

·论著·

·全飞秒近视激光手术·

SMILE 术后角膜前表面非球面性与角膜高阶像差的关系

苏小连 王雁

【摘要】 目的 探讨 SMILE 术后角膜前表面非球面性与角膜高阶像差变化特点及其相关性。**方法** 前瞻性研究。随机选取自愿行 SMILE 手术的屈光不正患者 41 例,均选右眼为研究眼,于手术前及手术后 3 个月分别测量患者角膜前表面 6、7、8、9 mm 直径范围的非球面系数 Q 值,并测量角膜总高阶像差(HOA)、球差(Z_4^0)、次级球差(Z_6^0)、垂直彗差(Z_3^{-1})、水平彗差(Z_3^1)、水平三叶草(Z_3^{-3})、倾斜三叶草(Z_3^3)等高阶像差。采用配对 *t* 检验和 Pearson 相关进行分析。**结果** SMILE 手术后角膜前表面 6、7、8、9 mm 直径范围 Q 值均由负值转变为正值($t=-23.558, -26.661, -28.366, -28.788, P<0.01$)。角膜 HOA、 Z_4^0 、 Z_6^0 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 数值均增大($t=-11.815, -11.813, -16.209, 6.470, 4.835, P<0.01$),而 Z_3^{-3} 、 Z_3^3 与术前比较差异无统计学意义($t=0.278, -1.064, P>0.05$)。术前角膜 HOA、 Z_4^0 、 Z_3^{-1} 与 Q 值有一定的相关性($P<0.05$),SMILE 手术前后角膜 HOA、 Z_4^0 差值与角膜前表面各直径范围 Q 值差值均呈正相关关系(HOA: $r=0.554, 0.480, 0.416, 0.352, P<0.05$; Z_4^0 : $r=0.671, 0.577, 0.495, 0.395, P<0.05$); Z_3^{-1} 差值与 6、7 mm 直径范围 Q 值差值呈正相关($r=0.377, 0.342, P<0.05$); Z_3^1 差值与 6、7、8 mm 直径范围 Q 值差值呈正相关($r=0.436, 0.385, 0.316, P<0.05$); Z_6^0 、 Z_3^{-3} 、 Z_3^3 差值与各直径范围 Q 值差值均无相关性。透镜直径与 SMILE 手术前后 Q 值差值无相关性;与角膜 HOA、 Z_4^0 差值呈负相关($r=-0.315, -0.393, P<0.05$);与角膜 Z_6^0 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_3^{-3} 、 Z_3^3 差值均无相关性($P>0.05$)。**结论** SMILE 手术后角膜前表面 Q 值由负值转变为正值;角膜高阶像差增大;透镜直径越大,角膜 HOA、 Z_4^0 变化越小。角膜前表面 Q 值与角膜 HOA、 Z_4^0 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 变化量均有正相关关系,其中与 Z_4^0 相关程度最强。

【关键词】 飞秒激光; 飞秒激光小切口基质透镜取出术; 视觉质量; Q 值; 高阶像差

The correlation between corneal asphericity and higher order aberrations after SMILE surgery

Su Xiaolian, Wang Yan. Clinical College of Ophthalmology Tianjin Medical University, Tianjin Eye Hospital, Tianjin Key Lab of Ophthalmology and Visual Science, Tianjin Eye Institute, Tianjin 300070, China

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

【Abstract】 Objective To evaluate the characteristics of anterior corneal asphericity and higher order aberrations after SMILE surgery, and to analyze the correlation between them. **Methods** In this prospective study, 41 subjects who underwent SMILE surgery were enrolled with right eyes selected for the study. The asphericity coefficient Q-value at diameters of 6, 7, 8 and 9 mm and total higher order aberrations (HOA), spherical aberrations (Z_4^0), secondary spherical aberrations (Z_6^0), vertical coma (Z_3^{-1}), horizontal coma (Z_3^1), y-trefoil (Z_3^{-3}) and x-trefoil (Z_3^3) of the cornea were measured before surgery and 3 months following the surgery. A paired-samples *t* test and Pearson correlation were used for analysis. **Results** All Q-values increased from negative to positive after SMILE surgery and the differences were statistically significant ($t=-23.558, -26.661, -28.366, -28.788, P<0.01$). Corneal HOA, Z_4^0 , Z_6^0 , Z_3^{-1} and Z_3^1 increased and the differences were statistically significant as well ($t=-11.815, -11.813, -16.209, 6.470, 4.835, P<0.01$). However, the change in Z_3^{-3} or Z_3^3 was not significant ($t=0.278, -1.064, P>0.05$). Among corneal higher order aberrations, a linear

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.07.008

基金项目:国家自然科学基金(81170873);天津市卫生局攻关项目(10KG109)

作者单位:300070 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 天津市眼科研究所

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

correlation was found between the Q-value and corneal HOA, Z_4^0 and Z_3^{-1} before surgery ($P < 0.05$). The change in corneal HOA and Z_4^0 had a positive linear correlation with the Q-value at each diameter (HOA: $r = 0.554, 0.480, 0.416, 0.352, P < 0.05$; Z_4^0 : $r = 0.671, 0.577, 0.495, 0.395, P < 0.05$). The difference in Z_3^{-1} had a positive linear correlation with the Q-values at diameters 6 and 7 mm ($r = 0.377, 0.342, P < 0.05$). The difference in Z_3^1 had a positive linear correlation with the Q-values at diameters 6, 7 and 8 mm ($r = 0.436, 0.385, 0.316, P < 0.05$). No linear correlation was found between the changes in the Q-values at each diameter and those of Z_3^{-3}, Z_3^3 or Z_6^0 ($P > 0.05$). There was not a linear correlation between the change in the Q-values and lens diameter ($P > 0.05$). Lens diameter had a negative linear correlation with the changes in HOA and Z_4^0 ($r = -0.315, -0.393, P < 0.05$). No linear correlation was found between the changes in $Z_6^0, Z_3^{-1}, Z_3^1, Z_3^{-3}, Z_3^3$ ($P > 0.05$).

Conclusion The anterior corneal asphericity changed from negative to positive and corneal higher order aberrations increased after surgery. The smaller the lens diameter, the larger the changes in HOA and Z_4^0 . There were positive linear correlations between the changes in anterior corneal asphericity and those of corneal HOA, Z_4^0, Z_3^{-1} and Z_3^1 with the change in spherical aberrations having the closest correlation with the Q-value.

【Key words】 Femtosecond laser; Small incision lenticule extraction; Visual quality; Q-value; Higher order aberration

SMILE 手术是近年来出现的角膜屈光手术新技术^[1], 不仅切口小、无角膜瓣, 而且在矫正近视及散光方面具有较好的安全性、有效性、可预测性和稳定性^[2]。随着角膜屈光手术的发展, 术后视觉质量越来越受到重视, 传统的准分子激光角膜屈光手术会引起角膜非球面性、高阶像差(以球差、彗差为主)的增加^[3-4], 出现眩光、光晕、夜视力下降等视觉质量问题^[5-6]。在角膜屈光手术甚至更广泛的屈光领域, 角膜非球面性及波前像差的分析都变得越来越重要, 本研究对 SMILE 手术后角膜前表面非球面性、角膜高阶像差的变化特点及相关性做一探讨。

1 对象与方法

1.1 对象

入选标准: 年龄在 18~40 周岁; 近 2 年屈光度数波动在 ± 0.5 D 以内; 停戴软性角膜接触镜 2 周以上、硬性角膜接触镜 4 周以上; 无活动性眼病或全身疾病; 均签署手术知情同意书。所有患者术后最佳矫正视力均在 1.0 及以上, 无相关并发症发生。

在医学伦理委员会同意下, 随机选取在天津市眼科医院屈光手术中心自愿选择行 SMILE 手术的屈光不正患者 41 例, 其中男 19 例, 女 22 例, 年龄 18~39 岁, 平均 (22.6 ± 4.6) 岁, 术前球镜度 $-7.25 \sim -3.50$ D, 平均 (-5.24 ± 0.94) D, 柱镜度 $-3.75 \sim 0.00$ D, 平均 (-0.76 ± 0.76) D, 等效球镜度 $-7.50 \sim -4.00$ D, 平均 (-5.62 ± 0.94) D。术后球镜度 $-0.50 \sim +1.00$ D, 平均 $(+0.04 \pm 0.30)$ D, 柱镜度 $-1.00 \sim 0.00$ D, 平均 (-0.26 ± 0.27) D。为排除眼别的干扰均选右眼进行研究。

应用 Pentacam HR 于手术前及手术后 3 个月分别测量患者角膜前表面 6、7、8、9 mm 直径范围 Q 值及角膜总高阶像差(HOA)、球差(Z_4^0)、次级球差(Z_6^0)、垂直彗差(Z_3^{-1})、水平彗差(Z_3^1)、水平三叶草(Z_3^{-3})、倾斜三叶草(Z_3^3)。

1.2 测量仪器及方法

采用 Pentacam HR 三维眼前节分析系统(德国 Oculus 公司, 型号 70900, 软件版本 1.17r27)于手术前及手术后 3 个月进行参数测量。Pentacam HR 采用波长 475 nm 的蓝色 LED 二极管光源, 应用 Scheimpflug 摄像原理获取眼前节多重图像, 产生眼前节三维立体图, 系统基于测量的角膜前后表面高度数据对角膜非球面性进行分析, 可获取角膜前表面 6、7、8、9 mm 等直径范围的角膜前表面 Q 值, 取鼻侧、颞侧、上方、下方 Q 值的平均值作为参数。Pentacam HR 根据测量的角膜前后表面高度数据进行 Zernike 分析, 得出 6 mm 直径角膜总高阶像差(HOA)、球差(Z_4^0)、次级球差(Z_6^0)、垂直彗差(Z_3^{-1})、水平彗差(Z_3^1)、水平三叶草(Z_3^{-3})、倾斜三叶草(Z_3^3)等高阶像差。

所有患者均在暗室自然瞳孔状态下进行测量, 体位端正并固定头部, 嘱其眨眼后睁大并立即对焦获取数据。为避免泪膜质量差、眼睑遮挡等造成的干扰, 只接受检查质量(quality specification, QS)显示“OK”, 并且角膜暴露直径大于 9 mm 的检测结果。

1.3 手术方法

所有 SMILE 手术均由同一经验丰富的医师完成。手术前常规应用 0.3% 氧氟沙星滴眼液点眼,

4 次/d, 连续点 3 d; 双氯芬酸钠滴眼液点眼, 4 次/d, 点 1 d。采用 VisuMax 飞秒激光器(德国蔡司公司)进行操作, 设置能量为 110~125 nJ, 角膜帽直径为 7.0~7.5 mm, 厚度 110 μm, 透镜直径为 6.0~6.5 mm, 中央切削深度为 64~124 μm, 手术切口位于 12 点位, 长度 2~5mm。患者躺在手术床上注视固视点, 用负压吸引环固定眼球, 根据预设参数分别扫描透镜的后表面、侧切、透镜的前表面、边切, 然后分离角膜微透镜并将其取出, 抚平角膜切口, 手术完成。SMILE 手术后均用 0.3% 氧氟沙星滴眼液点眼, 4 次/d, 点 2 d; 0.1% 氟米龙滴眼液点眼, 4 次/d, 每 2 周递减, 共点 8 周。

1.4 统计学方法

前瞻性研究。应用 SPSS 17.0 统计软件进行数据分析。采用配对 *t* 检验对手术前后角膜前表面 Q 值、角膜高阶像差进行分析; 采用 Pearson 相关分析角膜前表面 Q 值与角膜高阶像差间的相关性。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 角膜前表面非球面性

SMILE 手术后角膜前表面 6、7、8、9 mm 直径范围 Q 值均由负值转变为正值, 差值分别为 1.02±0.27、1.02±0.24、0.94±0.20、0.81±0.17, 与术前比较差异均有统计学意义。见表 1。

2.2 角膜高阶像差

SMILE 手术后角膜 HOA、 Z_4^0 、 Z_6^0 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 数值均增大, 与术前比较差异均有统计学意义。而 Z_3^{-3} 、 Z_3^3

表 1 SMILE 手术前后角膜前表面 Q 值比较($\bar{x}\pm s$, 41 眼)

时间	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm
术前	-0.24±0.09	-0.28±0.08	-0.32±0.08	-0.36±0.08
术后 3 个月	0.79±0.28	0.75±0.25	0.64±0.22	0.47±0.20
<i>t</i> 值	-23.558	-26.661	-28.366	-28.788
<i>P</i> 值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

与术前比较差异无统计学意义。手术前后角膜 HOA、 Z_4^0 、 Z_6^0 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_3^{-3} 、 Z_3^3 差值分别为 0.46±0.25、0.25±0.13、0.09±0.04、-0.32±0.32、-0.19±0.26、-0.01±0.12、0.02±0.09。见表 2。

2.3 角膜前表面非球面性与角膜高阶像差的相关性

术前角膜 HOA、 Z_3^{-1} 与 6 mm 直径范围 Q 值呈正相关关系; Z_4^0 与 6、7、8 mm 直径范围 Q 值呈正相关关系。见表 3。

手术前后角膜 HOA、 Z_4^0 差值与角膜前表面各直径范围下 Q 值差值均呈正相关; Z_3^{-1} 差值与 6、7 mm 直径范围下 Q 值差值呈正相关; Z_3^1 差值与 6、7、8 mm 直径范围下 Q 值差值呈正相关; Z_6^0 、 Z_3^{-3} 、 Z_3^3 差值与各直径范围下 Q 值差值均无相关性。见表 4。

2.4 透镜直径与 Q 值及角膜高阶像差的相关性

SMILE 手术过程中所取透镜直径并不完全相同, 其中 6 mm 者 14 眼; 6.2 mm 者 18 人; 6.3 mm 者 6 眼; 6.5 mm 者 3 眼, 共 41 眼。分析其与手术前后 Q 值和角膜高阶像差变化量的关系, 透镜直径与 SMILE 手术前后各直径范围 Q 值差值无相关性; 与角膜 HOA、 Z_4^0 差值均具有相关性; 与 Z_6^0 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_3^{-3} 、 Z_3^3 差值均无相关性。

表 2 SMILE 手术前后角膜高阶像差比较(μm , $\bar{x}\pm s$, 41 眼)

时间	HOA	Z_4^0	Z_6^0	Z_3^{-1}	Z_3^1	Z_3^{-3}	Z_3^3
术前	0.39±0.12	0.21±0.09	0.01±0.02	-0.07±0.20	-0.08±0.10	0.02±0.09	0.03±0.06
术后 3 个月	0.84±0.25	0.46±0.13	0.10±0.03	-0.39±0.39	-0.27±0.26	0.01±0.09	0.04±0.07
<i>t</i> 值	-11.815	-11.813	-16.209	6.470	4.835	0.278	-1.064
<i>P</i> 值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	>0.05	>0.05

表 3 术前角膜前表面 Q 值与角膜高阶像差的相关系数(41 眼)

高阶像差	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm
HOA	0.377 ^a	0.277	0.107	-0.053
Z_4^0	0.817 ^b	0.695 ^b	0.486 ^b	0.272
Z_6^0	0.104	0.141	0.113	0.072
Z_3^{-1}	-0.368 ^a	-0.287	-0.221	-0.143
Z_3^1	-0.072	-0.024	0.014	0.040
Z_3^{-3}	0.005	0.028	0.068	0.083
Z_3^3	0.114	0.101	0.032	-0.015

注: ^a *P*<0.05, ^b *P*<0.01

表 4 SMILE 手术前后角膜前表面 Q 值差值与角膜高阶像差差值的相关系数(41 眼)

高阶像差	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm
HOA	0.554 ^b	0.480 ^b	0.416 ^b	0.352 ^a
Z_4^0	0.671 ^b	0.577 ^b	0.495 ^b	0.395 ^a
Z_6^0	0.176	0.207	0.191	0.139
Z_3^{-1}	0.377 ^a	0.342 ^a	0.304	0.217
Z_3^1	0.436 ^b	0.385 ^a	0.316 ^a	0.257
Z_3^{-3}	0.191	0.197	0.223	0.263
Z_3^3	0.173	0.178	0.188	0.141

注: ^a *P*<0.05, ^b *P*<0.01

表 5 透镜直径与手术前后 Q 值差值、角膜高阶像差差值的相关性(41 眼)

名称	r 值	P 值
6 mm Q 值	-0.066	>0.05
7 mm Q 值	0.035	>0.05
8 mm Q 值	0.117	>0.05
9 mm Q 值	0.203	>0.05
HOA	-0.315	<0.05
Z ₄ ⁰	-0.393	<0.05
Z ₆ ⁰	0.106	>0.05
Z ₃ ⁻¹	-0.018	>0.05
Z ₃ ¹	0.141	>0.05
Z ₃ ⁻³	-0.160	>0.05
Z ₃ ³	-0.111	>0.05

3 讨论

角膜并非完美的球面,多为由中央到周边逐渐变扁平的椭球形,此种非球面特性可使人眼获得更好的视觉质量^[7]。波前像差则是指从波动光学角度出发,描述在人眼成像平面上每一点波前与理想波前的光程差,其中最有价值的是总高阶像差、球差、彗差、三叶草,是角膜屈光手术后部分患者出现眩光、光晕、夜视力下降等的重要原因^[8-9]。角膜的非球面形态与角膜高阶像差的相关性如何,目前研究结果尚少。

本研究中,SMILE 手术后角膜前表面各直径范围 Q 值均由负值增加为正值,术后角膜前表面趋于扁椭圆形。有研究表明,传统的 LASIK 手术后角膜前表面 Q 值也往正值方向变化^[10],与 SMILE 手术相同。Kamiya 等^[11]研究显示飞秒激光基质透镜取出术(femtosecond lenticule extraction, FLEx)和波前像差引导的 LASIK 术后角膜 Q 值均增大, FLEx 手术变化量较小。手术后角膜均变扁平,与本研究结果相同。SMILE 手术分离并取出一中间厚周边薄的微透镜,中央基质较周边基质切削多,导致角膜趋于扁平。另外,角膜愈合反应和生物力学重塑等也对角膜的非球面性产生影响,导致角膜趋于扁平。

本研究表明,SMILE 手术后角膜 HOA、Z₄⁰、Z₆⁰、Z₃⁻¹、Z₃¹ 数值均较术前增大,Z₃⁻³ 和 Z₃³ 手术前后无差异。有研究认为在飞秒激光制瓣和微型角膜板层刀制瓣的 LASIK 手术后,全眼 HOA、Z₄⁰、Z₆⁰、Z₃⁻¹、Z₃¹ 也较术前增大^[12]。在本研究中,透镜直径与角膜 HOA、Z₄⁰ 变化量有负相关关系,也就是说 SMILE 手术过程中透镜直径越大,角膜 HOA、Z₄⁰ 变化越小。透镜的直径决定光学区的大小,透镜直径越大,光学区越大,角膜总高阶像差、Z₄⁰ 变化自然越小。影响角膜高

阶像差产生的原因还有很多,例如手术过程中固视的偏移、眼球的细微运动、术前较大 Kappa 角的存在、光学区和瞳孔直径的大小等,术后角膜伤口愈合反应和生物力学作用也是影响高阶像差产生的重要因素^[13]。提示在手术设计时,在保留足够角膜基底的前提下,加大光学区的直径,尽可能准确地对中心,避免较大的瞳孔等均可能在不同程度上对减少高阶像差的增加起到一定作用。

在本研究中,SMILE 手术前近视眼角膜 HOA、Z₄⁰、Z₃⁻¹ 与 Q 值有一定的相关关系,以往 Z₄⁰ 与 Q 值的研究结果与本研究相同,即角膜越扁平 Z₄⁰ 越小,角膜越陡峭 Z₄⁰ 越大^[14-16]。SMILE 手术后其相关性较术前更明显,角膜 HOA 差值、Z₄⁰ 差值、Z₃⁻¹ 差值、Z₃¹ 差值与角膜前表面 Q 值差值均呈正相关关系,其中 Z₄⁰ 相关程度最强。对术前相关性的分析仅能说明角膜 Q 值与高阶像差之间存在相关性,而对 SMILE 手术前后变化量的分析则说明,在手术过程中角膜前表面非球面性的改变与角膜 HOA、Z₄⁰、Z₃⁻¹、Z₃¹ 的改变有一定的相关性。许多因素可同时对二者产生作用。

在准分子激光角膜屈光手术中,不论是非球面优化还是波前像差引导的切削模式均比传统的切削模式能够获得更好的视觉质量^[17]。有研究认为术前高阶像差小于 3 μm 的眼在波前像差引导的屈光手术后像差显著增加,而在非球面引导手术未发现这种趋势^[18]。另外,周边能量损失和余弦效应对角膜非球面性改变和高阶像差的增加也有重要影响。手术切削时激光束垂直照射于角膜表面,在非中央区会形成椭圆形;而且激光束在切削周边时会以一定的角度反射,激光能量部分丢失导致近周边处欠矫,角膜变为扁椭圆形的趋势更明显,进而引起术后球差的增加^[15]。且屈光手术中周边激光束非垂直入射引起消融深度不同会导致球面像差的增加^[19]。

然而,全飞秒激光角膜屈光手术是透镜的取出,没有准分子激光的消融,即不存在周边能量损失和余弦效应的影响。而且,即使与波前像差引导的 LASIK 手术相比, FLEx 手术第四阶像差及 Q 值增加较小^[11],此结果对同是透镜取出的 SMILE 手术有一定的参考意义。

此外,伤口愈合及生物力学反应等角膜结构的重塑过程可同时对非球面性和高阶像差产生重要影响^[20]。屈光手术可引起角膜上皮细胞和基质纤维的愈合反应。上皮细胞愈合反应中的上皮修饰移行可对彗差、三叶草等高阶像差的改变产生重要影响。基质的纤维化瘢痕形成和瘢痕原始基质形成可引起角

膜周边形状的改变,进而导致非球面性和高阶像差的变化。有研究初步表明 SMILE 手术后角膜的愈合反应较传统的手术略小^[21]。另外,角膜变薄抵抗眼内压的作用减小、生物力学特性发生改变、角膜结构的不稳定性及可能存在的角膜膨胀等都是影响角膜非球面性及高阶像差的因素。手术及角膜结构重塑可使角膜中央变平,Kwon 和 Bott^[22]通过建模研究认为术后角膜变扁平大量的诱导了球面像差的产生。最新研究显示,SMILE 手术后角膜生物力学的稳定性和强度优于飞秒激光制瓣的 LASIK 手术^[23-24]。因此理论上 SMILE 手术后角膜非球面性和高阶像差变化相对较小,当然还需要进一步研究和探讨。

本研究结果显示,即使是 SMILE 手术也会使角膜 Q 值及高阶像差增加,应尽可能地避免或减轻这种改变。改善屈光手术后视觉质量的途径有很多,本研究结果提示,尽量减轻角膜形态的改变有助于减少高阶像差的增加。例如,根据患者的不同情况选择合适的优化模式有助于获得更好的视觉质量,改进光学区设计、增加透镜直径、设置过渡区等优化手术技术的尝试也是非常有价值的。而对于 SMILE 手术来说是否有进一步优化切削的可能,仍需进一步的研究。

总之,SMILE 手术后角膜前表面 Q 值由负值转变为正值;角膜高阶像差增大;透镜直径越大,角膜 HOA、 Z_4^0 变化越小。角膜前表面 Q 值与角膜 HOA、 Z_4^0 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 变化量均有正相关关系,其中 Z_4^0 相关程度最强。提示角膜屈光手术通过各种手术设计尽量使角膜形态趋于正常,可以减少术后球差的增加。矫正屈光不正的同时如何获得理想的角膜非球面性等角膜形态的相对正常并减少角膜高阶像差的产生,进而获得更完美的视觉质量是角膜屈光手术不断追求的目标。

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: 127-137.
- [2] 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: 292-298.
- [3] Bottos KM, Leite MT, Aventura-Isidro M, et al. Corneal asphericity and spherical aberration after refractive surgery[J]. J Cataract Refract Surg, 2011, 37: 1109-1115.
- [4] 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: 3349-3356.
- [5] Hersh PS, Steinert RF, Brint SF. Photorefractive keratectomy versus laser in situ keratomileusis: comparison of optical side effects. Summit PRK-LASIK Study Group[J]. Ophthalmology, 2000, 107: 925-933.

- [6] Fan-Paul NI, Li J, Miller JS, et al. Night vision disturbances after corneal refractive surgery[J]. Surv Ophthalmol, 2002, 47: 533-546.
- [7] Mandell RB, St Helen R. Mathematical-model of corneal contour [J]. Br J Physiol Opt, 1971, 26: 183-197.
- [8] Bühren J, Nagy L, Yoon G, et al. The effect of the asphericity of myopic laser ablation profiles on the induction of wavefront aberrations[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2010, 51: 2805-2812.
- [9] Wang Y, Zhao KX, He JC, et al. Ocular higher-order aberrations features analysis after corneal refractive surgery[J]. Chin Med J, 2007, 120: 269-273.
- [10] 侯杰, 王雁, 左彤. LASIK 手术对角膜前后表面非球面性的早期影响[J]. 眼科研究, 2010, 28: 261-266.
- [11] 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: 968-975.
- [12] 鲍锡柳, 王雁, 杨晓艳. 飞秒激光与机械刀制瓣 LASIK 术后高阶像差特征性变化对比研究[J]. 中国实用眼科杂志, 2012, 30: 543-548.
- [13] 王雁, 赵堪兴. 角膜屈光手术后的高阶像差与视觉质量[J]. 中华眼科杂志, 2011, 47: 1-5.
- [14] Calossi A. Corneal asphericity and spherical aberration[J]. J Cataract Refract Surg, 2007, 23: 505-514.
- [15] 侯杰, 王雁, 耿维莉, 等. 近视眼角膜前、后表面不同范围非球面性及其与角膜球差的关系[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2012, 14: 352-356.
- [16] Arba MS, de Ortueta D. Correlation among ocular spherical aberration, corneal spherical aberration, and corneal asphericity before and after LASIK for myopic astigmatism with the SCHWIND AMARIS platform[J]. J Cataract Refract Surg, 2011, 27: 434-443.
- [17] Bühren J, Nagy L, Yoon G, et al. The effect of the asphericity of myopic laser ablation profiles on the induction of wavefront aberrations[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2010, 51: 2805-2812.
- [18] Hantera M. Comparison of postoperative wavefront aberrations after NIDEK CXIII optimized aspheric transition zone treatment and OPD-guided custom aspheric treatment[J]. J Cataract Refract Surg, 2009, 25: 922.
- [19] Yoon G, MacRae S, Williams DR, et al. Causes of spherical aberration induced by laser refractive surgery[J]. J Cataract Refract Surg, 2005, 31: 127-135.
- [20] Oliveira CM, Ferreira A. Wavefront analysis and Zernike polynomial decomposition for evaluation of corneal optical quality[J]. J Cataract Refract Surg, 2012, 38: 343-356.
- [21] Riau AK, Anqunawela RI. Early corneal wound healing and inflammatory responses after refractive lenticule extraction (ReLEx)[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2011, 52: 6213-6221.
- [22] Kwon Y, Bott S. Post surgery corneal asphericity and spherical aberration due to ablation efficiency reduction and corneal remodelling in refractive surgeries[J]. Clin Ophthalmol, 2009, 23: 1845-1850.
- [23] Wu D, Wang Y, Zhang L, et al. The corneal biomechanical effects of small incision lenticule extraction (ReLEx smile) compared with femtosecond laser LASIK: a prospective study [J]. J Cataract Refract Surg, 2014, 40: 954-962.
- [24] 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: 971-980.

(收稿日期: 2014-04-04)

(本文编辑: 季魏红, 毛文明)