a	0.16±0.11 ^a	0.12±0.09 ^a	0.09±0.07 ^a	0.06±0.05 ^a	0.03±0.04 ^a
F 值		6.392	7.820	11.123	11.327	10.076	6.755
P 值		0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

注: 与各自术前值比较, ^a $P < 0.05$ (重复测量方差分析, Dunnett t 检验) SMILE: 飞秒激光小切口基质透镜取出术; MTF: 调制传递函数

表 4 术眼 SMILE 手术前后 3 mm 瞳孔直径下不同时间点水平子午线不同空间频率 MTF 值比较 ($\bar{x} \pm s$)

时间	眼数	不同空间频率下 MTF 值					
		10 c/d	20 c/d	30 c/d	40 c/d	50 c/d	60 c/d
术前	63	0.32±0.22	0.15±0.12	0.08±0.09	0.06±0.06	0.04±0.04	0.03±0.03
术后 1 周	63	0.38±0.19 ^a	0.18±0.12 ^a	0.12±0.10 ^a	0.09±0.07 ^a	0.07±0.08 ^a	0.04±0.04 ^a
术后 1 个月	63	0.40±0.19 ^a	0.17±0.13 ^a	0.12±0.09 ^a	0.09±0.07 ^a	0.06±0.05 ^a	0.04±0.04 ^a
术后 3 个月	63	0.44±0.17 ^a	0.22±0.12 ^a	0.13±0.09 ^a	0.09±0.07 ^a	0.07±0.06 ^a	0.05±0.04 ^a
F 值		8.157	6.535	5.411	6.488	6.088	8.235
P 值		<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.001	<0.001

注: 与各自术前值比较, ^a $P < 0.05$ (重复测量单因素方差分析, Dunnett t 检验) SMILE: 飞秒激光小切口基质透镜取出术; MTF: 调制传递函数

表 5 术眼 SMILE 手术前后不同时间点 6 mm 瞳孔直径下垂直子午线不同空间频率的 MTF 值比较 ($\bar{x} \pm s$)

时间	眼数	不同空间频率下 MTF 值					
		10 c/d	20 c/d	30 c/d	40 c/d	50 c/d	60 c/d
术前	63	0.14±0.11	0.06±0.06	0.04±0.04	0.03±0.03	0.02±0.03	0.01±0.02
术后 1 周	63	0.18±0.09 ^a	0.08±0.05 ^a	0.05±0.04 ^a	0.04±0.03 ^a	0.03±0.05	0.02±0.02
术后 1 个月	63	0.18±0.08 ^a	0.08±0.05 ^a	0.06±0.04 ^a	0.04±0.03 ^a	0.03±0.02	0.02±0.02
术后 3 个月	63	0.19±0.08 ^a	0.10±0.06 ^a	0.06±0.04 ^a	0.04±0.03 ^a	0.03±0.02 ^a	0.02±0.02 ^a
F 值		5.932	6.036	4.817	3.346	3.358	3.722
P 值		0.001	0.002	0.003	0.020	0.018	0.012

注: 与各自术前值比较, ^a $P < 0.05$ (重复测量单因素方差分析, Dunnett t 检验) SMILE: 飞秒激光小切口基质透镜取出术; MTF: 调制传递函数

表 6 术眼 SMILE 手术前后不同时间点 6 mm 瞳孔直径下水平子午线上不同空间频率 MTF 值比较 ($\bar{x} \pm s$)

时间	眼数	不同空间频率下 MTF 值					
		10 c/d	20 c/d	30 c/d	40 c/d	50 c/d	60 c/d
术前	63	0.16±0.12	0.07±0.04	0.04±0.03	0.03±0.03	0.02±0.02	0.02±0.02
术后 1 周	63	0.16±0.10	0.06±0.05	0.05±0.03	0.03±0.03	0.02±0.02	0.02±0.02
术后 1 个月	63	0.18±0.11	0.07±0.05	0.05±0.03	0.03±0.03	0.02±0.02	0.02±0.02
术后 3 个月	63	0.18±0.10	0.09±0.05	0.06±0.04	0.04±0.03	0.03±0.02	0.02±0.02
F 值		0.901	2.321	2.548	1.940	1.990	0.544
P 值		0.429	0.062	0.057	0.125	0.117	0.653

注: SMILE: 飞秒激光小切口基质透镜取出术; MTF: 调制传递函数 (重复测量单因素方差分析)

在不同瞳孔直径下 SR 值的总体比较, 差异均有统计学意义 ($F_{\text{时间}} = 19.218, P < 0.001$; $F_{\text{瞳孔直径}} = 13.403, P < 0.001$; $F_{\text{交互作用}} = 12.876, P < 0.001$), 术后 1 周、1 个月、3 个月 3 mm 瞳孔直径下和 6 mm 瞳孔直径下 SR 值较术前均明显增加, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。术前及术后 1 周、1 个月、3 个月 3 mm 瞳孔直径 SR 较 6 mm 瞳孔直径下 SR 值均增加, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.001$) (表 7)。

表 7 术眼 SMILE 手术前后不同时间点不同瞳孔直径下 SR 值比较 ($\bar{x} \pm s$)

时间	眼数	不同瞳孔直径下 SR 值	
		3 mm 瞳孔直径	6 mm 瞳孔直径
术前	63	0.274 ± 0.133	0.106 ± 0.047
术后 1 周	63	0.366 ± 0.154 ^a	0.133 ± 0.055 ^{ab}
术后 1 个月	63	0.395 ± 0.171 ^a	0.132 ± 0.043 ^{ab}
术后 3 个月	63	0.412 ± 0.147 ^a	0.144 ± 0.053 ^{ab}

注: $F_{\text{时间}} = 19.218, P < 0.001$; $F_{\text{瞳孔直径}} = 13.403, P < 0.001$; $F_{\text{交互作用}} = 12.876, P < 0.001$ 。与相同瞳孔直径下术前值比较, ^a $P < 0.05$; 与同时同点 3 mm 瞳孔直径值比较, ^b $P < 0.05$ (重复测量两因素方差分析, LSD-*t* 检验) SMILE: 飞秒激光小切口基质透镜取出术; SR: 斯特尔比率

2.5 术眼 SMILE 手术前后不同时间点角膜前表面 RMS 变化

术眼 SMILE 术前及术后 1 周、1 个月、3 个月 3 mm 和 6 mm 瞳孔直径下角膜前表面 RMS 值总体比较, 差异均无统计学意义 (3 mm 瞳孔直径: $F = 1.348, P = 0.184$; 6 mm 瞳孔直径: $F = 1.990, P = 0.137$) (表 8)。

表 8 术眼 SMILE 手术前后不同时间点各瞳孔直径下角膜前表面 RMS 值比较 ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

时间	眼数	不同瞳孔直径下 RMS 值	
		3 mm 瞳孔直径	6 mm 瞳孔直径
术前	63	0.30 ± 0.17	1.31 ± 0.63
术后 1 周	63	0.31 ± 0.18	1.44 ± 0.93
术后 1 个月	63	0.28 ± 0.13	1.23 ± 0.64
术后 3 个月	63	0.27 ± 0.12	1.21 ± 0.62
F 值		1.348	1.990
P 值		0.184	0.137

注: SMILE: 飞秒激光小切口基质透镜取出术; RMS: 总高阶像差均方根 (重复测量单因素方差分析)

2.6 术中及术后并发症

所有患者中仅 1 例 1 眼因术中极度紧张、配合欠佳致眼球失吸, 即刻复吸后顺利完成激光扫描。患者 SR 值随术后时间变化仍呈明显上升趋势, 3 mm 瞳孔直径术前及术后 1 周、1 个月、3 个月 SR 值分别为 0.231 5、0.269 5、0.285 3 和 0.413 3, 6 mm 瞳孔直径术

前及术后 1 周、1 个月、3 个月 SR 值分别为 0.104 7、0.097 9、0.122 9 和 0.133 1。1 例 1 眼术后 1 d 出现 1 级弥漫性板层角膜炎 (diffuse lamellar keratitis, DLK), 且以角膜周边较为明显, 瞳孔区未波及, 术后 1 周时, 角膜周边局部仍存在病灶。

3 讨论

MTF 又称空间对比传递函数或空间对比敏感度函数, 反映了光学系统, 如人眼对不同空间频率的传递能力, 既与人眼的像差有关, 又与衍射效果有关, 在评价人眼的成像质量方面具有一定的客观性和可靠性^[9]。PSF 是指点状物体在视网膜成像的光强度分布, 其综合了像差、衍射和散射 3 种因素对视觉质量的共同影响, 因此能够较为全面地评估角膜光学质量^[9]。一般情况下, 低空间频率影响人眼对物体轮廓的辨别能力, 中空间频率反映视敏度及对比敏感度, 而高空间频率反映人眼对细节的辨认能力^[10]。本研究结果显示, SMILE 术后在暗视环境下 (6 mm 瞳孔直径) 垂直子午线上低、中空间频率较高空间频率 MTF 值增加更为明显, 明视环境下 (3 mm 瞳孔直径) 垂直子午线 MTF 值在低、中、高空间频率下较术前均明显增加, 且随时间延长呈明显上升趋势。故推测 SMILE 术后暗视环境下角膜光学性能明显提高, 其中以轮廓分辨能力、视敏度及对比敏感度方面增加较为明显。

正常人眼光学质量多受低阶像差, 即离焦的影响, 而高阶像差对光学质量影响仅占 10% ~ 20%。MTF 可反映低阶像差和高阶像差在内的多种光学成像影响因素对角膜光学质量的综合作用; SMILE 术后低阶像差大部分或完全消除, 进而引起 MTF 的变化。本研究中, SMILE 术后 1 周、1 个月、3 个月均有 93% 以上患者 UCVA 大于 0.8, 有效性指数均为 95% 以上, 且随时间变化有明显上升趋势; 术后残余屈光度多为 -0.25 D 以下且随时间逐渐减少。有研究显示, 散光可产生较多的高阶像差, 从而使视网膜成像质量明显降低^[11-12]。本研究中的结果显示, 术后 1 周 65% 术眼未见明显残余散光, 术后 3 个月时达到 83%。因此 SMILE 术后由球镜度或散光等引起的视觉质量降低明显减少。本研究中结果显示, 术后 1 周、1 个月、3 个月 3 mm 及 6 mm 瞳孔直径下角膜前表面 RMS 变化较术前均不明显, 差异均无统计学意义, 提示 SMILE 术后光学质量受高阶像差的影响相对较小, 这也可能是 SMILE 术后成像质量提高的原因之一。Lin 等^[13] 研究显示, SMILE 等引入的球差较传统术式要小, 这可能与其避免了准分子激光切削周边角膜时由于入射角改变

导致切削效能下降,即余弦效应有关,从而避免了过多引入球差等高阶像差;此外,SMILE 独特的无角膜基质损伤手术方式明显降低引入球差的可能性;同时 SMILE 采用飞秒激光制作角膜帽及透镜上下表面,定位更为准确,因偏心切削而引入的球差、彗差等高阶像差大大减少。Sekundo 等^[14]的研究表明,SMILE 术后角膜 RMS 变化轻微,提示其独特的手术方式可带来相对较好的术后光学质量。

角膜瓣愈合也可导致屈光术后像差,尤其是彗差的增加,而 SMILE 手术无需制作角膜瓣,可避免角膜瓣导致的角膜生物力学变化,同时避免瓣膜本身的张力、位置异常等可能造成的高阶像差的增加。因此,SMILE 术后瓣源性像差极少增加。正常角膜的非球面性可减少球差的产生,传统的屈光手术后角膜非球面性发生改变,球差明显增加。Kamiya 等^[15]研究显示,SMILE 仅利用飞秒激光进行透镜形状的表面切削,并未对角膜组织形态产生明显影响,因此 SMILE 术后因角膜形态变化引起的球差等高阶像差相对较少。Kwon 等^[16]建立模型以探讨角膜屈光手术后角膜球差等高阶像差增加的原因,发现其与术后伤口愈合引起的角膜结构重塑有关。SMILE 全程仅使用飞秒激光完成角膜帽、基质透镜及小切口的制作,对周围组织的机械损伤和热损伤极小,角膜组织创伤愈合反应极其轻微且术中取出的透镜前后表面光滑,侧切缘均匀一致^[17-18]。因此,术后由于角膜结构重塑引起的屈光间质透明性下降及角膜基质排列不规则等诱发射散、像差等增加的可能性较小。本研究中,3 mm 及 6 mm 瞳孔直径下,SR 值均较术前有明显增加,提示 SMILE 术后散射、像差、衍射等影响光学质量的因素对术后角膜光学成像质量的综合影响较小。Miao 等^[19]利用双通道视觉质量评估系统评估 SMILE 术后视觉质量情况,结果显示术后视觉质量较术前未见明显降低。Miao 等^[19]主要评估的是视网膜成像质量情况,而本研究主要评估角膜光学质量,对于探讨角膜屈光手术后角膜形态变化对角膜本身成像质量的影响具有重要意义。

瞳孔直径对光学成像的影响极其重要,瞳孔大小与有效光学区的差异对术后像差的引入具有重要影响^[20]。有研究证实,LASIK 术后 MTF 值随瞳孔直径的增加而下降,高阶像差明显增加^[21-22]。本研究中结果显示,6 mm 瞳孔直径下,水平子午线上各空间频率 MTF 值较术前变化不明显,差异均无统计学意义。同时,6 mm 瞳孔直径下手术前后 RMS 值均大于 3 mm 瞳孔直径下相应 RMS 值,提示大瞳孔直径下像差增加,降低了视网膜成像质量。本研究在进行手术参数设计

时将有效光学区设置为稍大于瞳孔直径,切削直径为 6.0 ~ 6.5 mm,尽可能减少手术本身引入的像差增加。另外,水平子午线 MTF 通常表达垂直方向(90° ~ 270°)成像质量^[8],而 SMILE 手术小切口一般位于 90° 方向,推测小切口愈合引入的垂直彗差和逆规散光导致 MTF 值较术前未明显升高。

本研究所有手术患者中,仅 1 例 1 眼术中发生失吸,复吸后顺利完成手术,术后随访该患者视觉质量并未受影响;另有 1 例患者 1 眼出现 1 级 DLK,术后 1 周时仍存在,但主要局限于角膜周边,瞳孔区未累及,因此术后 UCVA 不受影响,但是 MTF 及 SR 均显示较术前有明显下降,尤其在 6 mm 瞳孔直径下降更为明显,考虑为角膜炎症致使作为屈光间质的角膜透明性下降,屈光指数增加,散射、像差等增加,成像质量下降;术后 1 周时炎症反应局限于周边,因此在 6 mm 瞳孔直径下患者 MTF 下降更为明显;随着时间变化,DLK 逐渐消失,术后 1 个月时 MTF 及 SR 均有所回升,并于术后 3 个月时恢复至术前水平。

综上所述,SMILE 术后早期 MTF 曲线明显提高,SR 值也较术前明显增加,术后角膜光学质量明显提升。同时,3 mm 瞳孔直径下 MTF 及 SR 较 6 mm 瞳孔直径下提高更为显著,提示 SMILE 术后明视环境下较暗视环境下角膜光学成像质量改善更为明显。然而,角膜光学成像质量的影响因素多种多样,因此尚需结合其他评价指标进一步分析以及长时间大样本的随访研究,以更好地评估 SMILE 术后角膜光学质量的变化情况。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Ivarsen A, Asp S, Hjortdal J. Safety and complications of more than 1500 small-incision lenticule extraction procedures[J]. Ophthalmology, 2014, 121(4): 822-828. DOI:10.1016/j.ophtha.2013.11.006.
- [3] Han T, Zheng K, Chen Y, et al. Four-year observation of predictability and stability of small incision lenticule extraction [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2016, 16(1): 149 [2016-03-24]. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5006606/. DOI: 10.1186/s12886-016-0331-0.
- [4] 任胜卫,庞辰久,孟志红,等.飞秒激光小切口基质透镜取出术矫正近视及近视散光 2 年效果分析[J].中华实验眼科杂志,2016,34(9):818-822. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.09.010. Ren SW, Pang CJ, Meng ZH, et al. The 2-year efficacy study of femtosecond laser corneal small incision lenticule extraction for correction of myopia and myopic astigmatism [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2016, 34(9): 818-822. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.09.010.
- [5] Shah R, Shah S, Sengupta S. Results of small incision lenticule

- extraction; all-in-one femtosecond laser refractive surgery[J]. J Cataract Refract Surg, 2011, 37(1): 127-137. DOI: 10.1016/j.jcrs.2010.07.033.
- [6] Sekundo W, Kunert KS, Blum M. Small incision corneal refractive surgery using the small incision lenticule extraction (SMILE) procedure for the correction of myopia and myopic astigmatism: results of a 6 month prospective study[J]. Br J Ophthalmol, 2011, 95(3): 335-339. DOI: 10.1136/bjo.2009.174284.
- [7] Wu W, Wang Y. Corneal higher-order aberrations of the anterior surface, posterior surface, and total cornea after SMILE, FS-LASIK, and FLEEx surgeries[J]. Eye Contact Lens, 2016, 42(6): 358-365. DOI: 10.1097/ICL.0000000000000225.
- [8] Zheng YZ, Chen YP, Qiu Y, et al. Analysis of the optical quality by determining the modulation transfer function for anterior corneal surface in myopes[J]. Int J Ophthalmol, 2012, 5(2): 196-201. DOI: 10.3980/j.issn.2222-3959.2012.02.16.
- [9] 王雁. 波前像差与临床视觉矫正[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 77-88.
- [10] Rovamo J, Mustonen J, Näsänen R. Two simple psychophysical methods for determining the optical modulation transfer function of the human eye[J]. Vision Res, 1994, 34(19): 2493-2502.
- [11] Cheng X, Bradley A, Hong X, et al. Relationship between refractive error and monochromatic aberrations of the eye[J]. Optom Vis Sci, 2003, 80(1): 43-49.
- [12] 姜珺, Mao XJ, 金成鹏, 等. 人眼角膜散光矫正的点扩散函数分析表达[J]. 中华眼科杂志, 2008, 44(7): 609-614.
- Jiang J, Mao XJ, Jin CP, et al. The expression of the correction of corneal astigmatism in the point spread function analysis system of human eyes[J]. Chin J Ophthalmol, 2008, 44(7): 609-614.
- [13] Lin F, Xu Y, Yang Y. Comparison of the visual results after SMILE and femtosecond laser-assisted LASIK for myopia[J]. J Refract Surg, 2014, 30(4): 248-254. DOI: 10.3928/1081597X-20140320-03.
- [14] Sekundo W, Gertner J, Bertelmann T, et al. One-year refractive results, contrast sensitivity, high-order aberrations and complications after myopic small-incision lenticule extraction (ReLEx SMILE)[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2014, 252(5): 837-843. DOI: 10.1007/s00417-014-2608-4.
- [15] Kamiya K, Shimizu K, Igarashi A, et al. Comparison of visual acuity, higher-order aberrations and corneal asphericity after refractive lenticule extraction and wavefront-guided laser-assisted in situ keratomileusis for myopia[J]. Br J Ophthalmol, 2013, 97(8): 968-975. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2012-302047.
- [16] Kwon Y, Bott S. Postsurgery corneal asphericity and spherical aberration due to ablation efficiency reduction and corneal remodelling in refractive surgeries[J]. Eye (Lond), 2009, 23(9): 1845-1850. DOI: 10.1038/eye.2008.356.
- [17] Riau AK, Angunawala RI, Chaurasia SS, et al. Effect of different femtosecond laser-firing patterns on collagen disruption during refractive lenticule extraction[J]. J Cataract Refract Surg, 2012, 38(8): 1467-1475. DOI: 10.1016/j.jcrs.2012.03.037.
- [18] Ziebarth NM, Lorenzo MA, Chow J, et al. Surface quality of human corneal lenticules after SMILE assessed using environmental scanning electron microscopy[J]. J Refract Surg, 2014, 30(6): 388-393. DOI: 10.3928/1081597X-20140513-01.
- [19] Miao H, He L, Shen Y, et al. Optical quality and intraocular scattering after femtosecond laser small incision lenticule extraction[J]. J Refract Surg, 2014, 30(5): 296-302. DOI: 10.3928/1081597X-20140415-02.
- [20] Schmidt GW, Yoon M, McGwin G, et al. Evaluation of the relationship between ablation diameter, pupil size, and visual function with vision-specific quality-of-life measures after laser in situ keratomileusis[J]. Arch Ophthalmol, 2007, 125(8): 1037-1042. DOI: 10.1001/archophth.125.8.1037.
- [21] 张静, 吕帆, 周激波, 等. 点扩散函数法对近视患者准分子激光角膜原位磨镶术后早期视觉质量的评价[J]. 中华实验眼科杂志, 2011, 29(1): 62-67. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2011.01.016.
- Zhang J, Lü F, Zhou JB, et al. Evaluation of visual quality after laser in situ keratomileusis for myopia by point spread function[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2011, 29(1): 62-67. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2011.01.016.
- [22] 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.

(收稿日期: 2016-05-11)

(本文编辑: 尹卫靖 张宇)

读者·作者·编者

本刊征稿启事

《中华实验眼科杂志》是由中国科学技术协会主管、中华医学会主办、河南省立眼科医院 河南省眼科研究所承办的眼科专业学术期刊, 月刊, 每月 10 日出版。本刊的报道范围主要为眼科基础和临床研究领域领先的科研成果, 主要栏目设有专家述评、实验研究、临床研究、调查研究、综述、病例报告等, 学术内容涉及眼科疾病的基因学研究、基因诊断和基因靶向治疗、眼科遗传学研究、分子生物学研究、眼科微生物学研究、眼科药理学研究、眼科生物材料研究、眼科表观遗传研究、眼科疾病的动物模型、眼科疾病的流行病学研究、眼科疾病的多中心或单中心随机对照临床试验、循证医学临床实践及眼科疾病的临床研究等。本刊拟刊出海外学者的中文或英文原创性论文或评述类文章, 欢迎国内外眼科研究人员踊跃投稿。

本刊对论文中关键词的著录要求

本刊投稿的论文请分别在中英文摘要下方标引 3~5 个关键词以便于编制文献索引。关键词应选取能反映文章主题概念的词或词组, 中英文关键词应一致。投稿作者可登陆 <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh> 或 <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=mesh> 网站从美国国立医学图书馆的 MeSH 数据库中选取关键词, 其中文译名可参照中国医学科学院信息研究所编译的《医学主题词注释字顺表》。未被词表收录的新的专业术语(自由词)可直接作为关键词使用, 但应排序在最后。中医药关键词应从中国中医科学院中医药信息研究所编写的《中医药主题词表》中选取。关键词中的缩写词应按《医学主题词注释字顺表》还原为全称, 各关键词之间用“;”分隔。

(本刊编辑部)