

Kappa 角大小对 SMILE 手术前后全眼像差的影响及其意义

邵婷 王雁 郝维婷 张佳媚 崔彤

天津市眼科医院 南开大学附属眼科医院 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, 天津 300020

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

【摘要】 目的 探讨 Kappa 角大小对飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (SMILE) 前后全眼高阶像差 (HOA) 的影响。方法 采用系列病例观察研究方法, 纳入 2015 年 4 月至 2016 年 5 月在天津市眼科医院屈光手术中心行 SMILE 手术的近视及近视散光患者 98 例 98 眼, 均选取右眼进行研究。测量患者术前及术后 1 个月、3 个月的裸眼视力 (UCVA)、球镜度及柱镜度; 采用 Pentacam 眼前节分析系统测量术前 Kappa 角大小; 采用 WaveScan 波阵面像差仪测量术前及术后各时间点的全眼像差。比较手术前后 UCVA、屈光度及各项 HOA; 采用 Pearson 线性相关分析评估 Kappa 角大小与各项 HOA 之间的关系。根据 Kappa 角的范围及分布情况, 将 Kappa 角位移距离 ≥ 0.20 mm 的 34 眼作为较大 Kappa 角组, 在位移距离 < 0.20 mm 的 64 眼中随机选取 34 眼作为较小 Kappa 角组, 比较不同 Kappa 角组手术前后各项 HOA 的差异。结果 术前、术后 1 个月及 3 个月, 患者 UCVA (LogMAR 视力) 分别为 0.06 ± 0.23 、 -0.03 ± 0.07 和 -0.05 ± 0.07 , 总体比较差异有统计学意义 ($F = 779.330, P < 0.001$), 其中术后 1 个月及 3 个月 UCVA 均优于术前, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.001$)。术前、术后 1 个月及 3 个月, 患者球镜度、柱镜度和等效球镜度 (SE) 总体比较差异均有统计学意义 ($F = 1107.811$ 、 127.786 、 1191.266 , 均 $P < 0.001$), 其中术后各时间点球镜度、柱镜度和 SE 较术前均明显降低, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.001$)。手术前后总 HOA、球差、彗差、第 3 阶像差 (S3)、第 4 阶像差 (S4)、第 5 阶像差 (S5)、第 6 阶像差 (S6) 总体比较差异均有统计学意义 ($F = 75.915$ 、 78.231 、 66.186 、 64.521 、 97.161 、 36.623 、 28.852 , 均 $P < 0.001$), 其中术后各时间点总 HOA、球差、彗差、S3、S4、S5 和 S6 均较术前明显增大, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。术后 1 个月及 3 个月 Kappa 角大小与总 HOA、彗差、S3 均呈正相关 (总 HOA: $r = 0.357$ 、 0.363 , 均 $P < 0.001$; 彗差: $r = 0.310$ 、 0.341 , 均 $P < 0.01$; S3: $r = 0.343$ 、 0.371 , 均 $P < 0.01$)。手术前后不同大小 Kappa 角组患者总 HOA、彗差、S3 总体比较, 差异均有统计学意义 ($F_{\text{分组}} = 3.363$ 、 4.277 、 4.029 , 均 $P < 0.05$), 其中术后 1 个月及 3 个月, 较大 Kappa 角组总 HOA、彗差及 S3 均大于较小 Kappa 角组, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。结论 较大的 Kappa 角在 SMILE 术中可能会引入更多的高阶像差。

【关键词】 近视/手术; 角膜手术, 激光; 角膜波前像差; 飞秒激光; 小切口角膜基质透镜取出术; 波前像差; Kappa 角

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81670884、81873684)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20190305-00098

Influence and significance of angle Kappa on total ocular aberrations before and after SMILE surgery

Shao Ting, Wang Yan, Hao Weiting, Zhang Jiamei, Cui Tong

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

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

【Abstract】 **Objective** To investigate the influence of angle Kappa on total high-order aberration (HOA) before and after small incision lenticule extraction (SMILE). **Methods** An observational case series study was conducted. Right eyes of 98 patients with myopia and myopic astigmatism who underwent SMILE surgery at Tianjin Eye Hospital from April 2015 to May 2016 were selected. Uncorrected visual acuity (UCVA), spherical diopter and cylindrical diopter under cycloplegic condition were examined before the surgery and at 1 and 3 months postoperatively. The chord distance of angle Kappa was measured by Pentacam topography. Wavefront aberrations were measured by WaveScan aberrometer. Pre- and postoperative UCVA, refractive status and each HOA were analyzed. The relationship between angle Kappa and each HOA was analyzed by Pearson correlation. This study adhered to the

Declaration of Helsinki. The study protocol was approved by an Ethics Committee of Tianjin Eye Hospital (No. TJYYLL-2017-17). Written informed consent was obtained from each subject. **Results** The preoperative, postoperative 1-month and postoperative 3-month UCVA (LogMAR) were 0.06 ± 0.23 , -0.03 ± 0.07 and -0.05 ± 0.07 , respectively, showing a statistically significant difference ($F = 779.330, P < 0.001$). There were statistically significant differences in spherical diopter, cylinder diopter and spherical equivalent (SE) between before and after operation ($F = 1107.811, 127.786, 1191.266$; all at $P < 0.001$), and the postoperative spherical diopter, cylinder diopter and SE were significantly lower than those before surgery (all at $P < 0.001$). At 6-mm pupil diameter, significant differences were found between postoperative total HOA, spherical aberration, coma, the third-order aberration (S3), fourth-order aberration (S4), fifth-order aberration (S5) and sixth-order aberration (S6) and the preoperative values ($F = 75.915, 78.231, 66.186, 64.521, 97.161, 36.623, 28.852$; all at $P < 0.001$). The postoperative 1- and 3-month total HOA, spherical aberration, coma, S3, S4, S5 and S6 were significantly increased in comparison with those before surgery (all at $P < 0.05$). There was a positive correlation between angle Kappa and total HOA, coma and S3 at 1 and 3 months after surgery (total HOA: $r = 0.357, 0.363$; both at $P < 0.001$. coma: $r = 0.310, 0.341$; both at $P < 0.01$. S3: $r = 0.343, 0.371$; both at $P < 0.01$). Significant differences were found in preoperative, postoperative 1-month and 3-month total HOA, coma and S3 between groups with different angle Kappa ($F_{\text{group}} = 3.363, 4.277, 4.029$; all at $P < 0.05$). The postoperative total HOA, coma and S3 of the larger angle Kappa group were greater than those of the smaller angle Kappa group, with statistically significant differences between them (all at $P < 0.05$). **Conclusions** A larger angle Kappa may induce HOAs in SMILE surgery.

[**Key words**] Myopia/surgery; Corneal surgery, laser; Corneal wavefront aberration; Femtosecond laser; Small incision lenticule extraction; Wavefront aberration; Angle Kappa

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81670884, 81873684)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20190305-00098

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 在矫正近视及近视散光方面显示出较好的安全性、有效性、可预测性及稳定性^[1-4], 越来越广泛地应用于临床。影响 SMILE 术后视觉质量的因素有很多, Kappa 角即瞳孔轴与视轴之间的夹角, 是角膜屈光手术中不可忽略的重要因素。SMILE 与准分子激光角膜屈光手术部分原理不同, 其尚缺乏眼球跟踪系统。以往研究显示在准分子激光角膜原位磨镶术 (laser in situ keratomileusis, LASIK) 中, 对于 Kappa 角较大的患者则容易造成偏中心切削, 从而引起术后高阶像差 (high-order aberration, HOA) 的增大, 甚至影响视觉质量^[5-7]。但国内外对 SMILE 手术鲜有此类研究。本研究拟分析 Kappa 角大小对 SMILE 手术前后全眼 HOA 的影响, 为临床医师在行 SMILE 手术术中中心定位时提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

采用系列病例观察研究方法, 纳入 2015 年 4 月至 2016 年 5 月在天津市眼科医院屈光手术中心行 SMILE 手术的近视及近视散光患者 98 例 98 眼, 均选取右眼进行研究; 患者年龄 18~40 岁, 平均 (22.46 ± 4.58) 岁; 术前最佳矫正视力 (best corrected visual acuity, BCVA) 均 ≥ 0.8; 球镜度为 -1.50 ~ -8.25 D, 平

均 (-5.18 ± 1.56) D; 柱镜度为 0.00 ~ -2.25 D, 平均 (-0.66 ± 0.57) D; 等效球镜度 (spherical equivalent, SE) 为 -1.88 ~ -8.88 D, 平均 (-5.51 ± 1.61) D; 角膜中央厚度为 499~641 μm, 平均 (555.18 ± 26.83) μm; 平均角膜曲率为 40.5~46.5 D, 平均 (43.17 ± 1.18) D。纳入标准: (1) 年龄 ≥ 18 岁; (2) 角膜形态正常, 角膜透明且无云翳或斑翳; (3) 屈光度数稳定 2 年以上; (4) 软性角膜接触镜停戴 2 周以上, 硬性角膜接触镜停戴 4 周以上; (5) 能接受 Pentacam 眼前节分析系统和 WaveScan 波阵面像差仪检查者。排除标准: (1) 患有眼部其他疾病者, 如圆锥角膜或疑似圆锥角膜、角膜炎活动期、白内障、青光眼, 或者存在视神经病变、眼底病变等; (2) 曾有眼部外伤史或手术史者; (3) 患有自身免疫性疾病或全身结缔组织疾病者; (4) 患有其他全身疾病、精神疾病或无法配合检查者。术眼 Kappa 角大小为 0.01~0.36 mm, 平均 (0.16 ± 0.08) mm, 根据 Kappa 角范围及分布情况, 将 Kappa 角位移距离 ≥ 0.20 mm 的 34 眼作为较大 Kappa 角组, 在位移距离 < 0.20 mm 的 64 眼中采用随机数表法随机选取 34 眼作为较小 Kappa 角组, 2 个组术前基线资料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审核批准 (批文号: TJYYLL-2017-17), 所有研究对象术前均签署知情同意书。

表 1 2 个组术前基线资料比较 ($\bar{x} \pm s$)Table 1 Comparison of demographic characteristics between two groups ($\bar{x} \pm s$)

| 组别 | 眼数 | 年龄(岁) | 球镜度(D) | 柱镜度(D) | SE(D) | CCT(μm) | Km(D) |
|-------------|----|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|------------------|
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 21.91 \pm 3.89 | -5.21 \pm 1.56 | -0.73 \pm 0.66 | -5.57 \pm 1.62 | 554.06 \pm 24.93 | 42.99 \pm 1.29 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 21.62 \pm 4.05 | -5.13 \pm 1.66 | -0.74 \pm 0.57 | -5.50 \pm 1.70 | 558.71 \pm 32.20 | 43.28 \pm 1.17 |
| <i>t</i> 值 | | 0.305 | -0.188 | 0.049 | -0.173 | -0.665 | -0.986 |
| <i>P</i> 值 | | 0.761 | 0.851 | 0.961 | 0.863 | 0.508 | 0.328 |

注:(独立样本 *t* 检验) SE:等效球镜度;CCT:中央角膜厚度;Km:角膜平均曲率Note:(Independent samples *t* test) SE:spherical equivalent;CCT:central corneal thickness;Km:mean corneal curvature

1.2 方法

1.2.1 一般评估指标及其检查 所有患者均严格行常规屈光手术术前检查,包括裸眼视力(uncorrected visual acuity, UCVA)、BCVA、综合验光仪验光、检影验光、非接触式眼压计测量眼压、Pentacam 三维眼前节图像分析系统(德国 Oculus 公司)、WaveScan 像差仪(美国 Visx 公司)、裂隙灯显微镜及间接检眼镜检查。

1.2.2 SMILE 手术 手术由同一位经验丰富的医生完成。术术前用质量分数 0.5% 左氧氟沙星滴眼液及普拉洛芬滴眼液点眼,4 次/d,连续应用 3 d。常规消毒术眼,术中用质量分数 0.4% 盐酸奥布卡因滴眼液点眼 2 次行表面麻醉。患者取仰卧位,嘱患者注视固视灯,应用 VisxMax 飞秒激光系统(德国 Carl Zeiss 公司)制作基质内透镜和角膜切口,激光脉冲频率为 500 Hz,能量为 120~140 nJ。用负压吸引环压平以固定眼球,对准中心后启动负压吸引进行扫描切割。角膜帽厚度设置为 120 μm ,透镜基底厚度设置为 15 μm ,光学区直径为 6.50 mm,角膜帽直径为 7.50 mm,侧切角均为 90°。行基质内透镜后表面扫描,透镜侧切,再行透镜前表面扫描,于 12:00 方向制作 3 mm 微切口。完成扫描后用显微分离器将微透镜的前表面与上方角膜组织分开,分离微透镜后表面,将其游离后取出,平衡盐溶液冲洗角膜基质床。术后均给予 0.5% 左氧氟沙星滴眼液点眼,4 次/d,连续应用 3 d;采用质量分数 0.1% 氟米龙滴眼液点眼,4 次/d,每 2 周递减 1 次,直至停药。

1.2.3 波前像差的测定 术前、术后 1 个月及 3 个月,采用 WaveScan 像差仪测定术眼全眼波前像差,波前像差定义为波阵面与理想波阵面之间的差别。测量前患者需要暗适应 10 min,自然状态下测量瞳孔大小,嘱患者自然瞬目以排除泪膜的影响,3 s 内聚焦拍照,选取波前直径大于 6 mm、图像清晰并且重复性好、屈光度数与主观验光度数相近的 3 次结果,以上操作均由经验丰富的同一位医师完成。由于不同受检者或同一受检者在重复多次测量时瞳孔大小不一致,而瞳

孔大小与波前像差具有明显相关性^[8],所以所有的像差测量结果均应用 Matlab 8.6.0 软件转换为 6 mm 瞳孔直径下对应的各项 Zernike 系数均方根值(root mean square, RMS)以便于比较,像差数据均以 Zernike 系数表示,用 S3、S4、S5 和 S6 表示第 3、4、5 和 6 阶像差。采用 Pentacam 眼前节分析仪测量 Kappa 角和视轴,Kappa 角大小定义为角膜顶点距瞳孔中心的位移距离,角膜顶点默认为视轴与角膜前表面的交点。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 21.0 统计学软件进行统计分析。计量资料经 Kolmogorov-Smirnov 检验证实呈正态分布,以 $\bar{x} \pm s$ 表示。将裸眼小数值视力转换为 LogMAR 标准对数视力。采用患眼治疗前后自身对照研究设计,患眼手术前后视力、屈光度及各项 HOA 比较采用重复测量单因素方差分析,两两比较采用 Dunnett *t* 检验;不同 Kappa 角组术前基线资料及术后视力和屈光度比较采用独立样本 *t* 检验,术前、术后不同时间点总 HOA、球差、彗差、三叶草差及 S3~S6 像差的 RMS 值比较采用重复测量两因素方差分析,两两比较采用 Dunnett *t* 检验;Kappa 角大小与各项 HOA 之间的关系评估采用 Pearson 线性相关分析,对相关系数进行假设检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 术眼手术前后 UCVA 和屈光度比较

术眼手术前后 UCVA 和球镜度、柱镜度、SE 总体比较差异均有统计学意义($F = 779.330, 1107.811, 127.786, 1191.266$, 均 $P < 0.001$),其中与术前值比较,术眼术后各时间点 UCVA 明显提高,球镜度、柱镜度及 SE 均明显降低,差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$)(表 2)。

2.2 手术前后全眼各项 HOA 比较

手术前后总 HOA、球差、彗差、S3、S4、S5 和 S6 总体比较,差异均有统计学意义($F = 75.915, 78.231, 66.186, 64.521, 97.161, 36.623, 28.852$, 均

表 2 术眼 SMILE 手术前后 UCVA 及屈光度比较($\bar{x}\pm s$)

Table 2 Comparison of UCVA and refractive status before and after SMILE ($\bar{x}\pm s$)

| 时间 | 眼数 | UCVA(LogMAR) | 球镜度(D) | 柱镜度(D) | SE(D) |
|---------|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 术前 | 98 | 0.60±0.23 | -5.18±1.56 | -0.66±0.57 | -5.51±0.61 |
| 术后 1 个月 | 98 | -0.03±0.07 ^a | -0.05±0.18 ^a | -0.02±0.13 ^a | -0.06±0.19 ^a |
| 术后 3 个月 | 98 | -0.05±0.07 ^a | -0.06±0.16 ^a | -0.03±0.14 ^a | -0.07±0.17 ^a |
| F 值 | | 779.330 | 1 107.811 | 127.786 | 1 191.266 |
| P 值 | | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

注:与各自术前值比较,^a $P<0.001$ (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;UCVA:裸眼视力;SE:等效球镜度

Note: Compared with respective preoperative value, ^a $P<0.001$ (Repeated measures one-way ANOVA, Dunnett *t* test) SMILE: small incision lenticule extraction; UCVA: uncorrected visual acuity; SE: spherical equivalent

$P<0.001$), 其中术后各时间点全眼总 HOA 及各 Zernike 项值均较术前增加, 差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。手术前后各时间点三叶草像差总体比较, 差异无统计学意义($F=2.344, P>0.05$) (表 3)。

2.3 Kappa 角大小与术后各 HOA 之间的相关性分析

术后 1 个月, Kappa 角大小与总 HOA、彗差、S3 均呈正相关 ($r=0.357, P<0.001; r=0.310, P=0.002; r=0.343, P=0.001$), 其余各项与 Kappa 角大小无明显线性相关性(均 $P>0.05$); 术后 3 个月, Kappa 角大小与总 HOA、彗差、S3 均呈正相关 ($r=$

$0.363, P<0.001; r=0.341, P=0.001; r=0.371, P<0.001$), 其余各项与 Kappa 角大小无明显线性相关性(均 $P>0.05$) (图 1, 2)。

2.4 术后不同大小 Kappa 角组间视力及屈光度比较

术后 1 个月及 3 个月, 较大 Kappa 角组和较小 Kappa 角组间视力及屈光度比较差异均无统计学意义(均 $P>0.05$) (表 4, 5)。

2.5 6 mm 瞳孔下不同大小 Kappa 角组间手术前后各项 HOA 比较

手术前后 2 个组患者的总 HOA、彗差和 S3 总体比较, 差异均有统计学意义 ($F_{\text{分组}}=3.363, 4.277, 4.029$, 均 $P<0.05; F_{\text{时间}}=51.057, 19.190, 22.378$, 均 $P<0.001; F_{\text{交互作用}}=4.508, 6.303, 3.526$, 均 $P<0.05$)。术后 1 个月及 3 个月, 较大 Kappa 角组总 HOA、彗差和 S3 显著大于较小 Kappa 角组, 差异均有统计学意义(均 $P<0.05$), 其余各项 HOA 组间比较差异均无统计学意义(均 $P>0.05$) (表 6~13)。

表 3 SMILE 手术前后全眼各项 HOA 的 RMS 比较($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

Table 3 Comparison of ocular aberrations between before and after SMILE ($\bar{x}\pm s, \mu\text{m}$)

| 时间 | 眼数 | 不同 Zernike 项值 | | | | | | | |
|---------|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 总 HOA | 球差 | 彗差 | 三叶草差 | S3 | S4 | S5 | S6 |
| 术前 | 98 | 0.289±0.112 | 0.110±0.072 | 0.169±0.112 | 0.142±0.071 | 0.233±0.109 | 0.148±0.066 | 0.046±0.022 | 0.034±0.018 |
| 术后 1 个月 | 98 | 0.403±0.094 ^a | 0.184±0.093 ^a | 0.250±0.108 ^a | 0.159±0.082 | 0.315±0.093 ^a | 0.225±0.079 ^a | 0.074±0.025 ^a | 0.047±0.021 ^a |
| 术后 3 个月 | 98 | 0.424±0.097 ^a | 0.185±0.093 ^a | 0.277±0.121 ^a | 0.152±0.087 | 0.337±0.106 ^a | 0.225±0.079 ^a | 0.073±0.024 ^a | 0.051±0.022 ^a |
| F 值 | | 75.915 | 78.231 | 66.186 | 2.344 | 64.521 | 97.161 | 36.623 | 28.852 |
| P 值 | | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.076 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <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:飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术;HOA:高阶像差;RMS:均方根值;S3:第 3 阶像差;S4:第 4 阶像差;S5:第 5 阶像差;S6:第 6 阶像差

Note: Compared with preoperative value, ^a $P<0.05$ (Repeated measures one-way ANOVA, Dunnett *t* test) SMILE: small incision lenticule extraction; HOA: high-order aberration; RMS: root mean square; S3: third-order aberration; S4: fourth-order aberration; S5: fifth-order aberration; S6: sixth-order aberration

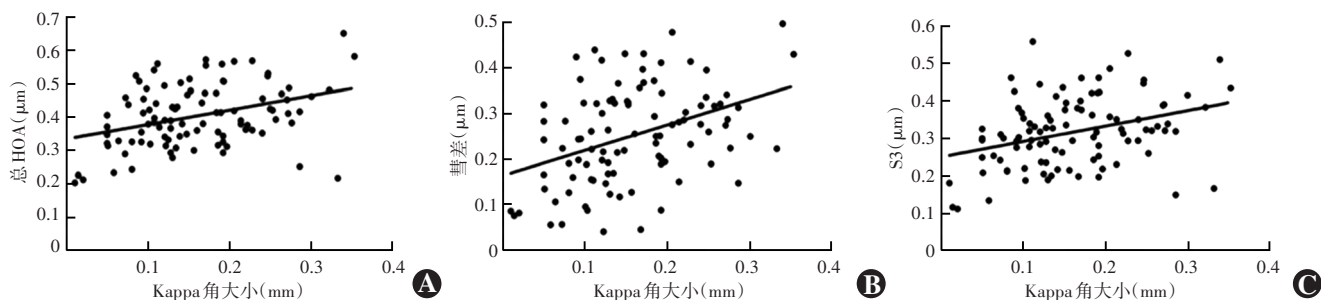


图 1 SMILE 术后 1 个月 Kappa 角大小与总 HOA、彗差、S3 的相关性 (Pearson 线性相关分析, $n=98$) A~C: Kappa 角大小与总 HOA、彗差、S3 均呈正相关($r=0.357, 0.310, 0.343$, 均 $P<0.05$) HOA: 高阶像差; S3: 第 3 阶像差

Figure 1 Correlation between angle kappa and ocular aberrations at one month after SMILE (Pearson linear correlation analysis, $n=98$) A~C: Angle kappa was positively correlated with total HOA, coma, and S3 ($r=0.357, 0.310, 0.343$; all at $P<0.05$) HOA: high-order aberration; S3: third-order aberration

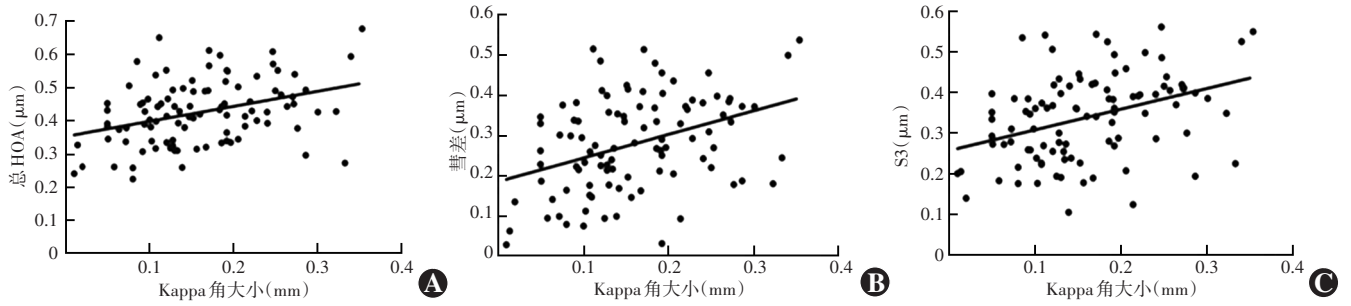


图 2 SMILE 术后 3 个月 Kappa 角大小与总 HOA、彗差、S3 的相关性 (Pearson 线性相关分析, $n = 98$) A~C: Kappa 角大小与总 HOA、彗差、S3 均呈正相关 ($r = 0.363, 0.341, 0.371$, 均 $P < 0.05$) HOA: 高阶像差; S3: 第 3 阶像差

Figure 2 Correlation between angle Kappa and ocular aberrations at 3 months after SMILE (Pearson linear correlation analysis, $n = 98$) A~C: Angle Kappa was positively correlated with total HOA, coma, and S3 ($r = 0.363, 0.341, 0.371$; all at $P < 0.05$) HOA: high-order aberration; S3: third-order aberration

表 4 2 个组 SMILE 术后 1 个月视力及屈光度比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 4 Comparison of postoperative one-month visual acuity and refractive status between two groups ($\bar{x} \pm s$)

| 组别 | 眼数 | UCVA (LogMAR) | 球镜度 (D) | 柱镜度 (D) | SE (D) |
|-------------|----|---------------|------------|------------|------------|
| 较大 Kappa 角组 | 34 | -0.02±0.07 | -0.06±0.20 | -0.03±0.12 | -0.07±0.21 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | -0.03±0.07 | -0.04±0.14 | -0.04±0.17 | -0.07±0.17 |
| <i>t</i> 值 | | 0.546 | -0.343 | 0.037 | 0.278 |
| <i>P</i> 值 | | 0.587 | 0.733 | 0.679 | 0.873 |

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; UCVA: 裸眼视力; SE: 等效球镜度

Note: (Independent samples *t* test) SMILE: small incision lenticule extraction; UCVA: uncorrected visual acuity; SE: spherical equivalent

表 5 2 个组 SMILE 术后 3 个月视力及屈光度比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 5 Comparison of postoperative 3-month visual acuity and refractive status between two groups ($\bar{x} \pm s$)

| 组别 | 眼数 | UCVA (LogMAR) | 球镜度 (D) | 柱镜度 (D) | SE (D) |
|-------------|----|---------------|------------|------------|------------|
| 较大 Kappa 角组 | 34 | -0.05±0.06 | -0.07±0.17 | -0.05±0.13 | -0.09±0.19 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | -0.05±0.06 | -0.05±0.12 | -0.03±0.17 | -0.07±0.15 |
| <i>t</i> 值 | | -0.041 | -0.418 | -0.590 | -0.622 |
| <i>P</i> 值 | | 0.967 | 0.677 | 0.557 | 0.536 |

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; UCVA: 裸眼视力; SE: 等效球镜度

Note: (Independent samples *t* test) SMILE: small incision lenticule extraction; UCVA: uncorrected visual acuity; SE: spherical equivalent

表 6 2 个组 SMILE 手术前后不同时间点总 HOA 比较 ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

Table 6 Comparison of total HOA at different time points before and after SMILE between two groups ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

| 组别 | 眼数 | 不同时间点总 HOA | | |
|-------------|----|-------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 术前 | 术后 1 个月 | 术后 3 个月 |
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 0.282±0.095 | 0.427±0.103 | 0.452±0.096 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 0.296±0.120 | 0.381±0.090 ^a | 0.403±0.090 ^a |

注: $F_{\text{分组}} = 3.363, P = 0.041; F_{\text{时间}} = 51.057, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 4.508, P = 0.032$. 与各自时间点较大 Kappa 角组比较, ^a $P < 0.05$ (重复测量两因素方差分析, Dunnett *t* 检验) SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; HOA: 高阶像差

Note: $F_{\text{group}} = 3.363, P = 0.041; F_{\text{time}} = 51.057, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 4.508, P = 0.032$. Compared with respective larger angle Kappa group, ^a $P < 0.05$ (Repeated measures two-way ANOVA, Dunnett *t* test) SMILE: small incision lenticule extraction; HOA: high-order aberration

表 7 2 个组 SMILE 手术前后不同时间点球差比较 ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

Table 7 Comparison of spherical aberration at different time points before and after SMILE between two groups ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

| 组别 | 眼数 | 不同时间点球差 | | |
|-------------|----|-------------|-------------|-------------|
| | | 术前 | 术后 1 个月 | 术后 3 个月 |
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 0.108±0.071 | 0.197±0.093 | 0.193±0.094 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 0.111±0.060 | 0.175±0.097 | 0.184±0.100 |

注: $F_{\text{分组}} = 0.219, P > 0.05; F_{\text{时间}} = 53.477, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 1.104, P > 0.05$ (重复测量两因素方差分析) SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术

Note: $F_{\text{group}} = 0.219, P > 0.05; F_{\text{time}} = 53.477, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 1.104, P > 0.05$ (Repeated measures two-way ANOVA) SMILE: small incision lenticule extraction

表 8 2 个组 SMILE 手术前后不同时间点彗差比较
($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

Table 8 Comparison of coma at different time points before and after SMILE between two groups ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

| 组别 | 眼数 | 不同时间点彗差 | | |
|-------------|----|-------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 术前 | 术后 1 个月 | 术后 3 个月 |
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 0.152±0.106 | 0.283±0.100 | 0.305±0.118 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 0.176±0.114 | 0.224±0.105 ^a | 0.245±0.110 ^a |

注: $F_{\text{分组}} = 4.277, P = 0.047; F_{\text{时间}} = 19.190, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 6.303, P = 0.015$ 。与各自时间点较大 Kappa 角组比较, ^a $P < 0.01$ (重复测量两因素方差分析, Dunnett t 检验) SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术

Note: $F_{\text{group}} = 4.277, P = 0.047; F_{\text{time}} = 19.190, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 6.303, P = 0.015$. Compared with respective larger angle Kappa group, ^a $P < 0.01$ (Repeated measures two-way ANOVA, Dunnett t test) SMILE: small incision lenticule extraction

表 9 2 个组 SMILE 手术前后不同时间点三叶草差比较
($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

Table 9 Comparison of trefoil aberration at different time points before and after SMILE between two groups ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

| 组别 | 眼数 | 不同时间点三叶草差 | | |
|-------------|----|-------------|-------------|-------------|
| | | 术前 | 术后 1 个月 | 术后 3 个月 |
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 0.151±0.070 | 0.176±0.094 | 0.180±0.093 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 0.152±0.077 | 0.163±0.067 | 0.174±0.074 |

注: $F_{\text{分组}} = 0.398, P > 0.05; F_{\text{时间}} = 2.407, P > 0.05; F_{\text{交互作用}} = 0.860, P > 0.05$ (重复测量两因素方差分析) SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术

Note: $F_{\text{group}} = 0.398, P > 0.05; F_{\text{time}} = 2.407, P > 0.05; F_{\text{interaction}} = 0.860, P > 0.05$ (Repeated measures two-way ANOVA) SMILE: small incision lenticule extraction

表 10 2 个组 SMILE 手术前后不同时间点 S3 比较
($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

Table 10 Comparison of S3 at different time points before and after SMILE between two groups ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

| 组别 | 眼数 | 不同时间点 S3 | | |
|-------------|----|-------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 术前 | 术后 1 个月 | 术后 3 个月 |
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 0.228±0.098 | 0.339±0.101 | 0.373±0.105 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 0.238±0.123 | 0.293±0.081 ^a | 0.311±0.093 ^a |

注: $F_{\text{分组}} = 4.029, P = 0.022; F_{\text{时间}} = 22.378, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 3.526, P = 0.017$ 。与各自时间点较大 Kappa 角组比较, ^a $P < 0.05$ (重复测量两因素方差分析, Dunnett t 检验) SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; S3: 第 3 阶像差

Note: $F_{\text{group}} = 4.029, P = 0.022; F_{\text{time}} = 22.378, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 3.526, P = 0.017$. Compared with respective larger angle Kappa group, ^a $P < 0.05$ (Repeated measures two-way ANOVA, Dunnett t test) SMILE: small incision lenticule extraction; S3: third-order aberration

表 11 2 个组 SMILE 手术前后不同时间点 S4 比较
($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

Table 11 Comparison of S4 at different time points before and after SMILE between two groups ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

| 组别 | 眼数 | 不同时间点 S4 | | |
|-------------|----|-------------|-------------|-------------|
| | | 术前 | 术后 1 个月 | 术后 3 个月 |
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 0.142±0.058 | 0.231±0.081 | 0.228±0.083 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 0.152±0.052 | 0.224±0.079 | 0.232±0.081 |

注: $F_{\text{分组}} = 0.030, P > 0.05; F_{\text{时间}} = 72.834, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 0.646, P > 0.05$ (重复测量两因素方差分析) SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; S4: 第 4 阶像差

Note: $F_{\text{group}} = 0.030, P > 0.05; F_{\text{time}} = 72.834, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 0.646, P > 0.05$ (Repeated measures two-way ANOVA) SMILE: small incision lenticule extraction; S4: fourth-order aberration

表 12 2 个组 SMILE 手术前后不同时间点 S5 比较
($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

Table 12 Comparison of S5 at different time points before and after SMILE between two groups ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

| 组别 | 眼数 | 不同时间点 S5 | | |
|-------------|----|-------------|-------------|-------------|
| | | 术前 | 术后 1 个月 | 术后 3 个月 |
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 0.043±0.016 | 0.069±0.021 | 0.072±0.026 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 0.046±0.023 | 0.074±0.027 | 0.076±0.022 |

注: $F_{\text{分组}} = 2.532, P > 0.05; F_{\text{时间}} = 48.723, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 2.044, P > 0.05$ (重复测量两因素方差分析) SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; S5: 第 5 阶像差

Note: $F_{\text{group}} = 2.532, P > 0.05; F_{\text{time}} = 48.723, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 2.044, P > 0.05$ (Repeated measures two-way ANOVA) SMILE: small incision lenticule extraction; S5: fifth-order aberration

表 13 2 个组 SMILE 手术前后不同时间点 S6 比较
($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

Table 13 Comparison of S6 at different time points before and after SMILE between two groups ($\bar{x} \pm s, \mu\text{m}$)

| 组别 | 眼数 | 不同时间点 S6 | | |
|-------------|----|-------------|-------------|-------------|
| | | 术前 | 术后 1 个月 | 术后 3 个月 |
| 较大 Kappa 角组 | 34 | 0.032±0.013 | 0.047±0.017 | 0.052±0.024 |
| 较小 Kappa 角组 | 34 | 0.036±0.025 | 0.051±0.023 | 0.051±0.022 |

注: $F_{\text{分组}} = 0.727, P > 0.05; F_{\text{时间}} = 24.092, P < 0.001; F_{\text{交互作用}} = 0.318, P > 0.05$ (重复测量两因素方差分析) SMILE: 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; S6: 第 6 阶像差

Note: $F_{\text{group}} = 0.727, P > 0.05; F_{\text{time}} = 24.092, P < 0.001; F_{\text{interaction}} = 0.318, P > 0.05$ (Repeated measures two-way ANOVA) SMILE: small incision lenticule extraction; S6: sixth-order aberration

3 讨论

SMILE 作为新型角膜屈光手术越来越显示出其所特有的优势及发展潜力,术后视力、屈光状态明显改善,术后的神经损伤较小,并在视觉质量及生物力学等方面均有较好的结果^[9-13]。Kappa 角被认为是瞳孔轴与视轴之间的夹角,人眼的瞳孔轴是指与角膜前表面曲率中心垂直并连接瞳孔中心的连线,视轴是指由眼外注视(固视)点通过结点与黄斑的连线^[5,14]。SMILE 目前尚无眼球跟踪系统,患者术前存在较大的 Kappa 角是否会影响视觉质量尚不清楚。本研究旨在分析当 SMILE 术中暂无对 Kappa 角大小及方向进行中心调整时 Kappa 角大小对 SMILE 手术前后全眼 HOA 可能的影响。

本研究结果显示,术后各时间点 HOA 明显大于术前,除三叶草像差外均有统计学意义,与以往的研究结果相符^[9]。正常的 SMILE 术后 HOA 增加以球差和彗差为主,微切口 SMILE 术后较好地保持了角膜长椭圆形的特性,术后球差增加与准分子激光角膜切削术和 LASIK 等术式相比较少^[15]。彗差以垂直方向上改变为主,因 SMILE 以角膜帽替代了角膜瓣,可以大大减少由此引起的 HOA 增加,但手术过程中在角膜 12:00 方向做 2~3 mm 的小切口,增加了角膜上下方的不对称性,因其特殊的伤口愈合方式,使其沿切口方向,也就是垂直方向的彗差变化较大^[9]。此外,SMILE 手术过程中未根据 Kappa 角调整中心,或许是造成 SMILE 术后彗差增加的原因之一。

本研究中 Kappa 角大小与术后各项 HOA 之间相关性分析结果显示,术后 1 个月和 3 个月时,Kappa 角大小与总 HOA、彗差、S3 均呈正相关。这反映出当患者 Kappa 角较大时术后 HOA 可能会越大,从而影响患者术后的视觉质量。这也从侧面说明了可根据 Kappa 角大小推测术后 HOA 的大小,尤其当出现较大 Kappa 角时,应尽可能在术中中心定位时将其考虑进去。

本研究结果还显示,术后 1 个月及 3 个月时,较大 Kappa 角组和较小 Kappa 角组间视力及屈光度比较差异均无统计学意义,但较大 Kappa 角组的总 HOA、彗差及 S3 明显大于较小 Kappa 角组,且差异均有统计学意义,这可能由于近视患者 Kappa 角普遍较小,所引起的偏中心还不足以引起视力及屈光度等低阶像差的明显改变。Mrochen 等^[16]以及 Fang 等^[17]的研究均显示,亚临床的偏中心切削(<1.0 mm)是导致屈光手术后彗差和球差增大的主要原因。本研究中患者术后彗差及球差均大于术前,但较小 Kappa 角组增加较少,这

可能是因为小 Kappa 角更接近于视轴,避免了偏中心切削,也避免了引入更多的 HOA。

既往研究显示,在 LASIK 术中,若患者 Kappa 角较大,将可能导致偏中心切削^[5],术后引入较大的 HOA,出现夜视力下降、眩光和光晕等现象^[6-7]。调整 Kappa 角在 LASIK 治疗远视中也可明显减少偏中心切削^[18]。理论分析和临床数据分析均表明,偏心切削会产生明显的彗差,这是因为偏心切削在角膜表面形成旁轴光学问题,因此对于整个人眼的光学系统来说,也就不可避免地产生较大的 HOA,特别是彗差^[19]。说明在较大 Kappa 角的患者中,适当调整与否对其术后 HOA 影响较大,所以 Kappa 角越大,调整的意义也就越大。本研究探讨 Kappa 角大小对 SMILE 手术前后全眼 HOA 可能产生的影响,当较大 Kappa 角存在时 SMILE 术中导致的偏中心切削及其对像差的进一步影响(包括各项像差之间的补偿作用等)以及对视觉质量的影响可作为下一步的研究方向。

虽然以瞳孔中心为切削中心的角膜屈光手术已被接受并作为多年的标准,但是更多的证据表明这可能不是最佳选择,在屈光手术中以视轴作为切削中心是优化视觉结果的关键^[20-21],原因之一是入瞳 Kappa 角普遍存在,且随着照明条件的改变,入瞳中心的位置根据瞳孔大小的变化而变化^[22]。Arbelaez 等^[23]比较了 52 例行 LASIK 手术的中等角度到大角度 Kappa 角的近视患者,结果显示以视轴为中心的患者在像差和非球面性方面优于以瞳孔为中心的患者,但 2 个组的明视力无显著差异。Okamoto 等^[24]比较了行 LASIK 手术治疗近视未知 Kappa 角度的 556 眼,结果同样显示以视轴为中心的手术比以瞳孔为中心的手术更安全、有效,且彗差的引入和总体 HOA 较低。Liu 等^[25]的研究也表明,在 SMILE 手术中当微透镜中心更靠近视轴与角膜的交点时,可以获得更好的屈光结果。瞳孔与像差的关系较密切,暗环境下随着瞳孔增大,像差也明显增大^[26],且人眼夜视力、眩光、复视等视觉症状与 Zernike 各项像差关系密切,靠近 Zernike 金字塔中心的项,如球差、离焦、散光、彗差等对视觉质量影响较大^[12]。偏中心切削引入的 HOA 可能在亮光下对人的视觉质量影响较小,而在暗光下影响较大。在屈光手术后,当瞳孔扩大时,光线经过切削区与非切削区的连接部,增加了像差,降低了视网膜图像的对比度^[27]。下一步可以探讨 SMILE 术中调整与不调整 Kappa 角对术后像差的影响。

综上所述,本研究结果显示 SMILE 术中无论 Kappa 角大小均能有效矫正近视和散光,但同时也均

术后 HOA 增大,较大 Kappa 角组的 HOA 显著大于较小 Kappa 角组,表明 SMILE 术中为了准确的中心定位,对于存在较大的 Kappa 角时可考虑给予适当的调整,也需要更多的验证,这对于 SMILE 手术中为达到精准的矫正效果具有一定的提示和指导作用。未来还应对患者的主观视觉质量和症状、散射、对比敏感度等方面进行进一步的综合分析。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 邵婷:参与选题、酝酿和设计试验、实施研究、采集数据、分析/解释数据、起草文章、对文章知识性内容的审阅和智力性内容的修改;王雁:参与选题、酝酿和设计试验、实施研究、对文章知识性内容的审阅和智力性内容的修改及定稿;郝维婷:采集数据、分析/解释数据、起草文章;张佳媚:对文章知识性内容的审阅和智力性内容的修改;崔彤:参与选题、酝酿和设计试验

参考文献

- [1] 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.
- [2] Albou-Ganem C, Lavaud A, Amar R. SMILE: refractive lenticule extraction for myopic correction [J]. *J Fr Ophtalmol*, 2015, 38 (3): 229-237. DOI: 10.1016/j.jfo.2014.11.001.
- [3] Reinstejn DZ, Carp GI, Archer TJ, et al. Outcomes of small incision lenticule extraction (SMILE) in low myopia [J]. *J Refract Surg*, 2014, 30 (12): 812-818. DOI: 10.3928/1081597X-20141113-07.
- [4] 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.
- [5] Basmak H, Sahin A, Yildirim N, et al. Measurement of angle kappa with synoptophore and Orbscan II in a normal population [J]. *J Refract Surg*, 2007, 23 (5): 456-460. DOI: 10.3928/1081-597X-20070501-06.
- [6] 王雁, 郝维婷. 有效控制角膜屈光手术后光学并发症以不断提高术后视觉质量 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2017, 35 (6): 481-485. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.06.001.
Wang Y, Hao WT. Controlling optical complications after corneal refractive surgery and improving visual quality [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2017, 35 (6): 481-485. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.06.001.
- [7] 方利华, 王肇圻, 王伟, 等. 泽尼克各项像差对人眼光学质量的影响 [J]. *光学学报*, 2006, 26 (11): 1721-1726. DOI: 10.3321/j.issn.0253-2239.2006.11.024.
Fang LH, Wang ZQ, Wang W, et al. The influence of wavefront aberration of single zernike modes on optical quality of human eyes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26 (11): 1721-1726. DOI: 10.3321/j.issn.0253-2239.2006.11.024.
- [8] Charman WN. Wavefront technology: past, present and future [J]. *Cont Lens Anterior Eye*, 2005, 28 (2): 75-92. DOI: 10.1016/j.clae.2005.02.003.
- [9] 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.
- [10] Vestergaard AH, Grønbech KT, Grauslund J, et al. Subbasal nerve morphology, corneal sensation, and tear film evaluation after refractive femtosecond laser lenticule extraction [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2013, 251 (11): 2591-2600. DOI: 10.1007/s00417-013-2400-x.
- [11] Wang D, Liu M, Chen Y, et al. Differences in the corneal biomechanical changes after SMILE and LASIK [J]. *J Refract Surg*, 2014, 30 (10): 702-707. DOI: 10.3928/1081597X-20140903-09.
- [12] Xu Y, Yang Y. Dry eye after small incision lenticule extraction and LASIK for myopia [J]. *J Refract Surg*, 2014, 30 (3): 186-190. DOI: 10.3928/1081597X-20140219-02.
- [13] Li M, Zhou Z, Shen Y, et al. Comparison of corneal sensation between small incision lenticule extraction (SMILE) and femtosecond laser-assisted LASIK for myopia [J]. *J Refract Surg*, 2014, 30 (2): 94-100. DOI: 10.3928/1081597X-20140120-04.
- [14] Hashemi H, Khabazkhoob M, Yazdani K, et al. Distribution of angle kappa measurements with Orbscan II in a population-based survey [J]. *J Refract Surg*, 2010, 26 (12): 966-971. DOI: 10.3928/1081597X-20100114-06.
- [15] 李晓晶, 王雁, 张琳. 2 mm 微切口 SMILE 术后近视矫治眼高阶像差的变化 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2015, 33 (2): 142-148. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.02.010.
Li XJ, Wang Y, Zhang L. Change of higher order aberration after 2 mm micro-incision SMILE in myopia [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2015, 33 (2): 142-148. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.02.010.
- [16] Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, et al. Increased higher-order optical aberrations after laser refractive surgery: a problem of subclinical decentration [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2001, 27 (3): 362-369. DOI: 10.1016/s0886-3350(00)00806-3.
- [17] Fang L, Wang Y, He X. Theoretical analysis of wavefront aberration caused by treatment decentration and transition zone after custom myopic laser refractive surgery [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2013, 39 (9): 1336-1347. DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.03.020.
- [18] Chan CC, Boxer Wachler BS. Centration analysis of ablation over the coaxial corneal light reflex for hyperopic LASIK [J]. *J Refract Surg*, 2006, 22 (5): 467-471. DOI: 10.3928/1081-597X-20060501-08.
- [19] 方利华, 何兴道, 王雁, 等. 切削偏心对常规屈光手术后波前像差的影响 [J]. *光学学报*, 2010, 30 (6): 1755-1760. DOI: 10.7666/d.y2002426.
Fang LH, He XD, Wang Y, et al. Influence of treatment decentration on wave-front aberration in conventional laser refractive surgery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30 (6): 1755-1760. DOI: 10.7666/d.y2002426.
- [20] Pande M, Hillman JS. Optical zone centration in keratorefractive surgery. Entrance pupil center, visual axis, coaxially sighted corneal reflex, or geometric corneal center? [J]. *Ophthalmology*, 1993, 100 (8): 1230-1237.
- [21] Lazaridis A, Droutsas K, Sekundo W. Topographic analysis of the centration of the treatment zone after SMILE for myopia and comparison to FS-LASIK: subjective versus objective alignment [J]. *J Refract Surg*, 2014, 30 (10): 680-686. DOI: 10.3928/1081597X-20140903-04.
- [22] Walsh G. The effect of mydriasis on the pupillary centration of the human eye [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 1988, 8 (2): 178-182. DOI: 10.1111/j.1475-1313.1988.tb01034.x.
- [23] Arbelaez MC, Vidal C, Arba-Mosquera S. Clinical outcomes of corneal vertex versus central pupil references with aberration-free ablation strategies and LASIK [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2008, 49 (12): 5287-5294. DOI: 10.1167/iovs.08-2176.
- [24] Okamoto S, Kimura K, Funakura M, et al. Comparison of myopic LASIK centered on the coaxially sighted corneal light reflex or line of sight [J]. *J Refract Surg*, 2009, 25 (10 Suppl): S944-950. DOI: 10.3928/1081597X-20090915-09.
- [25] Liu M, Sun Y, Wang D, et al. Decentration of optical zone center and its impact on visual outcomes following SMILE [J]. *Cornea*, 2015, 34 (4): 392-397. DOI: 10.1097/ICO.0000000000000383.
- [26] Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, et al. Comparison of corneal wavefront aberrations after photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis [J]. *Am J Ophthalmol*, 1999, 127 (1): 1-7. DOI: 10.1016/s0002-9394(98)00288-8.
- [27] Roberts CW, Koester CJ. Optical zone diameters for photorefractive corneal surgery [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1993, 34 (7): 2275-2281.

(收稿日期:2021-10-10 修回日期:2022-04-25)

(本文编辑:刘艳 施晓萌)