

# SMILE 与 FS-LASIK 术后调制传递函数在不同空间频率的变化

崔彤 王雁 张琳 程文博 赵伟

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

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

**【摘要】** 目的 探讨飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(SMILE)与飞秒激光辅助准分子激光角膜原位磨镶术(FS-LASIK)术后眼调制传递函数(MTF)的变化。方法 采用队列研究设计。收集 2015 年 12 月至 2016 年 6 月于天津市眼科医院屈光手术中心行 SMILE 和 FS-LASIK 的近视患者 102 例 102 眼,根据手术方式不同将其分为 SMILE 组 53 例 53 眼和 FS-LASIK 组 49 例 49 眼。采用 Pentacam 角膜地形图仪和 WaveScan 像差仪分别在术前和术后 1、3、6 个月检测角膜形态特征和像差,应用 MTF 进行计算和分析。比较 2 个组不同空间频率下不同时间点 MTF 值变化和术后 6 个月 2 个组去除低阶像差后 MTF 值变化,以及术后 6 个月 SMILE 组去除垂直彗差、水平彗差、球差后 MTF 值的变化。结果 SMILE 组和 FS-LASIK 组术后 1、3、6 个月各空间频率的 MTF 值较术前均明显升高,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。SMILE 组术后 1、3、6 个月各空间频率 MTF 值均高于 FS-LASIK 组。除 55 c/d、60 c/d 外,其余空间频率下 2 个组术后 6 个月 MTF 值比较差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。术后 6 个月去除低阶像差后,各空间频率下 SMILE 组的 MTF 值均明显高于 FS-LASIK 组,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。术后 6 个月 1 c/d 空间频率下 SMILE 组去除球差、水平彗差后 MTF 值明显高于去除前 MTF 值,差异均有统计学意义(均  $P < 0.01$ );1 c/d、3 c/d 空间频率下去除垂直彗差后 MTF 值明显高于去除前 MTF 值,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ ),其余空间频率去除单项高阶像差后与术后 6 个月 MTF 值比较差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )。结论 SMILE 和 FS-LASIK 术后眼 MTF 均较术前升高,且 SMILE 术后 MTF 值较 FS-LASIK 术后 MTF 值略高。

**【关键词】** 调制传递函数; 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; 飞秒激光辅助准分子激光角膜原位磨镶术; 光学质量

基金项目:国家自然科学基金项目(81470658)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20210310-00159

## Comparison of modulation transfer function between the eyes after small-incision lenticule extraction and femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis

Cui Tong, Wang Yan, Zhang Lin, Cheng Wenbo, Zhao Wei

Clinical College of Ophthalmology, Tianjin Medical University, Tianjin Eye Hospital, Tianjin Key Lab of Ophthalmology and Visual Science, Tianjin 300020, China

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

**[Abstract]** **Objective** To investigate and compare the changes of modulation transfer function (MTF) after small-incision lenticule extraction (SMILE) and femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis (FS-LASIK).

**Methods** A cohort study was conducted. One hundred and two myopic patients (102 eyes) who underwent SMILE and FS-LASIK in Tianjin Eye Hospital from December 2015 to June 2016 were enrolled and divided into SMILE group with 53 eyes and FS-LASIK group with 49 eyes according to different surgical methods. The ocular aberrations and corneal morphology of all patients were measured by the Hartman-Shack wave-front analyzer and Pentacam topography before surgery and 1, 3 and 6 months postoperatively. MTF of optic system was calculated and analyzed. The changes of MTF values were compared between the two groups at different time points under different spatial frequencies, after removal of low-order aberrations at postoperative 6 months, and after removal of vertical coma aberration, horizontal coma aberration and spherical aberration in the SMILE group at postoperative 6 months. The study protocol complied with the Declaration of Helsinki and was approved by an Ethics Committee of Tianjin Eye Hospital (No. TJYYLL-2014-17).

Written informed consent was obtained from each patient before surgery. **Results** Compared with the preoperative MTF, there were significant increases in postoperative 1-, 3- and 6-month MTF at all spatial frequencies in the SMILE group and FS-LASIK group (all at  $P < 0.05$ ). MTF values at all spatial frequencies in the SMILE group were significantly higher than those in the FS-LASIK group at 1, 3, and 6 months after surgery (all at  $P < 0.05$ ), except at 55 c/d and 60 c/d at 6 months postoperatively. The postoperative 6-month MTF values at all spatial frequencies without low-order aberration were higher in the SMILE group than those in the FS-LASIK group, showing significant differences between the two groups (all at  $P < 0.05$ ). In the SMILE group, the postoperative 6-month MTF values at 1 c/d spatial frequency without the horizontal coma aberration and spherical aberration were significantly higher than the preoperative MTF values (both at  $P < 0.01$ ); the postoperative 6-month MTF values at 1 c/d and 3 c/d spatial frequency without vertical coma aberration were significantly higher than the preoperative MTF values (both at  $P < 0.05$ ), and there were no statistically significant differences between the postoperative 6-month MTF values at the other spatial frequencies with and without single high-order aberrations (all at  $P > 0.05$ ). **Conclusions** Optic quality has been obviously improved after SMILE and FS-LASIK, and the SMILE is superior to FS-LASIK in the MTF value.

**[Key words]** Modulation transfer function; Small-incision lenticule extraction; Femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis; Optic quality

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (81470658)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20210310-00159

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (small-incision lenticule extraction, SMILE) 是应用飞秒激光在角膜基质内进行透镜状切割, 再从 2~5 mm 的小切口将透镜取出以矫正屈光不正的手术方法, 该术式的安全性、有效性、稳定性, 以及可预测性已逐渐得到认可<sup>[1-4]</sup>。SMILE 可以更好地维持角膜原有的生物力学结构和表面形态, 对神经损伤更小<sup>[5-9]</sup>。然而, 在提高患者裸眼视力的同时, 提高患者的视觉质量成为了 SMILE 手术的主要目标。目前临床上评价视觉质量的主要指标是视力和对比敏感度函数, 然而这 2 项指标的测量都需要受检者的主观参与, 不能相对客观地反映人眼的视觉质量。研究表明, 调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 可以从不同空间频率客观地描述视觉质量的光学变化<sup>[10]</sup>。以往研究多集中于对 SMILE 术后角膜 MTF 的分析, 而对术后全眼的 MTF 研究鲜有报道。本研究拟对 SMILE 及飞秒激光辅助准分子激光角膜原位磨镶术 (femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis, FS-LASIK) 手术前后的 MTF 在不同空间频率下的改变进行探讨, 以期对屈光手术后视觉质量的变化研究提供参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

采用队列研究设计, 选取 2015 年 12 月至 2016 年 6 月在天津市眼科医院屈光手术中心行 SMILE 和同期接受 FS-LASIK 的近视患者 102 例 102 眼, 其中男 54 例 54 眼, 女 48 例 48 眼; 年龄 18~39 岁; 均取右眼进行分析。纳入标准: (1) 年龄 18~45 岁; (2) 角膜透明且

形态正常; (3) 屈光度数  $\geq -0.50$  D, 且屈光度数稳定; (4) 软性角膜接触镜停戴 2 周以上, 硬性角膜接触镜停戴 1 个月以上。排除标准: (1) 患有眼科其他疾病, 如角膜炎症活动期、圆锥角膜、青光眼、白内障, 或存在眼底疾病者; (2) 有眼部手术史、外伤史者; (3) 患有全身结缔组织疾病或自身免疫性疾病者。SMILE 组 53 例 53 眼, 其中男 28 例 28 眼, 女 25 例 25 眼; 年龄 18~39 岁, 平均 (25.06±5.59) 岁; 术前球镜度为 -1.75~-7.75 D, 平均 (-5.09±1.60) D; 柱镜度为 0.00~-2.75 D, 平均 (-0.73±0.73) D; 最佳矫正视力 (best corrected visual acuity, BCVA)  $\geq 0.8$ 。FS-LASIK 组 49 例 49 眼, 其中男 26 例 26 眼, 女 23 例 23 眼; 年龄 20~39 岁, 平均 (24.07±5.47) 岁; 球镜度为 -1.75~-8.50 D, 平均 (-5.36±1.12) D; 柱镜度为 0.00~-2.50 D, 平均 (-0.64±0.75) D; BCVA  $\geq 0.8$ 。2 个组患者术前年龄、球镜度数、柱镜度数、中央角膜厚度 (central corneal thickness, CCT)、平均角膜曲率 (mean keratometry, Km) 比较差异均无统计学意义 (均  $P > 0.05$ ) (表 1)。本研究遵循《赫尔辛基宣言》, 经天津市眼科医院伦理委员会批准 (批文号: TJYYLL-2014-17), 所有研究对象均对本研究知情并自愿签署知情同意书。

### 1.2 方法

**1.2.1 术前检查** 所有患者均进行常规屈光手术术前检查, 采用国际标准视力表记录裸眼视力及 BCVA, 行主观验光及 AT-2C 型全自动电脑验光仪 (日本 Canon 公司) 客观验光; 采用 TF-X 型非接触眼压计 (日本 Canon 公司) 测量眼压; 采用 Pentacam 角膜地形图

表 1 2 个组患者术前基线资料比较 (mean±SD)  
Table 1 Comparison of baseline data between the two groups (mean±SD)

组别	眼数	年龄(岁)	球镜度数(D)	柱镜度数(D)	CCT(μm)	Km(D)
SMILE 组	53	25.06±5.59	-5.09±1.60	-0.73±0.73	549.20±26.93	43.47±1.32
FS-LASIK 组	49	24.07±5.47	-5.36±1.12	-0.64±0.75	548.18±26.99	43.35±1.23
<i>t</i> 值		0.903	0.980	0.614	0.191	0.474
<i>P</i> 值		0.368	0.330	0.540	0.849	0.636

注:(独立样本 *t* 检验) SMILE:飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术;FS-LASIK:飞秒激光辅助准分子激光角膜原位磨镶术;CCT:中央角膜厚度;Km:平均角膜曲率

Note:(Independent-samples *t* test) SMILE:small-incision lenticule extraction;FS-LASIK:femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis;CCT:central corneal thickness;Km:mean keratometry

仪(德国 Oculus 公司)检测角膜形态特征等;采用 WaveScan 像差仪(美国 Visx 公司)检查像差,在暗室中瞳孔自然放大的状态下进行波阵面像差测量,每眼测量 3~5 次。选取图像标准:(1)虹膜纹理清晰;(2)屈光度与显然验光接近;(3)重复性较好;(4)瞳孔直径 6 mm 以上;(5)质量控制合格。

**1.2.2 手术方法** 所有手术均由同一位经验丰富的术者完成。术前术眼进行结膜囊冲洗及眼周皮肤消毒,采用质量分数 0.4% 盐酸奥布卡因滴眼液(日本 Santen 公司)进行表面麻醉。SMILE 组应用 VisuMax 飞秒激光系统(德国 Carl Zeiss 公司)制作角膜帽和基质透镜,激光脉冲为 500 kHz,能量为 125 nJ,光斑大小为 1.5 μm,扫描点间距为 3.0 μm。角膜帽直径为 6.0~6.2 mm,基底加厚 10 μm,散光过渡带为 0.1 mm,切口位于角膜上方,宽度为 2~5 mm。激光扫描结束后,分离透镜并取出。FS-LASIK 组应用 VisuMax 飞秒激光系统制作角膜瓣,激光脉冲为 500 kHz,能量为 125 nJ,扫描点间距为 3.0 μm,光斑大小为 1.5 μm,瓣直径为 8.00 mm,蒂置于鼻侧,蒂宽度为 3.05 mm,侧切角为 90°;预设瓣厚度为 110 μm。激光扫描结束后,掀开角膜瓣,采用准分子激光对角膜基质进行切削,平均光学直径为 6.2 mm,角膜瓣下冲洗并复位。

**1.2.3 术后处理及随访** 术后均采用质量分数 0.3% 氧氟沙星滴眼液点眼 3 d,4 次/d,质量分数 0.1% 氟米龙滴眼液点眼,4 次/d,每 2 周递减 1 次,2 个月后停药。分别于术后 1、3 和 6 个月检查术眼裸眼视力和 BCVA,行电脑验光、显然验光、非接触眼压测量、裂隙灯显微镜检查、角膜地形图检查和波前像差检查。

**1.2.4 数据处理及计算方法** 应用 Matlab 编程软件将测量的波阵面像差统一转换为直径 6 mm 瞳孔下像差,取重复性好的 3 次结果的平均值作为所测眼波阵面像差的准确值,用 Zernike 多项式表示。由波阵面像差函数  $W(x,y)$  计算光瞳函数  $P(x,y)$ ,进一步可计算

得到光学传递函数(optical transfer function, OTF)。OTF 的振幅部分即为 MTF。计算获得连续的 0~143 c/d 的 MTF 值,选取 0~60 c/d 范围内的 MTF 值进行比较。应用 Matlab 编程软件计算术后 6 个月分别去除 2 个组低阶像差以及术后 6 个月 SMILE 组分别去除 Zernike 项高阶像

差中垂直彗差( $C_3^{-1}$ )、水平彗差( $C_3^1$ )和球差( $C_4^0$ )后的 MTF 值。

### 1.3 统计学方法

采用 SPSS 20.0 统计学软件进行统计分析。计量资料数据经 Shapiro-Wilk 检验证实呈正态分布,以 mean±SD 表示。2 个组术前年龄、球镜度数、柱镜度数、CCT、Km 的比较和术后 6 个月 MTF 值以及去除低阶相差后 MTF 值差异的比较采用独立样本 *t* 检验;各空间频率下 2 个组手术前后不同时间点 MTF 值差异的总体比较采用重复测量单因素方差分析,多重比较采用 Dunnett-*t* 检验;2 个组术后 6 个月分别去除  $C_3^{-1}$ 、 $C_3^1$  和  $C_4^0$  后 MTF 值的差异比较采用配对 *t* 检验。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 2 个组术后一般情况

2 个组术后 6 个月术眼裸眼视力均  $\geq 1.0$ ,且均达到术前 BCVA,无角膜上皮下雾状混浊等并发症。

### 2.2 2 个组手术前后不同时间点 MTF 值的变化

术后 1、3、6 个月各空间频率下 SMILE 组和 FS-LASIK 组 6 mm 瞳孔直径 MTF 值均较术前明显增加,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。FS-LASIK 组术后 MTF 值随时间延长逐渐降低(表 2,3)。

### 2.3 2 个组术后 MTF 值变化的比较

SMILE 组术后 1、3、6 个月各空间频率下 MTF 值均高于 FS-LASIK 组(图 1);术后 1 个月和 3 个月 2 个组各空间频率下 MTF 值比较差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ );术后 6 个月,除 55 c/d 和 60 c/d 空间频率外,其余空间频率下 SMILE 组 MTF 值明显高于 FS-LASIK 组,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ ) (表 4)。术后 6 个月去除低阶像差后,SMILE 组各空间频率下 MTF 值明显高于 FS-LASIK 组,差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ ) (图 2,表 4)。

2.4 术后 6 个月 SMILE 组去除球差、彗差后各空间频率下 MTF 值变化的比较

术后 6 个月 SMILE 组去除  $C_4^0$  和  $C_3^1$  后, 1 c/d 空间频率下 MTF 值较去除前升高, 差异均有统计学意义

(均  $P < 0.01$ ); 去除  $C_3^{-1}$  后, 1 c/d 和 3 c/d 空间频率下 MTF 值较去除前升高, 差异均有统计学意义(均  $P < 0.05$ )。其余空间频率下去除单项高阶像差后 MTF 值与去除前比较差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ )(表 5)。

表 2 SMILE 组不同空间频率下手术前后不同时间点 MTF 值变化比较 (mean±SD)

Table 2 Comparison of the MTF values at different spatial frequencies among different time points in the SMILE group (mean±SD)

空间频率 (c/d)	眼数	手术前后不同时间点 MTF 值				F 值	P 值
		术前	术后 1 个月	术后 3 个月	术后 6 个月		
1	53	0.073±0.098	0.782±0.134 <sup>a</sup>	0.721±0.165 <sup>ab</sup>	0.731±0.164 <sup>ab</sup>	651.208	<0.01
3	53	0.030±0.035	0.544±0.197 <sup>a</sup>	0.474±0.228 <sup>ab</sup>	0.482±0.235 <sup>ab</sup>	194.649	<0.01
5	53	0.012±0.028	0.342±0.175 <sup>a</sup>	0.319±0.185 <sup>a</sup>	0.320±0.202 <sup>a</sup>	187.178	<0.01
10	53	0.006±0.015	0.215±0.132 <sup>a</sup>	0.192±0.139 <sup>a</sup>	0.196±0.149 <sup>a</sup>	59.787	<0.01
15	53	0.004±0.009	0.127±0.096 <sup>a</sup>	0.118±0.094 <sup>a</sup>	0.126±0.106 <sup>a</sup>	40.179	<0.01
20	53	0.002±0.005	0.098±0.075 <sup>a</sup>	0.086±0.075 <sup>a</sup>	0.095±0.084 <sup>a</sup>	32.735	<0.01
25	53	0.002±0.002	0.068±0.057 <sup>a</sup>	0.065±0.058 <sup>a</sup>	0.069±0.069 <sup>a</sup>	26.811	<0.01
30	53	0.002±0.002	0.049±0.042 <sup>a</sup>	0.052±0.049 <sup>a</sup>	0.055±0.059 <sup>a</sup>	22.003	<0.01
35	53	0.004±0.009	0.040±0.036 <sup>a</sup>	0.043±0.043 <sup>a</sup>	0.046±0.055 <sup>a</sup>	16.570	<0.01
40	53	0.009±0.016	0.033±0.031 <sup>a</sup>	0.034±0.035 <sup>a</sup>	0.039±0.049 <sup>a</sup>	9.419	<0.01
45	53	0.016±0.035	0.027±0.026 <sup>a</sup>	0.027±0.030 <sup>a</sup>	0.033±0.045 <sup>a</sup>	2.522	0.060
50	53	0.017±0.034	0.023±0.024 <sup>a</sup>	0.024±0.028 <sup>a</sup>	0.030±0.042 <sup>a</sup>	1.635	0.184
55	53	0.010±0.016	0.019±0.023 <sup>a</sup>	0.020±0.028 <sup>a</sup>	0.025±0.038 <sup>a</sup>	3.122	0.028
60	53	0.015±0.027	0.017±0.023 <sup>a</sup>	0.019±0.027 <sup>a</sup>	0.021±0.035 <sup>a</sup>	0.694	0.557

注:与各自术前 MTF 值比较,<sup>a</sup> $P < 0.05$ ;与术后 1 个月 MTF 值比较,<sup>b</sup> $P < 0.05$ (重复测量单因素方差分析, Dunnett-*t* 检验) SMILE:飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术;MTF:调制传递函数

Note:Compared with the respective preoperative MTF values,<sup>a</sup> $P < 0.05$ ;compared with the respective postoperative 1-month MTF values,<sup>b</sup> $P < 0.05$ (Repeated measurement one-way ANOVA, Dunnett-*t* test) SMILE:small-incision lenticule extraction;MTF:modulation transfer function

表 3 FS-LASIK 组不同空间频率下手术前后不同时间点 MTF 值变化比较 (mean±SD)

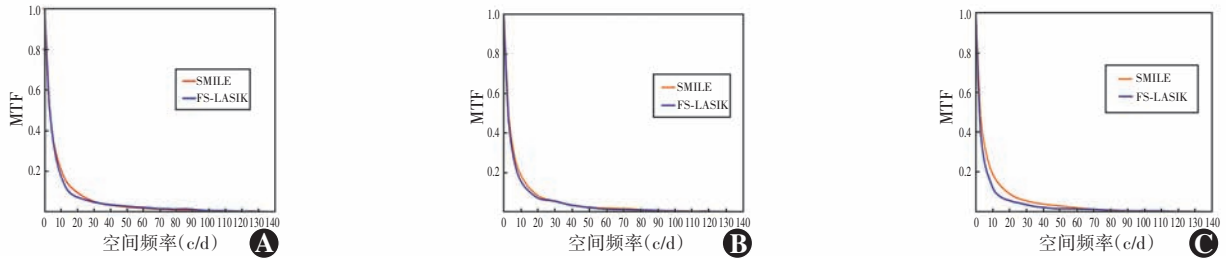
Table 3 Comparison of the MTF values at different spatial frequencies among different time points in the FS-LASIK group (mean±SD)

空间频率 (c/d)	眼数	手术前后不同时间点 MTF 值				F 值	P 值
		术前	术后 1 个月	术后 3 个月	术后 6 个月		
1	49	0.078±0.094	0.728±0.181 <sup>a</sup>	0.654±0.143 <sup>ab</sup>	0.605±0.196 <sup>ab</sup>	285.721	<0.01
3	49	0.034±0.052	0.523±0.179 <sup>a</sup>	0.432±0.180 <sup>ab</sup>	0.359±0.203 <sup>ab</sup>	104.939	<0.01
5	49	0.012±0.019	0.323±0.142 <sup>a</sup>	0.242±0.114 <sup>ab</sup>	0.207±0.130 <sup>abc</sup>	69.144	<0.01
10	49	0.005±0.007	0.172±0.103 <sup>a</sup>	0.132±0.092 <sup>a</sup>	0.116±0.090 <sup>abc</sup>	39.833	<0.01
15	49	0.003±0.004	0.112±0.065 <sup>a</sup>	0.101±0.072 <sup>a</sup>	0.074±0.058 <sup>ac</sup>	29.443	<0.01
20	49	0.002±0.003	0.073±0.050 <sup>a</sup>	0.063±0.039 <sup>a</sup>	0.053±0.044 <sup>a</sup>	27.135	<0.01
25	49	0.002±0.003	0.058±0.048 <sup>a</sup>	0.056±0.047 <sup>a</sup>	0.040±0.038 <sup>a</sup>	22.957	<0.01
30	49	0.003±0.006	0.054±0.029 <sup>a</sup>	0.052±0.036 <sup>a</sup>	0.031±0.028 <sup>a</sup>	21.983	<0.01
35	49	0.006±0.009	0.043±0.027 <sup>a</sup>	0.041±0.034 <sup>a</sup>	0.024±0.026 <sup>a</sup>	16.248	<0.01
40	49	0.019±0.011	0.034±0.028 <sup>a</sup>	0.032±0.026 <sup>a</sup>	0.020±0.021 <sup>a</sup>	10.690	<0.01
45	49	0.017±0.025	0.030±0.028 <sup>a</sup>	0.026±0.027 <sup>a</sup>	0.015±0.017 <sup>a</sup>	1.746	0.162
50	49	0.016±0.031	0.027±0.027 <sup>a</sup>	0.021±0.015 <sup>a</sup>	0.013±0.016 <sup>a</sup>	2.672	0.051
55	49	0.016±0.025	0.024±0.023 <sup>a</sup>	0.016±0.019 <sup>a</sup>	0.013±0.018 <sup>a</sup>	0.561	0.642
60	49	0.015±0.018	0.021±0.020 <sup>a</sup>	0.014±0.016 <sup>a</sup>	0.012±0.017 <sup>a</sup>	1.148	0.333

注:与各自术前 MTF 值比较,<sup>a</sup> $P < 0.05$ ;与术后 1 个月 MTF 值比较,<sup>b</sup> $P < 0.05$ ;与术后 3 个月 MTF 值比较,<sup>c</sup> $P < 0.05$ (重复测量单因素方差分析, Dunnett-*t* 检验) FS-LASIK:飞秒激光辅助准分子激光角膜原位磨镶术;MTF:调制传递函数

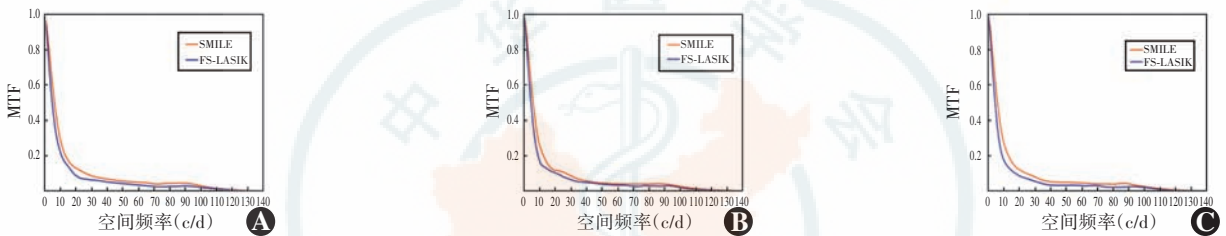
Note:Compared with the respective preoperative MTF values,<sup>a</sup> $P < 0.05$ ;compared with the respective postoperative 1-month MTF values,<sup>b</sup> $P < 0.05$ ;compared with the respective postoperative 3-month MTF values,<sup>c</sup> $P < 0.05$ (Repeated measurement one-way ANOVA, Dunnett-*t* test) FS-LASIK:femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis;MTF:modulation transfer function





**图 1 SMILE 组与 FS-LASIK 组术后 MTF 随空间频率变化的比较** (SMILE 组,  $n=53$ ; FS-LASIK 组,  $n=49$ ) 术后 1、3、6 个月 SMILE 组 MTF 曲线下面积均大于 FS-LASIK 组 A: 术后 1 个月 B: 术后 3 个月 C: 术后 6 个月 SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; FS-LASIK: 飞秒激光辅助准分子激光角膜原位磨镶术; MTF: 调制传递函数

**Figure 1 Comparison of postoperative MTF changes at different spatial frequencies between the SMILE group and FS-LASIK group** (SMILE group,  $n=53$ ; FS-LASIK group,  $n=49$ ) The area under the MTF curve in the SMILE group was larger than that in the FS-LASIK group at 1, 3, and 6 months after operation A: one month after surgery B: three months after surgery C: six months after surgery SMILE: small-incision lenticule extraction; FS-LASIK: femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis; MTF: modulation transfer function



**图 2 SMILE 组与 FS-LASIK 组术后去除低阶像差后 MTF 随空间频率变化的比较** (SMILE 组,  $n=53$ ; FS-LASIK 组,  $n=49$ ) 术后 1、3、6 个月 SMILE 组 MTF 曲线下面积均明显大于 FS-LASIK 组 A: 术后 1 个月 B: 术后 3 个月 C: 术后 6 个月 MTF: 调制传递函数; SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; FS-LASIK: 飞秒激光辅助准分子激光角膜原位磨镶术

**Figure 2 Comparison of MTF changes at different spatial frequencies without low-order aberration between the SMILE group and FS-LASIK group** (SMILE group,  $n=53$ ; FS-LASIK group,  $n=49$ ) The area under the MTF curve in the SMILE group was significantly larger than that of the FS-LASIK group at 1, 3, and 6 months after surgery A: one month after surgery B: three months after surgery C: six months after surgery MTF: modulation transfer function; SMILE: small-incision lenticule extraction; FS-LASIK: femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis

**表 4 术后 6 个月不同空间频率下 2 个组 MTF 值和去除低阶像差后 MTF 值的比较 (mean±SD)**  
**Table 4 Comparison of the postoperative 6-month MTF values with and without low order aberration at different spatial frequencies between the two groups (mean±SD)**

空间频率 (c/d)	术后 6 个月 MTF 值		t 值	P 值	术后 6 个月去除低阶像差后 MTF 值		t 值	P 值
	SMILE ( $n=53$ )	FS-LASIK ( $n=49$ )			SMILE ( $n=53$ )	FS-LASIK ( $n=49$ )		
5	0.320±0.202	0.207±0.130	2.425	0.018	0.534±0.180	0.392±0.173	3.544	<0.01
10	0.196±0.149	0.116±0.090	2.646	0.010	0.283±0.186	0.181±0.146	2.619	0.011
15	0.126±0.106	0.074±0.058	2.996	0.004	0.164±0.118	0.114±0.194	1.986	0.038
20	0.095±0.084	0.053±0.044	2.495	0.015	0.117±0.076	0.082±0.070	2.079	0.041
25	0.069±0.069	0.040±0.038	1.934	0.010	0.098±0.065	0.070±0.053	2.036	0.045
30	0.055±0.059	0.031±0.028	1.694	0.018	0.078±0.054	0.054±0.035	2.261	0.026
35	0.046±0.055	0.024±0.026	1.741	0.026	0.062±0.050	0.043±0.026	2.008	0.022
40	0.039±0.049	0.020±0.021	2.143	0.018	0.053±0.044	0.034±0.018	2.775	0.007
45	0.033±0.045	0.015±0.017	2.268	0.012	0.050±0.040	0.032±0.018	2.840	0.006
50	0.030±0.042	0.013±0.016	2.170	0.012	0.049±0.038	0.032±0.019	2.677	0.009
55	0.025±0.038	0.013±0.018	1.252	0.062	0.048±0.037	0.033±0.021	2.406	0.018
60	0.021±0.035	0.012±0.017	0.921	0.132	0.046±0.035	0.031±0.022	2.455	0.017

注: (独立样本 t 检验) MTF: 调制传递函数; SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; FS-LASIK: 飞秒激光辅助的准分子激光角膜原位磨镶术

Note: (Independent-samples t test) MTF: modulation transfer function; SMILE: small-incision lenticule extraction; FS-LASIK: femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis

表 5 SMILE 术后 6 个月不同空间频率下分别去除  $C_3^{-1}$ 、 $C_3^1$ 、 $C_4^0$  后 MTF 值与去除前 MTF 值比较 (mean±SD)  
Table 5 Comparison of postoperative 6-month MTF values at different spatial frequencies between the eyes with and without  $C_3^{-1}$ 、 $C_3^1$ 、 $C_4^0$  in the SMILE group (mean±SD)

空间频率 (c/d)	眼数	去除 $C_3^{-1}$ 后 MTF 值	去除 $C_3^1$ 后 MTF 值	去除 $C_4^0$ 后 MTF 值	术后 6 个月 MTF 值	t 值			P 值		
						$C_3^{-1}$	$C_3^1$	$C_4^0$	$C_3^{-1}$	$C_3^1$	$C_4^0$
1	53	0.742±0.159	0.738±0.159	0.782±0.145	0.731±0.164	4.684	3.722	9.816	<0.01	<0.01	<0.01
3	53	0.464±0.263	0.487±0.239	0.495±0.269	0.482±0.235	2.175	1.670	1.333	0.034	0.100	0.188
5	53	0.303±0.214	0.322±0.209	0.304±0.224	0.320±0.202	1.549	0.203	1.623	0.127	0.839	0.110
10	53	0.192±0.166	0.191±0.152	0.186±0.160	0.196±0.149	0.356	0.938	1.140	0.723	0.352	0.259
15	53	0.125±0.123	0.121±0.104	0.115±0.112	0.126±0.106	0.141	1.481	1.364	0.888	0.144	0.178
20	53	0.088±0.958	0.082±0.079	0.078±0.086	0.095±0.084	0.143	1.281	1.116	0.886	0.205	0.269
25	53	0.069±0.081	0.064±0.066	0.063±0.072	0.069±0.069	0.061	1.311	0.861	0.951	0.195	0.392
30	53	0.056±0.069	0.050±0.056	0.049±0.061	0.055±0.059	0.233	1.364	0.952	0.816	0.178	0.345
35	53	0.049±0.063	0.045±0.050	0.042±0.056	0.046±0.055	0.545	0.483	0.832	0.587	0.630	0.408
40	53	0.042±0.057	0.037±0.045	0.035±0.050	0.039±0.049	0.673	0.603	0.903	0.503	0.548	0.370
45	53	0.036±0.052	0.031±0.040	0.030±0.044	0.033±0.045	0.575	0.834	1.009	0.567	0.407	0.317
50	53	0.031±0.048	0.026±0.037	0.025±0.039	0.030±0.042	0.280	1.523	1.498	0.779	0.133	0.139
55	53	0.026±0.043	0.022±0.034	0.021±0.033	0.025±0.038	0.332	1.429	1.516	0.740	0.158	0.135
60	53	0.021±0.039	0.018±0.032	0.017±0.029	0.021±0.035	0.364	0.705	0.961	0.717	0.483	0.340

注:(配对 t 检验) SMILE:飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术;MTF:调制传递函数; $C_3^{-1}$ :垂直彗差; $C_3^1$ :水平彗差; $C_4^0$ :球差

Note:(Paired t test) SMILE:small-incision lenticule extraction;MTF:modulation transfer function; $C_3^{-1}$ :vertical coma aberration; $C_3^1$ :horizontal coma aberration; $C_4^0$ :spherical aberration

### 3 讨论

MTF 是将点扩散函数通过傅里叶变换得到的客观指标,反映了人眼光学系统对物体不同空间频率成分的传递能力,与视网膜的成像质量相关,即 MTF 越低,视觉质量越差。MTF 与对比敏感度有着密切的联系,但对比敏感度受视网膜神经通路的影响,为主观指标。MTF 可以从不同空间频率对视觉质量进行分析并且可以更加客观地描述手术后视觉质量的光学变化,应用 MTF 客观地评价视觉质量具有可靠性和优势。以往的研究多集中于角膜 MTF 的变化,虽然角膜屈光手术的变化发生在角膜前表面,但角膜像差和光学质量的评估并不足以描述眼的整体光学质量。本研究采用 Hartmann-Shack 技术像差测量仪测量全眼像差,应用 Matlab 编程将其转换为全眼 MTF,实现对眼的光学质量更加全面地评估。

本研究结果显示,SMILE 组与 FS-LASIK 组术后各空间频率下 MTF 值均较术前明显升高,差异均有统计学意义。由于 MTF 主要受人眼像差、衍射和瞳孔直径的影响<sup>[11]</sup>,本研究中像差均在相对暗环境下测量并且转换为瞳孔直径 6 mm 下像差进行比较分析,排除了瞳孔大小以及衍射的影响。正常人眼光学质量大多受低阶像差,即离焦的影响,由于 SMILE 组及 FS-LASIK 组手术后低阶像差大部分或完全被消除,因此术后

MTF 值大幅提升。本研究结果显示,SMILE 组较 FS-LASIK 组 MTF 值提升幅度更为明显,分析其可能与对视觉质量影响较大的散射和像差有关<sup>[1-2,11-13]</sup>。以往研究表明 SMILE 术后散射变化不明显,基本与术前相同,而 FS-LASIK 术后散射增加明显<sup>[14]</sup>。武志清等<sup>[15]</sup>研究指出,与 FS-LASIK 相比,SMILE 术后引入的全眼像差更少,术后光学质量更好。有研究证明角膜基质床的规则性与术后光学质量密切相关,基质床表面不规则会影响光线的传播路径,使术后产生更多的散射和像差<sup>[16]</sup>。也有研究显示准分子激光通过热损伤诱发基质胶原纤维横向收缩,使残留基质表面凹凸不平<sup>[17]</sup>;而飞秒激光主要通过光爆破作用对组织进行切削,切削形状以及深度精确可控,切削表面更加光滑<sup>[16]</sup>,对光路影响更小,产生的像差和散射更少,视觉光学质量更佳。本研究结果显示,去除低阶像差后,各空间频率下 SMILE 组 MTF 值较 FS-LASIK 组升高,差异均有统计学意义。由此推测 SMILE 术后引入的术源性高阶像差更少,获得的视觉质量更佳。

从空间频率的角度分析,SMILE 术后除 1 c/d 和 3 c/d 外,其余空间频率 MTF 值的变化相对较稳定,分析其原因可能与角膜愈合反应以及其引起的高阶像差等有关。1 c/d 和 3 c/d 空间频率下 MTF 值术后 3 个月和 6 个月均低于 1 个月,差异均有统计学意义,可能由于低频区受角膜伤口愈合等因素的影响。MTF 的

高频区描述物体的细节;中频区既反映视敏度,又反映视觉对比敏感度;低频区描述物体的轮廓<sup>[18]</sup>。由此可解释临床上常见的有患者主诉角膜屈光手术后视力很好但视物不清的原因。Gertnere 等<sup>[19]</sup>研究显示,屈光手术后患者对比敏感度下降,3~6 个月时逐渐恢复至术前,本研究中 MTF 在低、中频段的表现与 Gertnere 等<sup>[19]</sup>研究中对比敏感度的表现趋势基本一致。

有研究显示,屈光手术后引入的高阶像差以彗差和球差为主,因此本研究中将 SMILE 组影响视觉质量最大的球差与彗差分别去除后观察整体视觉质量的变化,发现彗差对 MTF 的影响明显大于球差且以垂直彗差为主,这与以往 LASIK 的研究结果不一致<sup>[20]</sup>,说明术后视觉质量可能与手术方式有关。SMILE 手术切口多位于垂直方向,愈合过程中对垂直方向上的高阶像差影响更大,且去除后变化集中表现在低空间频率,因此推测球差和彗差对低空间频率的 MTF 值影响较大。其他空间频率下去除高阶像差后 MTF 值反而低于之前的 MTF 值,可能与存在像差补偿有关。

本研究结果对屈光手术后视觉质量变化的诊断具有一定意义,可以根据 MTF 诊断患者的视觉问题出现在何种频率下,从而更有针对性地分析影响视觉质量的原因;同时提示屈光手术后出现一过性视觉质量下降可能与角膜基质愈合过程有关。本研究存在一定的局限性:本研究随访了术后 6 个月患者的客观视觉质量状况,随访时间较短,仍需要更长期的研究;此外,MTF 的变化受瞳孔直径的影响,研究发现瞳孔直径越大,MTF 值越低<sup>[20]</sup>,本研究统一转换为瞳孔直径 6 mm 情况下的像差,排除了瞳孔直径对 MTF 的影响,随后还应分组测量屈光手术后不同瞳孔直径下光学质量的变化。

综上所述,SMILE 和 FS-LASIK 术后均可大幅度提高 MTF 值,对视觉质量的提高有积极的影响。SMILE 术后 MTF 值略高于 FS-LASIK。然而,屈光手术后视觉质量的变化受多种因素的影响,因此仍需更加深入的研究和长期随访。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] Vestergaard A, Ivarsen AR, Asp S, et al. Small-incision lenticule extraction for moderate to high myopia: predictability, safety, and patient satisfaction[J]. J Cataract Refract Surg, 2012, 38(11): 2003-2010. DOI: 10.1016/j.jcrs.2012.07.021.

[4] Kamiya K, Shimizu K, Igarashi A, et al. Visual and refractive outcomes of femtosecond lenticule extraction and small-incision lenticule extraction for myopia[J]. Am J Ophthalmol, 2014, 157(1): 128-134. DOI: 10.1016/j.ajo.2013.08.011.

[5] Sinha Roy A, Dupps WJ Jr, Roberts CJ. Comparison of biomechanical effects of small-incision lenticule extraction and laser in situ keratomileusis: finite-element analysis[J]. J Cataract Refract Surg, 2014, 40(6): 971-980. DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.08.065.

[6] 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.

[7] Kamiya K, Shimizu K, Igarashi A, et al. Intraindividual comparison of changes in corneal biomechanical parameters after femtosecond lenticule extraction and small-incision lenticule extraction[J]. J Cataract Refract Surg, 2014, 40(6): 963-970. DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.12.013.

[8] Wei S, Wang Y. Comparison of corneal sensitivity between FS-LASIK and femtosecond lenticule extraction (ReLEx flex) or small-incision lenticule extraction (ReLEx smile) for myopic eyes[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2013, 251(6): 1645-1654. DOI: 10.1007/s00417-013-2272-0.

[9] He M, Huang W, Zhong X. Central corneal sensitivity after small incision lenticule extraction versus femtosecond laser-assisted LASIK for myopia: a meta-analysis of comparative studies[J/O]. BMC Ophthalmol, 2015, 15: 141[2020-09-28]. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26499875/. DOI: 10.1186/s12886-015-0129-5.

[10] Villegas EA, Alcón E, Artal P. Optical quality of the eye in subjects with normal and excellent visual acuity[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2008, 49(10): 4688-4696. DOI: 10.1167/iovs.08-2316.

[11] van Bree MC, van Verre HP, Devreese MT, et al. Straylight values after refractive surgery: screening for ocular fitness in demanding professions[J]. Ophthalmology, 2011, 118(5): 945-953. DOI: 10.1016/j.ophtha.2010.09.014.

[12] Braunstein RE, Jain S, McCally RL, et al. Objective measurement of corneal light scattering after excimer laser keratotomy[J]. Ophthalmology, 1996, 103(3): 439-443. DOI: 10.1016/s0161-6420(96)30674-x.

[13] Lee K, Ahn JM, Kim EK, et al. Comparison of optical quality parameters and ocular aberrations after wavefront-guided laser in-situ keratomileusis versus wavefront-guided laser epithelial keratomileusis for myopia[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2013, 251(9): 2163-2169. DOI: 10.1007/s00417-013-2356-x.

[14] 徐路路, 王雁, 刘洋辰, 等. SMILE 与 FS-LASIK 术后散射变化特性的比较[J]. 中华实验眼科杂志, 2015, 33(2): 159-164. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.02.013.

Xu LL, Wang Y, Liu YC, et al. Characteristics of straylight after small incision lenticule extraction versus femtosecond laser-assisted laser in situ keratomileusis[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2015, 33(2): 159-164. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.02.013.

[15] 武志清, 王雁, 张琳, 等. 飞秒激光小切口角膜基质内透镜取出术与飞秒激光 LASIK 术后高阶像差改变的对比研究[J]. 中华眼科杂志, 2015, 51(3): 193-201. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2015.03.009.

Wu ZQ, Wang Y, Zhang L, et al. Wavefront analysis and comparison between small incision lenticule extraction and femtosecond laser in situ keratomileusis[J]. Chin J Ophthalmol, 2015, 51(3): 193-201. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2015.03.009.

[16] Soong HK, Malta JB. Femtosecond lasers in ophthalmology[J]. Am J Ophthalmol, 2009, 147(2): 189-197. DOI: 10.1016/j.ajo.2008.08.026.

[17] McCafferty SJ, Schwiegerling JT, Enikov ET. Corneal surface asphericity, roughness, and transverse contraction after uniform scanning excimer laser ablation[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2012, 53(3): 1296-1305. DOI: 10.1167/iovs.11-9267.

[18] 王雁, 赵堪兴. 波前像差与临床视觉矫正[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 2.

[19] Gertnere J, Solomatin I, Sekundo W. Refractive lenticule extraction (ReLEx flex) and wavefront-optimized Femto-LASIK: comparison of contrast sensitivity and high-order aberrations at 1 year[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2013, 251(5): 1437-1442. DOI: 10.1007/s00417-012-2220-4.

[20] 王雁, 赵堪兴, 饶丰, 等. 准分子激光原位角膜磨镶术后调制传递函数变化与视觉质量关系的研究[J]. 中华眼科杂志, 2009, 45(7): 580-586. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2009.07.002.

Wang Y, Zhao KX, Rao F, et al. Visual quality evaluation on changes of MTF and wavefront aberration after laser in situ keratomileusis[J]. Chin J Ophthalmol, 2009, 45(7): 580-586. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2009.07.002.

(收稿日期:2021-03-10 修回日期:2021-04-19)

(本文编辑:刘艳 施晓萌)