

可视化角膜生物力学分析仪在眼科中的应用

时媛 综述 黄旭东 姜雅琴 审校

261053 山东省潍坊市, 潍坊医学院(时媛); 261041 山东省潍坊市, 潍坊眼科医院(黄旭东、姜雅琴)

通信作者: 姜雅琴, Email: jyqoph@163.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2018.06.016

【摘要】 可视化角膜生物力学分析仪(Corvis ST)作为新的生物力学测量仪器,将超高速 Scheimpflug 技术融合进非接触式眼压测量仪器中,可以动态记录并分析角膜受压形态改变、形态还原过程中的生物力学改变。随着大量基础研究的进行及长时间临床数据积累,Corvis ST 在眼科的应用也逐渐开展。本文就 Corvis ST 测量原理、方法、参数以及其在圆锥角膜、屈光手术、青光眼和角膜胶原交联中的应用进行综述,为相关研究提供参考。

【关键词】 角膜; 生物力学; 可视化角膜生物力学分析仪

Application of corneal visualization Scheimpflug technology in Ophthalmology Shi Yuan, Huang Xudong, Jiang Yaqin

Weifang Medical University, Weifang 261053, China (Shi Y); Weifang Eye Hospital, Weifang 261041, China (Huang XD, Jiang YQ)

Corresponding author: Jiang Yaqin, Email: jyqoph@163.com

【Abstract】 As a new biomechanical measuring instrument, corneal visualization Scheimpflug technology (Corvis ST) integrates ultra-high speed Scheimpflug technology into non-contact intraocular pressure measuring instrument. Corvis ST can dynamically record and analyze the corneal pressure form change and the biomechanical change during the morphological reduction process. With a large number of basic research and a long time accumulation of clinical data, The application of Corvis ST in ophthalmology was gradually carried out. This paper introduced the biomechanical properties of the cornea and the application of corneal biomechanical measuring instrument in ophthalmology, thereby providing a reference for related research.

【Key words】 Corneal; Biomechanics; Corneal visualization scheimpflug technology

角膜是位于眼球最前端的一层薄的、透明的组织,在组织学上角膜可分为 5 层,各层的生物力学特性并不相同^[1]。通过人类及其他动物角膜的在体实验以及数据模型证实角膜是一种既有力学特性又有黏弹特性的材料。角膜生物力学主要研究角膜组织在外力作用下的变形及平衡过程,随年龄增长角膜生物力学呈下降趋势,病理状态下,如圆锥角膜、青光眼,角膜的生物力学特性也会发生改变^[2-3]。研究显示,角膜生物力学的变化能影响眼压测量的准确性,有助于某些角膜疾病的早期诊断,也可辅助预测角膜屈光手术后的效果^[4-6]。Wells 等^[7]认为角膜生物力学特性反映了整个眼球的生物力学,进而能发现一些青光眼的易感因素。

角膜生物力学特征颇为复杂,目前测量角膜生物力学特性的方法主要有离体测量和活体测量,离体测量法主要包括角膜膨胀试验和角膜条带拉伸试验,活体测量法是临床上常用的方法。随着活体测量仪器的更新换代,眼反应分析仪(ocular

response analyzer,ORA)向可视化角膜生物力学分析仪(corneal visualization Scheimpflug technology, Corvis ST)的转变,使我们可以 在体测量角膜生物力学特征的同时,也直观地观测到角膜在外力作用下的动态变形过程。Corvis ST 作为新型角膜生物力学测量仪,不仅有较高的可重复性和一致性^[8-9],而且对临床眼压测量、早期圆锥角膜筛查及角膜交联的有效性评估都起到明确的作用。本文就 Corvis ST 测量原理、操作方法及测量参数的可靠性和临床应用情况作一综述。

1 Corvis ST 的测量原理

Corvis ST 是非接触、可视化的动力学眼压分析仪,把超高速 Scheimpflug 技术融合进非接触式眼压测量仪器中,研究角膜受外力作用下变形的整个动态过程。Scheimpflug 高速相机可采集在一定时间内(均衡喷气脉冲作用下 31 ms)140 帧断层图像,通过系统软件分析后,将慢动作显示在控制面板上,并记录

形变过程参数,分析角膜生物力学特性。同时也可以将角膜形变幅度图、角膜形变速率图和角膜压平长度图记录下来。在测量开始时机器会发出一束脉冲气流,通过气冲印压技术引起角膜形变。角膜在气流作用下向内凹陷运动,在此过程中角膜会达到第一压平状态,即角膜中央 0.5 mm 区域形态由凸面向凹面转变的瞬间。之后角膜继续向内凹陷变形达到角膜最大形变幅度,即最大压陷状态,此时会有一个短暂的震荡周期。由于角膜自身黏弹性、脉冲气流的减弱消失和眼压的共同作用,角膜开始返回到初始状态,这个过程中角膜再次经历第二压平状态,即角膜中央 0.5 mm 区域状态由凹面向凸面转变的瞬间,随后角膜恢复到初始状态,角膜形变过程结束。由于气流的动态性和角膜自身的生物力学特性,如弹性、粘滞性等,使得 2 次压平状态不一致^[10]。

2 Corvis ST 的测量方法及测量参数

Corvis ST 作为目前最新的活体生物力学测量仪器,具有不需表面麻醉,无交叉感染,不接触角膜,快速、自动化采集等优点。在计算机中输入患者信息,嘱患者将下颌放在仪器支架上,前额靠在前额托上,固定头部,尽量睁大双眼,测试眼注视眼压计中央固视红点,以保持眼球位于正中位。设备可自动寻找并对准角膜顶点,在自动模式下根据屏幕提示,检查者通过控制操纵杆进行瞄准和对焦,自动发射空气脉冲,测量过程开始。对于圆锥角膜及角膜表面严重水肿等自动对焦困难的受检者,可选择手动测量。

在该过程中可以得到如下参数:第一次压平时间(the first applanation time, A1T)、第一次压平长度(the first applanation length, A1L)、第一次压平速度(the first applanation velocity, V_{in})、第二次压平时间(the second applanation time, A2T)、第二次压平长度(the second applanation length, A2L)、第二次压平速度(corneal velocity during the second applanation moment, V_{out})、最大压陷时间(time from the start until the highest concavity, HC time)(角膜从初始状态到最大压陷状态的时间)、最高点两区膝峰间距(distance of the two surrounding "knee's" at highest concavity, PD)(角膜处于最大压陷状态时 2 个屈膝峰之间的距离)、最高点曲率半径(central curvature radius at highest concavity, HC radius)(角膜达最大压陷状态时角膜反向曲率半径)和最大压陷深度(deformation amplitude, DA)(角膜达最大压陷状态时角膜顶点间的垂直距离,可以反映角膜硬度的变化^[8,11])。根据气压脉冲大小、A1T 和 A2T 获得眼压,同时在眼压基础上提供基于角膜厚度及年龄的矫正眼压,根据初始状态下角膜中央水平截图测量得出中央角膜厚度(central corneal thickness, CCT)。系统自带的 QS 质量监控保证数据精度。

3 Corvis ST 测量参数的可靠性

随着 Corvis ST 的推广、基础研究的开展及临床数据积累,关于其重复性及一致性的研究也有了一定的进展。Corvis ST 不仅可以观察到角膜形变的全过程,而且能够提供具有较好重复性和一致性的重要的力学参数^[8-9]。Reznicek 等^[12]研究发

现,Corvis ST 比 Goldmann 压平式眼压计测得的眼压值偏高。祖培培等^[13]发现 Corvis ST 测量的眼压值较 ORA 测量值偏低。Hong 等^[14]在测量 23 例正常人及 36 例青光眼患者眼压时,发现 Corvis ST、Goldmann 压平式眼压计、非接触眼压计三者测量结果一致性好。Reznicek 等^[12]也得出相似结论,并且认为 Corvis ST 和超声测量在 CCT 值的测量上具有相关性明显、一致性好等优点;与之相反,肖信等^[15]发现 Corvis ST 测量的 CCT 高于 A 型超声,两者一致性差,并认为该误差在薄角膜患者、高度近视患者和二次增效手术患者中较大。Leung 等^[16]发现 Corvis ST 可矫正 CCT 和相关干扰在眼压测量时造成的误差,其余参数重复性差,同时还发现更高的眼压和更厚的角膜使角膜 DA 降低。因此临床中应用 DA 评估角膜生物力学,需特别注意眼压等的影响。Hom 等^[8]测量 37 名正常角膜志愿者参数发现重复性最好的是 CCT,其次为 DA、A1T 和眼压,而 Nemeth 等^[9]发现重复性最好的为 CCT,其次为眼压、A1T、DA。

4 Corvis ST 的临床应用

4.1 Corvis ST 在圆锥角膜中的应用

研究表明,圆锥角膜的角膜生物力学改变早于形态学^[17],对角膜生物力学的研究为亚临床期圆锥角膜的诊断及预防提供了新的方向。圆锥角膜的前弹力层和前部基质层胶原纤维结构发生改变,中央区胶原纤维坚韧性降低,部分胶原纤维发生断裂,可能导致角膜的机械抗张能力及弹性下降^[18],这为圆锥角膜生物力学变化提供了理论基础。圆锥角膜与正常角膜在 DA 参数上存在明显的重叠范围,这限制了鉴别圆锥角膜的准确性^[19]。Ambrosio 等^[20]通过比较圆锥角膜及正常角膜发现,2 个组大多数角膜生物力学参数差异有统计学意义,基于线性回归分析得出的新参数 Corvis Combo11,该计算方法减少了眼压对 DA 的影响,其受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线显示该参数能更好地区分圆锥角膜与正常角膜。田磊等^[19]研究发现,除 A1L、HC-time、PD 外,圆锥角膜组与正常角膜在其余参数上差异有统计学意义。在 ROC 曲线分析中,DA 对于圆锥角膜的诊断效率最高,其诊断效率与严重程度呈正比,分析产生这种差异的原因为圆锥角膜基质胶原纤维数量少、脆弱,以及圆锥角膜组眼压低的共同影响。魏升升等^[21]通过比较 32 例 41 眼圆锥角膜患者及 41 名 41 眼健康角膜人群发现,圆锥角膜的 V_{in} 、 V_{out} 、DA 和 HC radius 较健康角膜均有明显的改变,并认为 HC radius 对于角膜生物力学变化具有较高的敏感性,在圆锥角膜的诊断中有较大的参考价值。

4.2 Corvis ST 在屈光手术中的应用

近几年来,屈光手术取得很大的技术进步,虽然对其基础科学和手术前后的角膜生物力学原理有了一定的认识,但手术并发症仍不可避免。研究术后角膜生物力学参数的变化有助于术前手术方式的选择、手术参数的设计,从而提高手术的安全性和屈光稳定性,同时能早期筛查和诊断角膜退行性病变,避免并发症的发生。

4.2.1 准分子激光角膜切削术后角膜生物力学变化 准分子

激光角膜切削术 (photorefractive keratectomy, PRK) 是应用准分子激光切削角膜中央前表面,即除去上皮层的前弹力层和浅层基质,使角膜前表面弯曲度减少。Chen 等^[22]发现,PRK 术后 A1T、Vin、A2L 和 HC radius 较术前降低,A2T、Vout、HC time 和 DA 值较术前增大;术后 A1T 变小,DA 变大,表明角膜对形变的阻力变小,角膜硬度降低。Ali 等^[23]研究发现,PRK 手术前后 CorvisST 参数 A1T、Vin、A2T、Vout、DA 和 HC radius 均有变化。

4.2.2 准分子激光角膜原位磨镶术后角膜生物力学变化 祖培培等^[24]通过对 12 眼准分子激光角膜原位磨镶术 (excimer laser in situ keratomileusis, LASIK) 手术前后早期对比,发现术后 A1T、HC time 和眼压均明显降低,术后 Vout、PD 和 DA 的绝对值均较术前增加。李晶等^[25]通过 LASIK 术后远期生物力学指标与飞秒激光制瓣 LASIK (femtosecond LASIK, FS-LASIK) 术后早期对比发现,除 A1L 外,其他指标差异无统计学意义,说明 LASIK 手术远期角膜生物力学稳定。

4.2.3 FS-LASIK 术后角膜生物力学变化 祖培培等^[24]通过比较 29 眼 FS-LASIK 手术前后生物力学发现,患者术后 A1T、HC time、HC radius 和眼压均明显降低,手术前后 Vout、PD 和 DA 的绝对值均较术前增加。

4.2.4 不同屈光手术方式角膜生物力学变化 Shen 等^[26]对比了飞秒激光角膜基质透镜切除术 (small incision lenticule extraction, SMILE)、准分子激光上皮下角膜磨镶术 (laser subepithelial keratomileusis, LASEK) 和 FS-LASIK 术后角膜生物力学参数,发现与 LASEK 相比,FS-LASIK 术后患者 DA 更大而 A1T 更小,SMILE 与 FS-LASIK、FS-LASIK 与 LASIK 术后角膜生物力学参数比较,差异都无统计学意义,表明不同角膜屈光手术对角膜硬度的改变程度不同。吴东芳等^[27]采用 ORA 对 LASIK、LASEK 术后角膜生物力学进行比较,发现术后术眼角膜滞后量和角膜阻力因子数值均下降,2 种手术方式对角膜生物力学的影响相似。

4.3 Corvis ST 在青光眼中的应用

角膜生物力学特征会影响眼压的测量结果^[28],并且是青光眼视神经疾病的一种独立危险因素^[29]。研究表明,薄角膜会增加青光眼发生和发展的风险。田磊等^[30]通过对比正常人、原发性开角型青光眼患者 (primary openangle glaucoma, POAG) 和原发性闭角型青光眼患者 (primary angle-closure glaucoma, PACG) 间的生物力学参数,发现 Corvis ST 能有效测量正常角膜和不同类型青光眼患者角膜生物力学特征,且多数角膜生物力学参数差异,青光眼患者组角膜受力后较正常角膜形变幅度小,但 POAG 组和 PACG 组角膜形变幅度相近。Corvis ST 较 ORA 和非接触式眼压计低估了眼压,或许会延误青光眼的诊断和治疗^[13],利用角膜生物力学特征对青光眼发生和发展危险因素进行评估对青光眼的早期诊断可以起到一定的辅助作用。如何综合角膜生物力学、不同仪器的眼压测量及其他检查来排查青光眼还有待于进一步研究。

4.4 Corvis ST 在角膜胶原交联中的应用

角膜胶原交联术后 Corvis ST 测量的 HC radius 明显变大,

这与交联术后角膜硬度增加的效果一致,证明 Corvis ST 可应用于对角膜交联术后有效性的评价^[31]。紫外线/核黄素角膜交联法 (ultraviolet-A/riboflavin corneal cross-linking, UV-CXL) 通过紫外线 A 和核黄素介导角膜基质内胶原纤维相互交联,从而提高角膜机械硬度和角膜基质生物力学。研究表明,UV-CXL 能有效增加角膜生物力学强度^[32]。快速 UV-CXL 则具有提高紫外线照射幅度,减少照射时间等优势,通过与标准 UV-CXL 对比,发现离体猪眼角膜交联术后生物力学强度改变无明显差异^[33]。除上述 UV-CXL 光化学交联法外,近年发现一种天然生物制剂京尼平 (genipin) 也具有交联作用,且细胞毒性低。Avila 等^[34]报道京尼平交联离体猪眼角膜能够明显提高生物力学强度。通过对不同交联方法的研究,有助于评价每种方法的有效性,有针对性地进行选择应用。

目前 Corvis ST 软件还不成熟,其测量参数为形变原始状态的显示,且受眼压等因素影响较大^[19]。如何根据原始数据推导出受外界因素小且直接显示角膜生物力学的参数,还需要深入研究。

综上所述,Corvis ST 是一种非接触式生物力学测量仪器,不仅可以在体测量角膜生物力学特性,而且可以观察到角膜形变的全过程。关于其在圆锥角膜、角膜胶原交联及屈光手术中的应用已取得一定进展,但其在白内障中的应用仍有待于进一步研究。随着 Corvis ST 在临床中应用的推广,大量基础研究的开展及长时间临床数据积累,其在临床中的应用范围将不断扩展。

参考文献

- [1] Vellara HR, Patel DV. Biomechanical properties of the keratoconic cornea; a review [J]. Clin Exp Optom, 2015, 98 (1) : 31-38. DOI: 10.1111/cxo.12211.
- [2] Galguskas S, Norvydaitė D, Krasauskaitė D, et al. Age-related changes in corneal thickness and endothelial characteristics [J]. Clin Interv Aging, 2013, 8 : 1445-1450. DOI: 10.2147/CIA.S51693.
- [3] Hirneiß C, Sekura K, Brandlhuber U, et al. Corneal biomechanics predict the outcome of selective laser trabeculoplasty in medically uncontrolled glaucoma [J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2013, 251 (10) : 2383-2388. DOI: 10.1007/s00417-013-2416-2.
- [4] Tonnu PA, Ho T, Newson T, et al. The influence of central corneal thickness and age on intraocular pressure measured by pneumotometry, non-contact tonometry, the Tono-Pen XL, and Goldmann applanation tonometry [J]. Br J Ophthalmol, 2005, 89 (7) : 851-854. DOI: 10.1136/bjo.2004.056622.
- [5] Schweitzer C, Roberts CJ, Mahmoud AM, et al. Screening of forme fruste keratoconus with the ocular response analyzer [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2010, 51 (5) : 2403-2410. DOI: 10.1167/iovs.09-3689.
- [6] Roberts C. Biomechanics of the cornea and wavefront-guided laser refractive surgery [J]. J Refract Surg, 2002, 18 (5) : S589-592.
- [7] Wells AP, Garway-Heath DF, Poostchi A, et al. Corneal hysteresis but not corneal thickness correlates with optic nerve surface compliance in glaucoma patients [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2008, 49 (8) : 3262-3268. DOI: 10.1167/iovs.07-1556.
- [8] Hon Y, Lam AK. Corneal deformation measurement using Scheimpflug noncontact tonometry [J]. Optom Vis Sci, 2013, 90 (1) : 1-8. DOI: 10.1097/OPX.0b013e318279eb87.
- [9] Nemeth G, Hassan Z, Csutak A, et al. Repeatability of ocular biomechanical data measurements with a Scheimpflug-based noncontact device on normal corneas [J]. J Refract Surg, 2013, 29 (8) : 558-563. DOI: 10.3928/1081597X-20130719-06.
- [10] Yang YF, Zhang J, Wang XH, et al. Simulation of corneal tissue mechanical deformation due to laser thermokeratoplasty; a finite element

- methods study [J]. *Australas Phys Eng Sci Med*, 2009, 32(4): 220-225.
- [11] Faria-Correia F, Ramos I, Valbon B, et al. Scheimpflug-based tomography and biomechanical assessment in pressure-induced stromal keratopathy [J]. *J Refract Surg*, 2013, 29(5): 356-358. DOI: 10.3928/1081597X-20130129-03.
- [12] Reznicek L, Muth D, Kampik A, et al. Evaluation of a novel Scheimpflug-based non-contact tonometer in healthy subjects and patients with ocular hypertension and glaucoma [J]. *Br J Ophthalmol*, 2013, 97(11): 1410-1414. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2013-303400.
- [13] 祖培培, 王雁, 左彤, 等. 角膜生物力学眼压分析仪 Corvis ST 测量值的重复性与一致性研究 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2013, 15(5): 261-265. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2013.05.002.
- Zu PP, Wang Y, Zuo T, et al. Preliminary study of the repeatability and agreement of Scheimpflug Noncontact Tonometry (Corvis ST) [J]. *Chin J Optometry Ophthalmol Vis Sci*, 2013, 15(5): 261-265. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2013.05.002.
- [14] Hong J, Xu J, Wei A, et al. A new tonometer-the Corvis ST tonometer: clinical comparison with noncontact and Goldmann applanation tonometers [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2013, 54(1): 659-665. DOI: 10.1167/iovs.12-10984.
- [15] 肖信, 刘伟民, 黄建忠, 等. 角膜生物力学分析仪测量近视患者中央角膜厚度和眼压的准确性评价 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2016, 34(4): 340-344. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.04.011.
- Xiao X, Liu WM, Huang JZ, et al. Accuracy of Corvis ST for the measurement of central corneal thickness and intraocular pressure in myopia [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2016, 34(4): 340-344. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.04.011.
- [16] Leung CK, Ye C, Weinreb RN. An ultra-high-speed Scheimpflug camera for evaluation of corneal deformation response and its impact on IOP measurement [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2013, 54(4): 2885-2892. DOI: 10.1167/iovs.12-11563.
- [17] Muir A, Greenspan DS. Metalloproteinases in *Drosophila* to humans that are central players in developmental processes [J]. *J Biol Chem*, 2011, 286(49): 41905-41911. DOI: 10.1074/jbc.R111.299768.
- [18] Seppälä HP, Määttä M, Rautia M, et al. EMMPRIN and MMP-1 in keratoconus [J]. *Cornea*, 2006, 25(3): 325-330. DOI: 10.1097/OI.ico.0000183534.22522.39.
- [19] 田磊, 王丽强, 孟晓丽, 等. 应用可视化角膜生物力学分析仪评估不同阶段圆锥角膜生物力学特征 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2014, 16(5): 268-273. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.05.003.
- Tian L, Wang LQ, Meng XL, et al. Assessment of corneal biomechanical properties using corneal visualization Scheimpflug technology at different stages of keratoconus [J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2014, 16(5): 268-273. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.05.003.
- [20] Ambrosio R, Caldas D, Ramos I. Corneal biomechanical assessment using dynamic ultra high-speed Scheimpflug technology non-contact tonometry (UHS-ST NCT): preliminary results [DB/OL]. <http://www.optomescomtr/TR/dosya/1-604/h/corvisstasers>.
- [21] 魏升升, 李勇, 李晶, 等. 圆锥角膜与健康角膜生物力学的对比研究 [J]. *中华眼科杂志*, 2016, 52(9): 669-673. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2016.09.007.
- Wei SS, Li Y, Li J, et al. Corneal biomechanical properties in keratoconic and normal eyes [J]. 2016, 52(9): 669-673. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2016.09.007.
- [22] Chen X, Stojanovic A, Hua Y, et al. Reliability of corneal dynamic scheimpflug analyser measurements in virgin and post-PRK eyes [J/OL]. *PLoS One*, 2014, 9(10): e109577 [2017-09-22]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25302580>. DOI: 10.1371/journal.pone.0109577.
- [23] Ali NQ, Patel DV, McGhee CN. Biomechanical responses of healthy and keratoconic corneas measured using a noncontact scheimpflug-based tonometer [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2014, 55(6): 3651-3659. DOI: 10.1167/iovs.13-13715.
- [24] 祖培培, 王雁, 吴迪, 等. 角膜屈光手术后早期角膜生物力学特性变化研究 [J]. *中国实用眼科杂志*, 2013, 31(7): 866-871. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-4443.2013.07.017.
- Zu PP, Wang Y, Wu D, et al. Short-term influence of different refractive surgery on corneal biomechanical properties [J]. *Chin J Pract Ophthalmol*, 2013, 31(7): 866-871. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-4443.2013.07.017.
- [25] 李晶, 刘建国, 魏升升, 等. 准分子激光原位角膜磨镶术后远期角膜生物力学变化研究 [J]. *中国实用眼科杂志*, 2016, 34(3): 231-235. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-4443.2016.03.007.
- Li J, Liu JG, Wei SS, et al. Long-term changes in corneal deformation parameters after laser in situ keratomileusis [J]. *Chin J Pract Ophthalmol*, 2016, 34(3): 231-235. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-4443.2016.03.007.
- [26] Shen Y, Chen Z, Knorz MC, et al. Comparison of corneal deformation parameters after SMILE, LASEK, and femtosecond laser-assisted LASIK [J]. *J Refract Surg*, 2014, 30(5): 310-318.
- [27] 吴东芳, 邓应平, 王顺清, 等. 不同准分子激光角膜屈光手术对近视眼角膜滞后量和角膜阻力因子的影响 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2015, 33(6): 541-545. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.06.013.
- Wu DF, Deng YP, Wang SQ, et al. Influence of different types of corneal laser refractive surgeries on corneal hysteresis and corneal resistance factor in myopic eyes [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2015, 33(6): 541-545. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2015.06.013.
- [28] Prata TS, Lima VC, Guedes LM, et al. Association between corneal biomechanical properties and optic nerve head morphology in newly diagnosed glaucoma patients [J]. *Clin Exp Ophthalmol*, 2012, 40(7): 682-688. DOI: 10.1111/j.1442-9071.2012.02790.x.
- [29] Kling S, Marcos S. Effect of hydration state and storage media on corneal biomechanical response from *in vitro* inflation tests [J]. *J Refract Surg*, 2013, 29(7): 490-497. DOI: 10.3928/1081597X-20130617-08.
- [30] 田磊, 吴莹, 黄一飞. 可视化角膜生物力学分析仪评估青光眼患者角膜生物力学特征 [J]. *眼科*, 2016, 25(1): 30-35.
- [31] Ambrósio R, Valbon BF, Faria-Correia F, et al. Scheimpflug imaging for laser refractive surgery [J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2013, 24(4): 310-320. DOI: 10.1097/ICU.0b013e3283622a94.
- [32] Wollensak G, Spoerl E, Seiler T. Stress-strain measurements of human and porcine corneas after riboflavin-ultraviolet-A-induced cross-linking [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003, 29(9): 1780-1785.
- [33] Rocha KM, Ramos-Esteban JC, Qian Y, et al. Comparative study of riboflavin-UVA cross-linking and "flash-linking" using surface wave elastometry [J]. *J Refract Surg*, 2008, 24(7): S748-751.
- [34] Avila MY, Navia JL. Effect of genipin collagen crosslinking on porcine corneas [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2010, 36(4): 659-664. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.11.003.

(收稿日期: 2017-10-26 修回日期: 2018-04-23)

(本文编辑: 张宇)

读者 · 作者 · 编者

欢迎订阅《中华实验眼科杂志》

《中华实验眼科杂志》为中国科技论文统计源期刊、中国中文核心期刊, 月刊, 80 面, 每月 10 日出版, 每期定价 16 元, 邮发代号: 36-13, 国内外公开发售, 欢迎到各地邮局或直接与本刊编辑部联系订阅。联系电话: 0371-87160872。

(本刊编辑部)