

角膜的非球面形态及角膜屈光手术对其的影响

苏小连 综述 王雁 审校

【摘要】 角膜的非球面形态是指正常人眼角膜多为非球面的扁椭圆形,这种形态有助于提高视觉质量。不同的人眼角膜非球面系数 Q 值并不相同,多数为负值,各文献报道的角膜 Q 值正常值差异较大,角膜 Q 值受多种因素影响,不同象限对 Q 值影响较大,年龄对其影响较小,近视度数、眼轴长度、曲率半径、球差等与 Q 值均有一定的相关性。角膜屈光手术是矫正屈光不正的重要途径之一,但其对角膜非球面性的影响可导致眩光、视觉质量下降等问题,不同手术方式对其影响不同。波前像差引导的准分子激光原位角膜磨镶术(LASIK)、Q 值引导的 LASIK 对 Q 值的影响均较标准 LASIK 小,而飞秒激光角膜基质透镜取出术(FLEX)对 Q 值的影响又较波前像差引导的 LASIK 小,近年开展较多的飞秒激光制瓣准分子激光原位角膜磨镶术(FS-LASIK)、微小切口基质透镜取出术(SMILE)对角膜非球面性的影响则鲜有报道。另外,近视角膜屈光手术后 Q 值向正值变化,而远视手术后则向负值变化,Q 值的变化量与等效球镜度呈高度正相关,激光、愈合反应等对角膜非球面性的影响尚需进一步探索。对角膜非球面性及角膜屈光手术的研究有助于获得更好的术后视觉质量,就角膜的非球面形态及不同角膜屈光手术方式对其的影响进行综述。

【关键词】 角膜; 非球面性; Q 值; 屈光手术

Corneal asphericity and the effects of the corneal refractive surgery on it Su Xiaolian, Wang Yan. Tianjin Key Laboratory of Ophthalmology and Vision Science, Tianjin Eye Institute, Tianjin Eye Hospital, Clinical College of Ophthalmology, Tianjin Medical University, Tianjin 300020, China
Corresponding author: Wang Yan, Email: wangyan7143@vip.sina.com

【Abstract】 The corneal asphericity refers to most normal corneal surface is an aspherical flat oval, which is helpful to improve the visual quality. In most cases, corneal aspherical coefficient Q-value is negative, and different normal Q-value is reported in literatures, corneal Q-value is influenced by many factors, quadrants have great effects on it, the influence of age is weak, there are correlation between myopic degree, ocular axial length, radius of curvature, intraocular pressure and Q-value. The corneal refractive surgery is one of the most important methods to correct refractive errors, but it has negative effects on the corneal asphericity, and then results in glare, visual quality degradation and other issues. Different corneal refractive surgeries would have different effects on the corneal asphericity. Wavefront aberration-guided femtosecond laser in situ keratomileusis (LASIK) surgery and Q-value guide LASIK are superior to standardized LASIK, the change of Q-value after femtosecond lenticule extraction (FLEX) surgery is less than that after wavefront aberration guided LASIK. The influence of femtosecond laser in situ keratomileusis (FS-LASIK) and small incision lenticule extraction (SMILE) on Q-value are rarely reported. In addition, the Q-value changes from negative to positive after corneal refractive surgery of myopia, the variation tendency is opposite after hyperopia surgery. Q-value variation is highly correlated to spherical equivalent, the impact of laser and healing still needs further exploration. In order to further exploring of the corneal asphericity and getting a better effect of surgery, here is a review about normal corneal asphericity and the effects of the corneal refractive surgery on it.

【Key words】 Cornea; Asphericity; Q-value; Refractive surgery

角膜屈光手术是矫正屈光不正的重要途径之一,手术方式

较多,包括最早出现的角膜放射状切开术(radial keratotomy, RK)、现在仍具有一定优势的准分子激光角膜上皮瓣下磨镶术(laser epithelial keratomileusis, LASEK)、1991年首次报道且至今仍广泛开展的准分子激光角膜原位磨镶术(femtosecond laser in situ keratomileusis, LASIK)^[1]以及使屈光手术进入无刀时代的飞秒激光制瓣准分子激光角膜原位磨镶术(femtosecond laser

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.06.015

基金项目:国家自然科学基金项目(81170873);天津市卫生局攻关项目(10KCG109)

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

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

in situ keratomileusis, FS-LASIK) 等。此外,随着对视觉质量要求的提高,个体化的角膜屈光手术也已出现,包括角膜地形图引导、Q 值引导、波前像差引导等多种切削形式。Sekundo 等^[2]在 2008 年首次报道的飞秒激光角膜基质透镜取出术 (femtosecond lenticule extraction, FLEx) 完全舍弃了准分子激光的应用,变消融基质为取出基质透镜,而后出现了无瓣的飞秒激光微小切口基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE)^[3],此 2 种术式成为研究的热点。以往有许多关于 LASEK、LASIK 及 Q 值引导 LASIK、波前像差引导 LASIK 对角膜非球面性影响的研究,对老视、远视手术也有所涉及,但关于 FS-LASIK、FLEx、SMILE 等术式对角膜非球面性影响的研究较少。

正常人眼的角膜为从中央到周边逐渐变平坦的非球面形态,这种形态有助于减轻瞳孔扩大时光线通过角膜周边产生的球差,进而提高视觉质量。角膜屈光手术改变了角膜的非球面形态,使患者术后出现眩光、光晕、视觉质量下降等现象^[4],但不同的屈光手术方式对角膜非球面性的影响是不同的。在眼科临床中,常用非球面系数 Q 来定量描述角膜非球面性的程度,可以此来定量分析屈光手术对角膜非球面性的影响。本文就角膜的非球面形态和角膜屈光手术对角膜非球面性的影响进行综述。

1 角膜的非球面形态

最初,角膜被简化成一个球面来进行研究,直到 1971 年 Mandell 等^[5]首次研究证实了角膜前表面为一非球面形态,多数角膜为越往周边越平坦的椭球形。Q 值是描述角膜非球面性最常用的参数,Q=0 时,角膜为各点屈光力相同的球面;-1<Q<0 时,角膜为从中央到周边逐渐变扁平的椭球形;Q>0 时,角膜为从中央到周边变陡峭的扁球形。

各文献报道的角膜 Q 值正常值差异较大,可能与测量仪器、描述方式、研究人群等不同有关,一般描述方式有平均 Q 值、不同子午线 Q 值、不同直径范围内 Q 值等。Zhang 等^[6]分析中国人群 1 052 人 1 052 眼右眼结果显示,平均 Q 值为 -0.30 ± 0.12 。Haouat 等^[7]报道近视患者平均角膜 Q 值为 -0.09 。在 Yebra-Pimentel 等^[8]的研究中,平均角膜 Q 值为 -0.230 ± 0.108 。在不同直径范围内角膜平均 Q 值并不相同,Hersh 等^[9]报道 4.5 mm 直径范围内为 -0.1700 ± 0.1499 。

角膜前后表面的 Q 值也不相同。杨相泽等^[10]研究青年近视散光患者 423 例 829 眼,采用 Oculyzer 眼前节诊断系统进行检测,获得角膜前表面 20°、25°、30°、35°、40° Q 值分别为 -0.24 ± 0.13 、 -0.28 ± 0.12 、 -0.31 ± 0.12 、 -0.36 ± 0.13 和 -0.35 ± 0.28 。陈世豪等^[11]报道 4.5 mm 直径范围角膜前表面平均 Q 值为 -0.142 ± 0.151 。胡正再等^[12]研究 50 人 100 眼在角膜前表面 20°、25°、30°(分别约对应 4.7、6.1、7.5 mm 角膜直径)的 Q 值分别为 -0.144 (中位数)、 -0.213 ± 0.110 和 -0.277 ± 0.108 。侯杰等^[13]用 Pentacam 三维眼前节分析系统研究 6、7、8、9 mm 直径范围内角膜后表面 Q 值均值分别为 0.08 ± 0.16 、 -0.05 ± 0.13 、 -0.15 ± 0.12 和 -0.26 ± 0.11 。杨相泽等^[10]研究角膜后表

面 20°、25°、30°、35°、40° Q 值分别为 0.21 ± 0.25 、 0.05 ± 0.21 、 -0.09 ± 0.19 、 -0.21 ± 0.16 和 -0.31 ± 0.14 。

2 Q 值的影响因素

角膜从中央到周边越来越平坦,Q 值绝对值越往周边越大,且角膜前后表面 Q 值有一定的相关性,越往周边相关性越显著^[14]。角膜 Q 值受多种因素影响,不同象限对角膜非球面性的影响较大,年龄对其影响较小,近视度数、中央角膜曲率半径与非球面性有一定的相关性^[6],其他因素有像差、眼压等。

2.1 屈光度和眼轴长度

大量研究表明,角膜前表面的非球面性与屈光度有相关性,近视眼较正视眼角膜前表面 Q 值负值更大^[6,15-17]。

Carney 等^[15]的研究显示角膜非球面性和眼轴长度成正比。近视可分为轴性近视、曲率性近视和指数性近视,度数相同而类型不同的近视患者角膜形态是不同的,而 Q 值只是描述角膜非球面性的参数,理论上与曲率性近视的屈光度关系更密切,与轴性近视和指数性近视的关系较弱。当近视进展,眼轴延长占主导作用时,Q 值和近视程度的关系变得不如低中度近视时密切^[11]。

2.2 不同位置和不同象限

角膜由中央到周边逐渐变扁平,各子午线甚至不同的点 Q 值并不完全相同,角膜不同象限 Q 值差异明显,但各研究报道结论不一。Ying 等^[18]通过建立角膜前表面的 3D 模型对其非球面性进行分析,推论角膜前表面的 Q 值分布体现双峰变化,在 4 个象限都是由垂直半子午线到水平半子午线向更负的方向变化,也就是说上下象限 Q 值的绝对值小,鼻颞侧象限 Q 值的绝对值大^[19],而 Zhang 等^[6]的研究则认为鼻侧象限、上方象限分别比颞侧象限、下方象限更呈现扁椭圆形。

2.3 年龄

Dubbelman 等^[20]研究指出角膜的非球面性与年龄之间有一定的关系,随着年龄的增长,角膜前表面的 Q 值增加,而后表面的 Q 值降低。杨相泽等^[10]研究发现,随着年龄的增长,角膜的非球面性更明显。也有研究认为,虽然不同年龄间部分角膜 Q 值有差异,但 Q 值与年龄无相关性^[6]。老年人的角膜生理结构会发生一定的变化,角膜中央、周边厚度的变化以及角膜老年环的出现等也许会对角膜的非球面性有一定影响。

2.4 球差

角膜的非球面性是影响角膜球差大小的重要因素,也是影响视觉质量的关键因素之一。关于球差与 Q 值的关系,Calossi^[21]研究显示,若角膜屈光指数、瞳孔直径保持恒定,角膜越扁平球差越小,角膜越陡峭球差就越大,随着 Q 值的正向发展,角膜的球差增加。胡正再等^[12]研究表明,25°的角膜 Q 值与 6.0 mm 直径范围角膜球差呈正相关,与全眼球差也呈弱的正相关。

2.5 曲率半径

Zhang 等^[6]研究认为,角膜 Q 值与中央角膜曲率半径存在明显的负相关。

2.6 其他

Carney 等^[15]研究显示,角膜的非球面性和玻璃体腔深度

存在明显的相关性。多数学者研究认为,角膜 Q 值与角膜中央厚度无明显相关性^[10,13],也有研究报道角膜后表面各项 Q 值与眼压呈负相关^[10]。关于角膜 Q 值与眼别、种族、角膜直径等的关系鲜有报道。

3 角膜屈光手术方式对角膜非球面形态的影响

角膜屈光手术通过切削一定量的角膜组织达到矫正屈光不正的目的,这不但在一定程度上破坏了角膜的正常形态,而且是改变角膜非球面性的主要因素,进而影响视觉质量。侯杰等^[13]研究证明,角膜屈光手术后角膜 Q 值明显向正值方向改变。郑磊等^[22]研究证明,LASIK 术后 Q 值变化量与对比敏感度等级变化呈正相关,角膜前表面的 Q 值改变是影响 LASIK 术后视觉质量的重要因素之一。其他因素也可对角膜的非球面性产生影响。研究证明,激光产生的热负荷可导致角膜中央非球面性的显著增加,而且这种改变与温度的上升呈正相关,考虑与热负荷导致角膜的横向胶原纤维收缩和应力的再分配有关^[23]。Azar 等^[24]研究认为,不论是表层手术还是板层手术,伤口愈合反应都是限制角膜屈光手术可预测性的一个重要因素,也极有可能影响术后角膜的非球面性。切口大小、上皮增生等愈合反应相关因素均会影响术后角膜 Q 值的变化。Q 值是影响视觉质量的重要因素,负 Q 值时视觉质量要优于正 Q 值时^[25],仅基于数学理论来说,拥有负 Q 值的患者角膜屈光手术后视觉质量会更好,但是在临床实际中并非总是如此,其中一部分原因是由于角膜伤口愈合过程中的不确定因素影响角膜的非球面性^[24]。角膜屈光手术方式多种多样,其优缺点也各不相同,对角膜前表面非球面性形态的影响也不相同。

3.1 Q 值引导 LASIK 与标准 LASIK

Q 值引导 LASIK 是指通过人为设定目标 Q 值来指导屈光手术的切削过程,使屈光手术对角膜非球面性的改变减到最小,其目标 Q 值可设置为-0.5、-0.4、-0.2 不等^[26],Q 值设置为-0.4 时被认为与波前像差引导的手术效果相等^[27]。Manns 等^[28]通过理论计算认为 Q 值为-0.45 ~ -0.47 可以将眼球差矫正为零。由于角膜和晶状体存在着各种像差,实际上人眼不可能为零球差,因为角膜周边与巩膜的连接不能过于平坦,从而影响人眼的视觉质量。Gatinel 等^[29]提出,当 Q 值为-0.26 时,可以矫正一半的球差。Arbelaez 等^[30]研究结果显示,角膜顶点切削相对瞳孔中心切削而言,术后能较好地维持角膜的非球面性。

Q 值引导 LASIK 在保持术前角膜前表面形态和减小术后球差方面比常规 LASIK 有优势^[31],更有助于维持角膜生理性的非球面性^[32-33]。在准分子激光矫正近视中,与常规 LASIK 相比,Q 值引导 LASIK 矫正球差术后视觉质量更好^[34]。在低光照射和夜间环境下,Q 值引导的个体化切削术更具有优势^[35]。施节亮等^[36]分析显示,Q 值引导 LASIK 术后裸眼视力较标准 LASIK 好,术后角膜 Q 值、总高阶像差、球差较标准 LASIK 小。

3.2 波前像差引导 LASIK 与标准 LASIK

波前像差引导的屈光手术是指通过测量患者的全眼像差和角膜像差,选取和设定合适的像差参数指导角膜屈光手术的

切削过程,以使患者术后的像差最小,得到好的视觉质量^[37-38]。行波前像差引导 LASIK 的患者,在近视屈光手术后 Q 值仍有向正值变化的趋势,但较标准 LASIK 视觉质量更好^[39]。

3.3 Q 值引导的 LASIK 与波前像差引导的 LASIK

Koller 等^[40]对同一患者的非主视眼行 Q 值引导的 LASIK,而对主视眼行波前像差引导的 LASIK,对比研究发现虽然 2 种手术方式在安全性和有效性方面无差异,但对于-5.0 D 以下的近视,Q 值引导的非球面切削能较好地维持角膜的非球面特性。

3.4 Q 值引导的 LASIK 与标准 LASEK

Huang 等^[41]对比研究 Q 值引导的 LASIK 和标准 LASEK 术后 Q 值变化,结果表明术后 2 个组的 Q 值均增加,但组间比较差异无统计学意义。

3.5 FLEx 与波前像差引导的 LASIK

Kamiya 等^[42]的研究显示,FLEx 对 Q 值的影响小于波前像差引导的 LASIK。FLEx 只需用飞秒激光对角膜进行 2 个层面的扫描,然后取出透镜即可,所切削掉的角膜组织过渡更平缓,角膜所受的激光热负荷较波前像差引导的 LASIK 更少,另外,飞秒激光引起的愈合反应与准分子激光引起的愈合反应并不完全相同,对角膜的非球面性也有一定的影响。

3.6 远视角膜屈光手术

远视角膜屈光手术是对角膜旁中央区基质进行环形切削,使角膜光学区变得更陡峭,其周围的环形区域变扁平,从而达到矫正远视的目的。Bottos 等^[39]研究发现,波前像差引导的远视 LASIK 术后 Q 值有向负值变化的趋势。研究表明,屈光性角膜切削术 PRK 和 LASIK 治疗远视后角膜的非球面性也是向负值变化的^[43-44]。

3.7 其他

角膜 Q 值在近视手术后有向正值变化的趋势,在远视手术后有向负值变化的趋势,且这种变化量的大小与术前的等效球镜度呈高度正相关^[31,39],矫正的屈光度大,Q 值变化大;矫正的屈光度小,Q 值变化小。

有研究表明,手术前后 Q 值的变化量与中央角膜厚度、中央切削深度、中央切削深度/中央角膜厚度无关^[13];术后角膜前表面 Q 值变化量与切削深度、剩余基质床厚度呈正相关,而后表面 Q 值变化量则与这 2 个参数无明显相关性^[14]。王小娟等^[45]研究发现,Q 值变化量与角膜曲率改变之间存在相关性,但术后 Q 值与偏心量之间无相关性。

4 小结

正常人眼的角膜形态多为从中央到周边逐渐变扁平的长椭圆形,非球面系数 Q 值多为负值。角膜屈光手术会导致角膜非球面性发生改变,不同手术方式对其影响不同,早期 Q 值均向正值方向变化,随着时间的延长会有所恢复^[13]。FS-LASIK、FLEx、SMILE 等对角膜非球面性的影响报道较少,有待进一步研究;角膜屈光手术导致 Q 值变化的原因尚无定论,激光本身及术后愈合反应等对角膜非球面性的影响也需进一步探索。

参考文献

- [1] Pallikaris IG, Papatzanaki ME, Siganos DS, et al. A corneal flap technique for laser in situ keratomileusis [J]. *Arch Ophthalmol*, 1991, 109(12): 1699-1702. doi:10.1001/archoph.1991.01080120083031.
- [2] Sekundo W, Kunert K, Russmann C, et al. First efficacy and safety study of femtosecond lenticule extraction for the correction of myopia: six-month results [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2008, 34(9): 1513-1520. doi:10.1016/j.jcrs.2008.05.033.
- [3] 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, 7(1): 127-137. doi:10.1016/j.jcrs.2010.07.033.
- [4] Sharma M, Wachler BS, Chan CC. Higher order aberrations and relative risk of symptoms after LASIK [J]. *J Refract Surg*, 2007, 23(3): 252-256.
- [5] Mandell RB, St Helen R. Mathematical model of corneal contour [J]. *Physiol Opt*, 1971, 26: 183-197.
- [6] Zhang Z, Wang J, Niu W, et al. Corneal asphericity and its related factors in 1052 Chinese subjects [J]. *Optom Vis Sci*, 2011, 88(10): 1232-1239. doi:10.1097/OPX.0b013e31822717ca.
- [7] Haouat M, Gatinel D, Duong MH, et al. Corneal asphericity in myopes [J]. *J Fr Ophthalmol*, 2002, 25(5): 488-492. doi: JFO-05-2002-25-5-0181-5512-101019-ART4.
- [8] Yebra-Pimentel E, González-Jéjome JM, Cerviño A, et al. Corneal asphericity in a young adult population [J]. *Arch Soc Esp Ophthalmol*, 2004, 79(8): 385-392.
- [9] Hersh PS, Fry K, Blaker JW. Spherical aberration after laser in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy. Clinical results and theoretical models of etiology [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003, 29(11): 2096-2104.
- [10] 杨相泽, 郑燕. 近视散光患者角膜前、后表面 Q 值的测量分析 [J]. *眼科*, 2011, 20(5): 322-325.
- [11] 陈世豪, 李斌, 王勤美. 国人近视屈光手术人群角膜前表面非球面性参数的调查 [J]. *眼科研究*, 2007, 25(7): 574-550.
- [12] 胡正再, 欧阳红专, 王勤美, 等. 近视人群角膜前表面 Q 值及其与球差的相关性 [J]. *国际眼科杂志*, 2010, 10(9): 1680-1682. doi: 10.3969/j.issn.1672-5123.2010.09.013.
- [13] 侯杰, 王雁, 李晶, 等. 准分子激光角膜屈光手术后角膜后表面非球面性变化的研究 [J]. *中华眼科杂志*, 2011, 47(3): 223-227. doi: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2011.03.007.
- [14] 侯杰, 王雁, 左彤, 等. 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(3): 261-266. doi: 10.3969/j.issn.1003-0808.2010.03.019.
- [15] Carney LG, Mainstone JC, Henderson BA. Corneal topography and myopia. A cross-sectional study [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1997, 38(2): 311-320.
- [16] 陈佳, 华焱军, 谭维娜, 等. 不同屈光状态下成人角膜 Q 值的分区 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2013, 15(4): 218-221. doi: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2013.04.007.
- [17] 王小娟, 王勤美, 王丹梅. 近视眼角膜前表面的非球面性 [J]. *眼科研究*, 2007, 25(4): 303-305.
- [18] Ying J, Wang B, Shi M. Anterior corneal asphericity calculated by the tangential radius of curvature [J/OL]. *J Biomed Opt*, 2012, 17(7): 075005 [2014-05-16]. <http://biomedicaloptics.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1352488>. doi: 10.1117/1.JBO.17.7.075005.
- [19] Zheng S, Ying J, Wang B, et al. Three-dimensional model for human anterior corneal surface [J/OL]. *J Biomed Opt*, 2013, 18(6): 065002 [2014-06-12]. <http://biomedicaloptics.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1700091>. doi: 10.1117/1.JBO.18.6.065002.
- [20] Dubbelman M, Sicam VA, Van der Heijde GL. The shape of the anterior and posterior surface of the aging human cornea [J]. *Vision Res*, 2006, 46(6-7): 993-1001. doi: 10.1016/j.visres.2005.09.021.
- [21] Calossi A. Corneal asphericity and spherical aberration [J]. *Refract Surg*, 2007, 23(3): 505-514.
- [22] 郑磊, 张建华, 王倩. LASIK 术后夜间视觉质量与角膜非球面性关系的研究 [J]. *眼科*, 2009, 18(3): 180-183.
- [23] McCafferty SJ, Schwiagerling JT, Enikov ET. Thermal load from a CO₂ laser radiant energy source induces changes in corneal surface asphericity, roughness, and transverse contraction [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2012, 53(7): 4279-4288. doi: 10.1167/iovs.12-9579.
- [24] Azar DT, Chang JH, Han KY. Wound healing after keratorefractive surgery: review of biological and optical considerations [J]. *Cornea*, 2012, 31(1): 9-19. doi: 10.1097/ICO.0b013e31826ab0a7.
- [25] Gatinel D, Malet J, Hoang-Xuan T, et al. Corneal elevation topography: best fit sphere, elevation distance, asphericity, toricity, and clinical implications [J]. *Cornea*, 2011, 30(5): 508-515. doi: 10.1097/ICO.0b013e3181fb4fa7.
- [26] Anera RG, Castro JJ, Jiménez JR, et al. Optical quality and visual discrimination capacity after myopic LASIK with a standard and aspheric ablation profile [J]. *J Refract Surg*, 2011, 27(8): 597-601. doi: 10.3928/1081597X-20110303-01.
- [27] Koller T, Iseli HP, Hafezi F, et al. Q-factor customized ablation profile for the correction of myopic astigmatism [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2006, 32(4): 584-589.
- [28] Manns F, Ho A, Parel JM, et al. Ablation profiles for wavefront-guided correction of myopia and primary spherical aberration [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2002, 28(5): 766-774.
- [29] Gatinel D, Haouat M, Hoang-Xuan T. A review of mathematical descriptors of corneal asphericity [J]. *J Fr Ophthalmol*, 2002, 25(1): 81-90. doi: JFO-01-2002-25-1-0181-5512-101019-ART84.
- [30] 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.
- [31] 陈世豪, 李斌, 王勤美. Q 值调整的个性化准分子激光原位角膜磨镶术治疗近视临床疗效 [J]. *眼视光学杂志*, 2007, 9(3): 158-162. doi: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2007.03.005.
- [32] Buhren J, Naqy 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(5): 2805-2812. doi: 10.1167/iovs.09-4604.
- [33] 杜显丽, 刘后仓, 陈敏, 等. 不同引导方法 LASIK 术后角膜非球面性改变及临床分析 [J]. *国际眼科杂志*, 2012, 12(4): 599-603. doi: 10.3969/j.issn.1672-5123.2012.04.01.
- [34] 黄国富, 杨斌, 王铮. 非球面因子 Q 引导准分子激光原位角膜磨镶术治疗近视眼的临床研究 [J]. *中华眼科杂志*, 2008, 44(9): 820-824. doi: 10.3321/j.issn.0412-4081.2008.09.011.
- [35] 李婧, 沈政伟, 叶姬. Q 值引导和标准 LASIK 对视觉质量影响的比较研究 [J]. *眼科新进展*, 2012, 32(1): 52-55. doi: 10.13389/j.cnki.rao.2012.01.017.
- [36] 施节亮, 冯一帆, 陈世豪. Q 值引导与标准 LASIK 治疗近视临床疗效的 Meta 分析 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2011, 29(5): 437-443. doi: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2011.05.013.
- [37] Gambato C, Catania AG, Vujosevic S, et al. Wavefront-optimized surface ablation with the Allegretto Wave Eye-Q excimer laser platform: 12-month visual and refractive results [J]. *J Refract Surg*, 2011, 27(11): 792-795. doi: 10.3928/1081597X-20110407-01.
- [38] George MR, Shah RA, Hood C, et al. Transitioning to optimized correction with the WaveLight ALLEGRETTO WAVE: case distribution, visual outcomes, and wavefront aberrations [J]. *J Refract Surg*, 2010, 26(10): 806-813. doi: 10.3928/1081597X-20100921-07.
- [39] Bottos KM, Leite MT, Aventura-Isidro M, et al. Corneal asphericity and spherical aberration after refractive surgery [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2011, 37(6): 1109-1115. doi: 10.1016/j.jcrs.2010.12.058.
- [40] Koller T, Iseli HP, Hafezi F, et al. Q-factor customized ablation profile for the correction of myopic astigmatism [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2006, 32: 584-589.
- [41] Huang H, Yang J, Bao H, et al. Retrospective analysis of changes in the anterior corneal surface after Q value guided LASIK and LASEK in high myopic astigmatism for 3 years [J/OL]. *BMC Ophthalmol*, 2012, 12: 15 [2014-03-23]. <http://www.biomedcentral.com/1471-2415/12/15>. doi: 10.1186/1471-2415-12-15.
- [42] 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.
- [43] Oliver KM, O'Brart DP, Stephenson CG, et al. Anterior corneal optical aberrations induced by photorefractive keratectomy for hyperopia [J]. *J Refract Surg*, 2001, 17(4): 406-413.
- [44] Chen CC, Izadshenas A, Rana AA, et al. Corneal asphericity after hyperopic laser in situ keratomileusis [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2002, 28: 1539-1545.
- [45] 王小娟, 王勤美, 王丹梅. 近视眼准分子激光原位角膜磨镶术后角膜非球面性的改变 [J]. *中华眼视光学杂志*, 2007, 9(4): 242-244.

(收稿日期: 2014-11-12)

(本文编辑: 刘艳)