

LASIK 术后角膜生物力学的改变及其影响因素

洪冬梅, 孙 康

作者单位: (528031) 中国广东省佛山市, 广东医学院附属佛山市禅城中心医院眼科
作者简介: 洪冬梅, 女, 硕士研究生, 研究方向: 角膜屈光手术。
通讯作者: 孙康, 男, 硕士研究生导师, 研究方向: 角膜屈光手术。skeye@sina.com
收稿日期: 2012-05-28 修回日期: 2012-09-03

Changes of corneal biomechanical properties after laser *in situ* keratomileusis and its influencing factors

Dong-Mei Hong, Kang Sun

Department of Ophthalmology, Foshan Chancheng Central Hospital, Guangdong Medical College, Foshan 528031, Guangdong Province, China
Correspondence to: Kang Sun. Department of Ophthalmology, Foshan Chancheng Central Hospital, Guangdong Medical College, Foshan 528031, Guangdong Province, China. skeye@sina.com
Received: 2012-05-28 Accepted: 2012-09-03

Abstract

• With the rapid advances in laser technology and surgical techniques, complications become less frequent. Patients are satisfied with visual outcomes. But a growing number of scholars have found that corneal refractive surgery greatly alters the structure of the cornea and corneal biomechanical properties. Even serious complications such as iatrogenic keratectasia may happen. That remains one of the refractive surgeon's greatest concerns. In this review, we describe the cornea material properties, summarize changes of corneal biomechanical properties after LASIK and review factors that may be related to variations in characterization of the biomechanical response of the cornea.

• **KEYWORDS:** laser *in situ* keratomileusis; corneal biomechanics; ocular response analyzer; secondary keratectasia

Citation: Hong DM, Sun K. Changes of corneal biomechanical properties after laser *in situ* keratomileusis and its influencing factors. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2012;12(10):1894-1897

摘要

随着准分子激光屈光手术技术的成熟和手术设备的发展, 手术的并发症逐渐减少, 手术效果令大多数患者满意。但是越来越多的学者发现, 角膜屈光手术由于改变了角膜的正常结构, 对角膜的生物力学稳定性产生了较大的影响, 有些甚至发生严重的并发症。其中医源性角膜扩张越来越受到手术医师的重视。现就角膜生物力学的特性、准分子激光原位角膜磨镶术(LASIK)术后角膜生物力学

改变及影响其改变的多种因素进行分析并予综述。

关键词: 准分子激光原位角膜磨镶术; 角膜生物力学; 眼反应分析仪; 继发性圆锥角膜

DOI:10.3969/j.issn.1672-5123.2012.10.21

引用: 洪冬梅, 孙康. LASIK 术后角膜生物力学的改变及其影响因素. 国际眼科杂志 2012;12(10):1894-1897

0 引言

近20a来, 准分子激光手术的发展日新月异。准分子激光原位角膜磨镶术(laser *in situ* keratomileusis, LASIK)是在角膜瓣下做准分子激光的消融达到屈光矫正效果的屈光手术。由于其保留了角膜前弹力层, 更加符合角膜生理结构, 具有良好的预测性、有效性, 术后视力恢复快、屈光回退少, 成为目前屈光手术的主流术式。随着LASIK大规模开展, 手术的并发症也凸现出来。自Seiler等^[1]1998年首次报道并命名LASIK术后角膜扩张(post-LASIK keratectasia, PLK)以来不断有病例报道, 已引起屈光手术医生的重视, PLK的发生机制不明, 大多学者认为基本问题是角膜的生物力学改变^[1-4], 在眼内压及其它外力作用下, 结构上受损、完整性减弱的角膜发生向前膨隆、扩张, 严重时形成继发性圆锥角膜。本文现就角膜生物力学的特性、LASIK术后角膜生物力学改变及影响其改变的多种因素进行分析并予综述, 期望能为屈光手术相关并发症预防和监测提供参考。

1 角膜的生物力学

1.1 角膜结构 角膜在组织学上可分为5层, 只有前弹力层(Bowman膜)和角膜基质层含有胶原纤维成分, 这两层组织负担了角膜主要的抗张力强度, 也决定了角膜的韧性。角膜最表面的上皮细胞层对于角膜的抗张力强度贡献很小。而基质层是承受载荷的主要部分; 角膜的基质层约占角膜总厚度的90%, 包含了约200~250个胶原纤维板层, 板层相互重叠在一起。相邻的纤维板层之间有相互交联的胶原纤维束, 为角膜板层间剪切阻力, 以及板层间张力负荷的传递, 提供了重要的结构基础。而且前部的角膜基质板层排列比后部更加致密, 具有更多的倾斜分支和交联。因此前部的角膜基质层较后部基质层承担着更大的生物力学作用。这与Uzbek等^[5]研究中发现相符, 即无论是机械板层刀制作的瓣还是飞秒激光制作的瓣, LASIK术后角膜生物力学改变主要由于基质层切削造成的。此外, 周边部角膜的基质也比中央区具有更强的延展性, 即更强的韧性与张力。后弹力层(Descemet膜)具有可延展性与低硬度, 可以有效的缓冲一定范围内的眼压对于角膜形态的作用, 这种特性可以阻止基质层的压力传向内皮细胞层^[6]。

1.2 角膜的生物特性 为了正确评估屈光手术后的效果, 深入了解角膜组织本身的生物力学特性显得尤为重要。

角膜作为一种活体生物组织,对其特性的完整描述除了角膜厚度、曲率等形态学指标外,还应当包括在受到作用力时表现的生物力学特性。其具有非线性、各向异性、黏弹性(包括蠕变、应力松弛和滞后)的生物力学性能。人正常角膜是一非线性应力应变的生物组织,具有明显的各向异性和黏弹性。在应力上水平向(x轴和y轴)最强,切力向或放射向(z轴)最弱。角膜切力向或放射向应力的极限值是结合临床较好的生物力学参数。因为这种作用方向的应力过大会使板层间产生滑动,最终导致角膜生物力学衰竭,发生角膜扩张乃至圆锥角膜。角膜基质层由200~250层排列规则的胶原纤维组成,纤维走向有水平向、垂直向和环向。刘志成等^[7]的研究表明角膜是不易发生较大变形的黏弹性材料,属于生物软组织。Farrell等^[8]研究证明,角膜板层方向分布不是随机的,而是按1,2个首选的方向分布。Meek等^[9]研究认为人角膜基质主要胶原排列方向是从下到上,从鼻侧到颞侧,但在角膜缘处主要方向是角膜切线方向。水平子午线上,以中央角膜为中心,鼻侧、颞侧力的分布是对称的,而垂直子午线是非对称的。这些内部结构的各向异性,对角膜扩张性疾病及一些角膜屈光手术后角膜的形状,是一个重要决定因素。角膜这种各向异性特征对准分子激光手术后角膜的形状和承载能力产生影响。

1.3 角膜生物力学测量方法 虽然目前测量角膜生物力学性能的方法有很多,但尚无一种方法能够全面反映角膜的生物力学性能。且大多都是离体测量。目前主要的活体测量方法有两种。Philip等^[4]介绍了一种在完整眼球上测量角膜的生物力学的方法,即电子斑纹图样干涉测量法(EPSI技术)。其原理是通过氦氖激光做辐射源,当粗糙角膜被照射后,可呈现随机激光散斑。条纹密度较高的区域比密度低的区域显示相对于靶平面有较大的位移,转化为三维立体图像时接近角膜地形图图像,暖色如红色代表较大的位移,冷色如蓝色代表较小的位移。结果显示,LASIK手术的干涉使角膜向前的幅度增加,提示生物力学特性较术前改变,并认为与胶原纤维排列的解耦联有关。Luce^[10]提出了一种可以活体测定角膜生物力学的新方法:用眼反应分析仪(ocular response analyzer; ORA; Reichert Ophthalmic Instruments, Depew, NY, USA)测量角膜的滞后作用。研究测量了圆锥角膜、Fuchs角膜营养不良、LASIK术后等几组不同的病例,结果显示Fuchs角膜营养不良角膜的滞后作用最弱,圆锥角膜和LASIK术后相似,黏弹性降低。ORA被认为是目前临床常用的活体测量角膜生物力学参数的仪器^[11]。它原本是用来测量眼压,不受角膜生物力学和角膜厚度的影响。它除了提供角膜补偿眼压、Goldmann相关眼压外,还提供了与屈光手术相关的测量特性是量化角膜黏弹性。ORA能测量的角膜生物力学特性是角膜滞后量(corneal hysteresis, CH)和角膜抵抗因子(corneal resistance factor, CRF)。CH主要是反映角膜黏性阻力,即吸收和分散能量的能力。CRF:角膜阻力因素,即角膜整体硬度,它反映角膜受气流压迫产生形变时的阻力累积效应:黏性阻力和弹性阻力。

2 激光原位角膜磨镶术后角膜生物力学变化及影响因素分析

从生物力学上讲,角膜是眼球前部的一面承重墙,一方面要抵抗生理性眼内压,另一方面要经受外界应力(如眼睑摩擦和手的挤压等)的作用,保持形态恒定,使曲率

不会经常变动。一旦这种保持形态的能力丧失,角膜扩张将开始发展。这种情况出现在自然发生的角膜疾病,如圆锥角膜和透明边缘角膜变性,也会出现在准分子激光角膜屈光手术后^[12]。LASIK术后角膜生物力学的减弱引起医源性角膜扩张的发生风险已被报道过。在此主要介绍LASIK术后角膜生物力学的变化及影响因素。

2.1 LASIK术后角膜生物力学变化 随着ORA测量CH和CRF的问世,为屈光术后和一些眼疾病中角膜生物力学的改变提供了量化手段。已有研究报道,LASIK术后角膜生物力学下降明显^[10,13,14]。Luce^[10]使用ORA测定了不同人群的角膜滞后值,认为其作为一个重要的角膜生物力学特性参数具有1.8~14.6的变化范围,在准分子激光术后其值降低,其对准分子激光患者的条件限定及手术预期效果起到重要作用。Kamiya等^[15]研究中也发现,所有患者平均角膜CH和CRF均较术前降低,CRF降低明显。还发现LASIK术后1wk,角膜生物力学参数改变最大,以后趋于稳定,但均低于术前水平。虽然随着角膜伤口愈合,但仍不能提高角膜生物力学。追踪观察术后6mo,发现LASIK术后角膜生物力学改变是不可逆转的,但趋于稳定,没有继续恶化。且CRF评价LASIK术后角膜生物力学变化可能比CH更有价值。

2.2 影响因素

2.2.1 角膜瓣的因素 在正常人群的角膜组织结构中,只有前弹力层和角膜基质层含有胶原纤维成分,这两层组织负担了角膜主要的抗张力强度,也决定了角膜的韧性。角膜最表面的上皮细胞层对于角膜的抗张力强度贡献很小,因此,实施准分子激光角膜表面切削术(photorefractive keratectomy, PRK)、准分子激光上皮下角膜磨镶术(laser epithelial keratomileusis, LASEK)等表面切削方式的屈光手术祛除了角膜上皮,几乎不影响角膜前表面的曲率与张力。在激光性角膜屈光手术中,板层角膜瓣的制作^[4]和角膜基质的切削^[16],导致术后角膜的张力及强度在一定程度上减弱,角膜生物力学结构也发生改变^[17]。现在认为理想的角膜瓣厚度应刚切过前弹力层,在100 μ m和120 μ m之间,因为薄角膜瓣的优势在于能够更好的保留角膜生物机械拉伸度,更快捷的恢复视觉和减轻角膜水肿^[18]。在一定的限度内,薄角膜瓣不会影响手术后的视觉效果,也不会增加角膜瓣相关的并发症风险,计划性的薄角膜瓣可以提高高度近视的疗效及屈光度的稳定性。Uzbek等^[5]研究中发现,瓣的厚度、直径大小、瓣蒂的位置等都影响着角膜的生物力学。与机械板层刀相比,用飞秒激光制作的瓣薄、均匀性对角膜生物力学影响小,但也会减弱角膜的硬度。虽然单纯角膜瓣制作CH及CHF均有轻微降低,没有统计学意义,但这些生物力学参数在激光切削基质层后,与术前相比,均有明显的降低,有统计学意义。所以,角膜生物力学改变主要由于基质层切削造成的,但瓣的制作确实减弱了角膜的硬度。Philip等^[4]研究认为,LASIK术中的角膜瓣尽管术后复位于基质床上,但对术后角膜生物力学的完整性几乎没有作用。中央部角膜基质被切削,角膜变薄,抵抗力下降,在眼压的作用下,角膜后表面易发生一定程度的前凸,其程度与切削的量及保留的角膜厚度有关,切削量少,保留的角膜厚度多,角膜后表面形态变化小;切削量大,保留的角膜厚度少,角膜后表面前凸明显。术后立即出现的视力症状可能是由于角膜机械力学的不稳定,而延迟的视力下降症状则可能有其

他因素如角膜的生物力学等。

2.2.2 术前角膜厚度和屈光度及剩余基质床

2.2.2.1 术前角膜厚度和屈光度 Franco 等^[19]分别测量正常人及 LASIK 术后患者的角膜中央厚度,角膜曲率半径,使用 ORA 测量 CH 和 CRF 及眼压,结果表明 CH 和 CRF 与角膜曲率半径无关,与角膜中央厚度有关,术后 CH,CRF 较非手术眼明显下降。倪寿翔等^[20]同样发现近视 LASIK 术后角膜 CH 及 CRF 变化与角膜厚度及容积有关,尤其是 CRF 与中央角膜厚度有明显的相关性,且 CRF 评价 LASIK 术后角膜生物力学变化可能比 CH 更有价值。高度近视或角膜偏薄者推荐行有晶状体眼人工晶状体植入术,理论上可避免医源性角膜扩张的发生。目前关于屈光度数对角膜生物力学的影响意见不一。大多数学者认为 CH 值与屈光度呈负相关性^[21-23]。朱荣刚等^[24]认为,高度近视患者 CH 值低于低、中度近视患者,随着近视程度的加深,CH 值具有下降的趋势。但 Lim 等^[25]研究发现新加坡儿童中,CH 及 CRF 与屈光度、眼轴长度不相关。所以,为降低角膜膨隆的发生率,对于高度近视及眼轴偏长的薄角膜者,谨慎选择 LASIK。

2.2.2.2 剩余基质床厚度 剩余角膜基质床厚度(RBT)是导致角膜生物力学不稳定和角膜后表面发生改变的重要因素,也与 PLK 的发生息息相关。剩余 250 μm 厚度的角膜基质床一直被认为是 LASIK 手术安全进行的标准。然而,很多学者报道了符合此标准的患者发生角膜扩张的病例^[17,26-29],并提出 250 μm 的角膜基质床厚度对维持角膜生物力学稳定是不够的^[30]。目前认为可能与个体的遗传易感性和角膜生物力学特性的个体差异等因素有关。有报道 RBT 应控制在原角膜厚度的 55% 以上。崇晓霞等^[30]在对 269 眼术后随访 1a 得出结论,角膜中央厚度至少要 410 μm ,角膜基质床厚度至少要为 280 μm ,才能保证手术安全及术后稳定。Pallikaris 等^[31]发现 PLK 的发生与术后 RBT 呈正相关。目前 RBT 估算有两种方法:用术前测的角膜厚度减去角膜瓣厚度再减切削深度和用术后测的角膜厚度减去角膜瓣厚度。所以,RBT 的估算准确性及角膜厚度测量仪器的选择对 LASIK 的预后及生物力学稳定性起至关重要作用。

2.2.3 激光切削位置及深度 Qazi 等^[32]对不同准分子激光术式患者术后的角膜生物力学及眼压进行测量,ORA 参数指标改变最大的为近视 LASIK 组,改变最小的为近视 LASEK 组,剩余基质的厚度与 CH,CRF 的改变量有相关性($P<0.01$),结果表明制作角膜瓣及深度切削引起 ORA 参数指标的较大改变,提示角膜此时更容易变形,屈光手术的切削部位和深度对角膜的生物力学特性有复杂的影响作用。Qazi 等^[32]研究中也发现激光切削的位置及深度也影响着角膜生物力学。CH,CRF 降低可能与 LASIK 过程中角膜瓣的制作以及基质的切削改变了角膜吸收和分散能量的作用有关^[33]。

2.2.4 眼内压 角膜的生物力学特性不仅影响屈光手术比如 LASIK 的预后,导致手术技术的不可预测^[4,6,34-36],也影响 LASIK 术后眼压测量的真实性^[11,37-39]。LASIK 术后眼压所测数据下降,是因为术后角膜组织结构的变化,LASIK 切削消融了角膜中央的部分组织,打破了角膜生物力学平衡,使角膜张力和强度在一定程度上减弱,造成角膜前表面变薄。眼压测量值变化,但眼压真实值并无变化。虽然 Goldmann 压平眼压计(Goldmann applanation

tonometry, GAT)被认为是测量眼压的“金标准”,但 LASIK 术后角膜特性,比如角膜厚度、角膜曲率、泪膜的稳定性以及角膜基质弹性等改变都可使眼压的测量值出现偏差。Liu 等^[11]研究角膜生物力学特性对眼压的影响,结果显示个体角膜生物力学特性对眼压的影响远大于角膜厚度和角膜曲率半径。Hjortdal^[40]报道在切削量达角膜厚度的 70% 时,眼压高至 100mmHg 时角膜的曲率半径发生一些改变。因此,在生理范围内 IOP 不会引起角膜膨隆扩张,至少在实验室的短期研究中成立。而 LASIK 术后由于剩余角膜较薄,抵抗力下降,即使在正常眼压的长期作用下也可以发生角膜后表面前凸。吴凌等^[41]对兔眼的动物研究中总结出:角膜的生物力学的变化与眼压存在一定关系,随着眼压的升高,相对于初始眼压状态的角膜凸出度逐渐增大。为了确保屈光手术的安全性和稳定性,眼压应维持在正常范围的较低水平。

2.2.5 其它因素 CH,CRF 与年龄呈负相关,与 CCT 呈正相关^[42]。

3 结语

综上所述,LASIK 术后角膜生物力学改变,随着时间的推移,观察生物力学指标逐渐趋于稳定。通过联合对角膜生物力学及角膜后表面高度、角膜厚度、剩余角膜基质床的估算、眼压等的观察,来严格进行 LASIK 手术的术前筛选,术前设计及术后疗效评价。预防医源性角膜扩张的发生。并且,随着对检查仪器的不断开发,可以更加准确地观察角膜的生物力学的改变,为 LASIK 手术的安全性提供更加客观的依据。

参考文献

- Seiler T, Koufala K, Richter G. Iatrogenic keratectasia after laser *in situ* keratomileusis. *J Refract Surg* 1998;14(3):312-317
- Seitz B, Rozsival P, Feuermannova A, et al. Penetrating keratoplasty for iatrogenic keratoconus after repeat myopic laser *In situ* keratomileusis: histologic findings and literature review. *J Cataract Refract Surg* 2003;29(11):2217-2224
- Seitz B, Torres F, Langebucher A, et al. Posterior corneal curvature changes after myopic laser *in situ* keratomileusis. *Ophthalmology* 2001;108(4):666-673
- Philip DJ, Jaycock PD, Lobo L, et al. Interferometric technique to measure Biomechanical changes in the cornea induced by refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 2005;31(1):175-184
- Uzbek AK, Kamburoglu G, Mahmoud AM, et al. Change in biomechanical parameters after flap creation using the intralase femtosecond laser and subsequent excimer laser ablation current. *Eye Res* 2011;36(7):614-619
- Dupps WJ Jr, Wilson SE. Biomechanics and wound healing in the cornea. *Exp Eye Res* 2006;83(4):709-720
- 刘志成, 张昆亚, 王玉慧. 兔眼角膜生物力学特性的实验研究. *中国医学物理学杂志* 2003;20(3):189-192
- Farrell RA, Wharam J, Kim D, et al. Polarized light propagation in corneal lamellae. *J Refract Surg* 1999;15(6):700-705
- Meek KM, Newton RH. Organization of collagen fibrils in the corneal stroma in relation to mechanical properties and surgical practice. *J Refract Surg* 1999;15(6):695-699
- Luce DA. Determining *in vivo* biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. *J Cataract Refract Surg* 2005;31(1):156-162
- Liu J, Roberts CJ. Influence of corneal biomechanical properties on intraocular pressure measurement: quantitative analysis. *J Cataract Refract Surg* 2005;31(1):146-155

- 12 Randleman JB. Post laser *in situ* keratomileusis ectasia: current understanding and future directions. *Curr Opin Ophthalmol* 2006;17(4):406-412
- 13 Ortiz D, Pinero D, Shabayek MH, *et al.* Corneal biomechanical properties in normal, post-laser *in situ* keratomileusis, and keratoconic eyes. *J Cataract Refract Surg* 2007;33(8):1371-1375
- 14 Pepose JS, Feigenbaum SK, Qazi MA, *et al.* Changes in corneal biomechanics and intraocular pressure following LASIK using static, dynamic, and noncontact tonometry. *Am J Ophthalmol* 2007;143(1):39-47
- 15 Kamiya K, Schimizu K, Ohmoto F. Time course of corneal biomechanical parameters after laser *in situ* keratomileusis. *Ophthalmic Res* 2009;42(3):167-171
- 16 Andreassen TT, Simonsen AH, Oxlund H. Biomechanical properties of keratoconus and normal corneas. *Exp Eye Res* 1980;31(4):435-441
- 17 Amoils SP, Deist MB, Gous P, *et al.* Iatrogenic keratectasia after laser *in situ* keratomileusis for less than -4.0 to -7.0 diopters of myopia. *J Cataract Refract Surg* 2000;26(7):967-977
- 18 Baek TM, Lee KH, Kagaya F, *et al.* Factors affecting the forward shift of posterior or corneal surface after laser *in situ* keratomileusis. *Ophthalmology* 2001;108(2):317-320
- 19 Franco S, Lira M. Biomechanical properties of the cornea measured by the Ocular Response Analyzer and their association with intraocular pressure and the central corneal curvature. *Clin Exp Optom* 2009;9(26):469-475
- 20 倪寿翔, 郁继国, 包芳军, *等.* 近视 LASIK 术后角膜生物力学参数变化的相关性. *国际眼科杂志* 2010;10(12):2305-2307
- 21 Plakitsi A, O'Donnell C, Miranda MA. Corneal biomechanical properties measured with the ocular response analyser in a myopic population. *Ophthalmic Physiological Optics* 2011;31(4):404-412
- 22 Chang PY, Chang SW, Wang JY. Assessment of corneal biomechanical properties and intraocular pressure with ocular response analyzer in childhood myopia. *Br J Ophthalmol* 2010;94(7):877-881
- 23 Shen M, Fan F, Xue A, *et al.* Biomechanical properties of the cornea in high myopia. *Vis Res* 2008;48(21):2167-2171
- 24 朱荣刚, 王勤美, 陈世豪. 眼反应分析仪对不同程度近视患者眼角膜滞后差异分析. *眼科新进展* 2010;30(2):158-160
- 25 Lim L, Gazzar DG, Chan YH, *et al.* Cornea biomechanical characteristics and their correlates with refractive error in Singaporean children. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2008;49(9):3852-3857
- 26 何燕玲, 元力, 黎晓新, *等.* Pentacam 三维眼前节分析诊断系统对近视眼前节的测量. *眼科研究* 2007;25(11):872-874
- 27 Ciolino JB, Belin MW. Changes in the posterior cornea after laser *in situ* keratomileusis and photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 2006;32(9):1426-1431
- 28 Guirao A. Theoretical elastic response of the cornea to refractive surgery: risk factors for keratectasia. *J Refract Surg* 2005;21(2):176-185
- 29 Lifshitz T, Levy J, Klemperer I, *et al.* Late bilateral keratectasia after LASIK in a low myopic patient. *J Refract Surg* 2005;21(5):494-496
- 30 崇晓霞, 赵海霞, 陈晔, *等.* LASIK 后角膜后表面曲率变化的研究. *中国激光医学杂志* 2008;17(1):9-12
- 31 Pallikaris IG, Kymionos GD, Astyrakakis NI. Corneal ectasia in duce by laser *in situ* keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2001;27(17):1796-1802
- 32 Qazi MA, Sanderson JP, Mahmoud AM. Post operative changes in intraocular pressure and corneal biomechanical metrics Laser *in situ* keratomileusis versus laser-assisted subepithelial keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 2009;35(10):1774-1788
- 33 Chen S, Chen D, Wang J, *et al.* Changes in ocular response analyzer parameters after LASIK. *J Cataract Refract Surg* 2010;26(4):279-288
- 34 Roberts C. Biomechanics of the cornea and wave front-guided laser refractive surgery. *J Refract Surge* 2002;18(5):589-592
- 35 Kamiya K, Miyata K, Tokunaga T, *et al.* Structural analysis of the cornea using scanning-slit corneal topography in eyes under-going excimer laser refractive surgery. *Cornea* 2004;23(8):59-64
- 36 Deenadayalu C, Mobasher B, Rajan SD, *et al.* Refractive change induced by the LASIK flap in a biomechanical finite element model. *J Refract Surg* 2006;22(3):286-292
- 37 Orssengo GJ, Pye DC. Determination of the true intraocular pressure and modulus of elasticity of the human cornea *in vivo*. *Bull Math Biol* 1999;61(3):551-572
- 38 Herndon LW. Measuring intraocular pressure-adjustments for corneal thickness and new technologies. *Curr Opin Ophthalmol* 2006;17(2):115-119
- 39 Bryant MR, McDonnell PJ. Constitutive laws for biomechanical modeling of refractive surgery. *J Biomech Eng* 1996;118(4):473-481
- 40 Hjortdal JO. Regional elastic performance of the human cornea. *J Biomech* 1996;29(5):931-942
- 41 吴凌, 樊渝波, 邓应平, *等.* 兔眼 LASIK 术后角膜厚度和压力的关系. *国际眼科杂志* 2007;7(5):1298-1301
- 42 Fontes BM, Ambrósio R Jr, Jardim D, *et al.* Corneal biomechanical metrics and anterior segment parameters in mild keratoconus. *Ophthalmology* 2010;117(4):673-679