

可视化角膜生物力学分析仪在近视眼中的研究进展

朱娅萍¹, 董开业², 刘景晨³, 李才锐^{2*}

¹大理大学临床医学院, 云南 大理

²大理大学第一附属医院眼科, 云南 大理

³江西中医药大学临床医学院眼科, 江西 南昌

收稿日期: 2022年6月5日; 录用日期: 2022年6月15日; 发布日期: 2022年6月27日

摘要

可视化角膜生物力学分析仪(Corneal Visualization Scheimpflug Technology, Corvis ST)作为眼科领域新型检查设备, 可分析并得出相应的角膜生物力学参数, 并且可将角膜受压形变全过程快速精确记录下来。近年来, 近视人数逐年增加, 且高度近视引发的一系列并发症, 最终导致不可逆的视力丧失, 严重影响人们的生活质量, 将Corvis ST应用于近视研究中是非常有必要的。本文简要介绍角膜生物力学测量发展、Corvis ST等测量工作原理, 并对其在近视眼中的应用情况进行综述, 为开展相关眼科研究工作提供重要参考。

关键词

角膜生物力学, 可视化角膜生物力学分析仪, 近视

Research Progress of Corvis ST in Myopia

Yaping Zhu¹, Kaiye Dong², Jingchen Liu³, Cairui Li^{2*}

¹Dali University School of Clinical Medicine, Dali Yunnan

²Department of Ophthalmology, The First Affiliated Hospital of Dali University, Dali Yunnan

³Department of Ophthalmology, Clinical Medical College, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang Jiangxi

Received: Jun. 5th, 2022; accepted: Jun. 15th, 2022; published: Jun. 27th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 朱娅萍, 董开业, 刘景晨, 李才锐. 可视化角膜生物力学分析仪在近视眼中的研究进展[J]. 眼科学, 2022, 11(2): 157-165. DOI: 10.12677/hjo.2022.112023

Abstract

Corneal Visualization Scheimpflug Technology (Corvis ST), as a new inspection equipment in the ophthalmology field, can analyze and obtain the corresponding corneal biomechanical parameters, and can quickly and accurately record the whole corneal compressive deformation process. In recent years, the number of myopia is increasing year by year, and a series of complications caused by high myopia eventually lead to irreversible vision loss, seriously affecting people's quality of life, so it is very necessary to apply Corvis ST in myopia research. This paper briefly introduces the development of corneal biomechanics measurement and the working principles of Corvis ST, and summarizes the application of Corvis ST in myopia, so as to provide an important reference for relevant ophthalmic research.

Keywords

Corneal Biomechanics, Corvis ST, Myopia

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

角膜是位于眼球最前端的透明组织结构,能够维持稳定眼球外形,对眼内容物也起到了一定的保护作用,同时也是眼屈光系统中的重要组成成分。在组织学上,角膜自外至内由以下5层构成:上皮细胞层、前弹力层、基质层、后弹力层与内皮细胞层。在外界对角膜施以一定压力刺激时,其所见反应与形变形式即“角膜生物力学”,角膜各层可显示出不同的角膜生物力学表现,在角膜整体厚度中,基质层为90%左右的占比,此区域对角膜生物力学特性起着关键影响,构成以致密分布在基质层间的细胞外基质(extracellular matrix, ECM)、胶原纤维(collagen fiber, CF)为主,角膜生物力学性能取决于自身基质层的CF成分与纤维分布结构[1]。而佩戴角膜接触镜、眼疾病、系统性疾病、手术与外伤等皆可导致角膜形状异常,由此对成像质量产生影响[2]。

角膜形态学分析近年来有了很大的改进,为医生提供了新的可靠的研究参数。此外,通过了解及预测角膜生物力学的整体特性,在角膜疾病的诊疗方面同样具有比较大的临床指导意义。并且近年来近视发病率呈逐年升高趋势[3],人们对近视矫正的需求越来越多,角膜屈光手术快速发展,但手术并发症仍不可避免,使得人们逐渐了解并关注角膜生物力学对该手术的重要性,相反,对角膜生物力学的深入研究也促进了人们对角膜屈光手术的进一步的思考与改进,实施术式个性化的选择[4]。本文围绕近视眼应用角膜生物力学测量,还有Corvis ST测量原理与相关指标的测定展开系统阐述。

2. 角膜生物力学测量的发展

目前,在角膜生物力学测量方面,以离体测量、在体测量为主。前者主要涉及轴向拉伸试验、角膜膨胀试验。先前由于检查设备条件有所限制,主要研究方法是离体测量,可准确地获取角膜在承受不同压力情况下的生物力学属性及其反应,但是无法获得在体角膜生物力学的相关参数。随着电子技术的不断迅猛发展,检查设备的研发,目前角膜生物力学测量已实现由离体测量向在体测量转变。

2.1. 离体测量

轴向拉伸试验的原理是将切割的角膜拉伸成条状, 进而使角膜发生变形并获得相关的参数, 这是一种最常用和最经典的离体测量方式。该实验可模拟不同压力下角膜的生物力学特性, 操作便捷简便[5]。但是由于破坏了角膜结构的完整性, 影响测量准确性, 导致误差较大[6]。角膜膨胀试验由简单离体角膜膨胀试验、离体角膜膨胀试验和离体全眼球膨胀试验组成。前两种实验虽然测量和计算相对简便, 但仍无法完全模拟角膜的活体状态, 使测量结果有一定误差。而离体全眼球膨胀试验是改进后最接近角膜生理状态下的一种测量方法, 测量结果相对精确, 但仍面临许多技术问题, 如整个操作过程中测量设备制作复杂繁琐, 数据处理分析耗时长, 无法避免巩膜对检测结果的影响等[7]。因此以上离体实验均无法真实反映在体角膜生物力学特性且无法对相关疾病提供精确的诊疗指导。

2.2. 在体测量

眼反应分析仪(ocular response analyzer, ORA)是一种非接触喷气式眼内压分析仪, 同时也是最早用于测量在体角膜生物力学的仪器, 主要采用非接触双向压平原理, 可将两次压平对应参数值记录下来[8]。包括眼内压(intraocular pressure, IOP)与体现角膜生物力学特性的参数: 角膜滞后量(corneal hysteresis, CH)和角膜阻力因子(corneal resistance factor, CRF) [9] [10] [11] [12]。这些参数中, CH 主要体现角膜黏性阻力, CRF 通常体现角膜抵抗各类外力的能力。目前有研究表明, CH 和 CRF 的测量值主要与中央角膜厚度(central corneal thickness, CCT)呈显著正相关[13]。ORA 在测量眼压时避免了 CCT 和角膜硬度的干扰, 其测量结果准确性相对较高。

但也有学者发现, ORA 的测量值皆属于经验性参数, 还没有建立测量参数同经典生物力学参数间的联系, 使得可信度下降, 不能直接阐述角膜生物力学的性能[14] [15], 因此在一定程度上限制了其临床运用。同时, 还有部分研究者对 ORA、Corvis ST 获取的相关参数间的最终关联性展开评估, 一致认为, 这两种设备的工作方式非常不同, 结果很难比较[16] [17], 主要的区别在于所使用的空气喷射: Corvis ST 具有固定力的空气喷射, 而 ORA 提供非固定力的空气喷射。与 ORA 相比, Corvis ST 作为新一代新型眼科检查设备, 不用接触测量者的角膜, 可明显减小交叉感染等风险, 同时还可获取多项测量参数, 是眼部相关疾病的辅助诊疗手段。

3. Corvis ST 的测量原理

Corvis ST 此角膜生物力学分析仪存在可视化、非接触等特点, 主要包含可视化的 Scheimpflug 技术、高速 Scheimpflug 相机和气冲印压技术, 将非接触式眼压测量仪器与超高速 Scheimpflug 技术相融合, 通过喷出恒定的空气脉冲气流, 然后以 4330 帧/秒的速率记录下角膜形变的整个动态过程, 在 31 ms 左右的采集时间内, 完成对 140 帧角膜形变图像的采集, 经系统全面分析角膜生物力学特性并得出相应参数, 同时可获取生物力学校正眼内压(bIOP), 同时通过极慢的速度把角膜形变全程的视频呈现于控制面板上。

在测量时, 将测量者的下颌放置在该仪器的下颌托上, 额头向前与额托相贴, 双眼睁开并注视前方, 喷气过程避免眨眼或闭眼, 检查系统自带质量监控确保数据的准确性。Corvis ST 检查设备内装有特定系统, 即角膜曲率计投影系统, 能自动对准角膜中央, 当瞄准对焦完成后, 测压头产生空气脉冲气流, 使角膜由凸向内凹陷压平, 此为第一阶段; 此后角膜继续向内凹陷至最高凹陷, 此为第二阶段; 角膜至最高凹陷形变回弹中产生第二次压平, 此为第三阶段[18] [19]。

4. Corvis ST 相关参数

Corvis ST 根据角膜的整个形变过程, 主要测量以下角膜生物力学参数[17] [20] [21], 见表 1。

Table 1. Corvis ST measurement of corneal biomechanical parameters**表 1.** Corvis ST 测量角膜生物力学参数

参数	解释
第一次压平长度(A1L)	角膜从初始状态至第一次压平状态时角膜水平面压平长度
第一次压平时间(A1T)	角膜从初始状态至第一次压平状态时的时间
第一次压平速率(A1V)	第一次压平状态时角膜顶点的瞬时速率, 为正值
第二次压平长度(A2L)	角膜从初始状态至第二次压平状态时角膜水平面压平长度
第二次压平时间(A2T)	角膜从初始状态至第二次压平状态时的时间
第二次压平速率(A2V)	第二压平状态时角膜顶点的瞬时速率, 为负值
最大压陷时间(HCT)	角膜从初始状态至最大压陷状态的时间
峰值距离(PD)	最大压陷状态时鼻颞两侧两个屈膝峰之间的距离
反向曲率半径(HCR)	最大压陷状态时角膜反向曲率半径
形变幅度(DA)	初始状态时角膜顶点和最大压陷状态时角膜顶点的垂直距离
形变幅度比(DAR)	最大压陷状态时角膜顶点和距顶点水平 2 mm 位置的角膜形变幅度比值
新型整合参数:	
ARTh	最薄点角膜厚度与水平方向厚度变化率比值
综合半径(IR)	角膜形变过程中顶点处曲率半径倒数的综合值
角膜硬度参数(SPA1)	角膜第一次压平时其受力与形变位移的比值
SSI	角膜材料硬度指数
CBI	圆锥角膜生物力学指数
TBI	该指数用于综合评估圆锥角膜风险
bIOP	生物力学校正眼内压

注: A1L: length of the first applanation; A1T: time reaching the first applanation; A1V: velocity at the first applanation moment; A2L: length of the second applanation; A2T: time reaching the second applanation; A2V: velocity at the second applanation moment; HCT: highest concavity time; PD: peak distance; HCR: radius at highest concavity; DA: deformation amplitude; DAR: Deformation Amplitude Ratio; ARTh: Ambrósio's relational thickness to the horizontal profile; IR: Integrated Radius; SPA1: Stiffness Parameter at First Applanation; SSI: Stress-Strain Index; CBI: Corvis biomechanical index; TBI: tomographic biomechanical index; bIOP: Biomechanically corrected IOP.

此外, Corvis ST 还可测量角膜中央点的厚度 (Central Corneal Thickness, CCT)和眼内压 (Intraocular Pressure, IOP), 同时获取的生物力学校正眼内压(bIOP) [21], 传统眼压测量受角膜厚度和生物力学影响, 校正角膜厚度、年龄和角膜生物力学对眼压影响, 更能代表真实的眼内压情况。系统自带的 QS 质量监控保证数据的精确性, 具有更高的可信度。阐明眼部疾病和角膜生物力学之间的关系, 同时了解角膜生物力学参数的变化也有助于提高我们对角膜生物力学的理解。

综上, Corvis ST 获得了多项重要的角膜生物力学参数, 同时不仅可以记录角膜形变的全过程, 并且获得的参数大部分都具有比较好的重复一致性[22] [23]。已有研究发现, 在临床 IOP 测量诊断青光眼、角膜交联术(corneal collagen crosslinking, CXL)效果评估、圆锥角膜诊断、屈光术后评估方面, 其发挥着确切作用, 极大有助于眼科临床实践[24] [25] [26]。换言之, 在测量眼压、进行屈光手术和治疗角膜疾病时, 有必要考虑到角膜生物力学。因此, 人们越来越需要一种高效、准确的方法来测量临床环境中的角膜生物力学特性。随着研究的深入, Corvis ST 的临床应用范围必将不断扩展, 更好的服务于临床, 以下将主要阐述 Corvis ST 在不同近视人群中的一些相关研究。

5. Corvis ST 与近视

5.1. 近视现状

近年来,随着电子设备的日益普及,近视发病率逐年上升[3],全球大约有三分之一的成年人是近视眼[27],根据世界卫生组织研究显示,我国的近视人群高达6亿人[28]。相关研究预估,截止2050年,近视人员在全球人口中的占比将接近一半,且有9.8%的人患有高度近视(分别有47.58亿人和9.38亿人)[29],同时约有84%的中国儿童青少年发展为近视[30],这是一个很庞大的数字,可见近视和高度近视的患病率在世界范围内显著增加,且逐渐出现低龄化趋势,同时高度近视的比例逐年上升,严重情况可导致病理性近视,出现一系列严重的并发症:如视网膜脱离、后巩膜葡萄肿、青光眼、白内障、黄斑裂孔等[31][32][33],最终会导致不可逆的视力损害,影响人们的生活质量和身心健康。通过对不同程度的近视眼进行角膜生物力学的测量,观察近视对角膜生物力学特性有何影响,对评估近视进展具有非常重要的临床应用前景。而且随着人们对视力的要求,角膜屈光手术正广泛开展,技术已成熟精湛,全球每年有超过400万人接受选择性屈光手术以进行视力矫正,尽管手术的安全性逐渐提高,保持比较稳定的状态,但一些严重并发症,如角膜扩张症仍无法完全避免[34]。因此,对计划实施屈光手术的病人开展角膜生物力学参数测量具备高度必要性,有助于术前个性化手术方式的选择,同时提高手术的安全性和可预测性[4],而且可以对角膜相关疾病进行早期筛查和诊断,避免其发生严重并发症,减轻患者经济负担。尽管已有研究使用ORA来鉴定近视眼的角膜生物力学特征,并试图发现与某些眼部特征的关联,例如屈光不正,轴向长度和角膜曲率,但结果并不一致。因此,利用Corvis ST增加对近视人群中角膜生物力学特征的了解非常重要,特别是对于屈光手术的术前评估。

5.2. ORA 与近视

目前,角膜生物力学测量在近视方面的相关研究仍多使用ORA测量角膜生物力学相关参数[35][36],CH和CRF与CCT、等效球镜度数(spherical equivalent, SE)、眼轴(axial length, AL)、角膜曲率等有关,较低的CH和CRF与较薄的CCT,较大的SE,较长的AL和较平坦的角膜曲率显著相关。目前认为高度近视表现出较低的CH和CRF的原因可能是眼轴偏长,使得巩膜牵拉扩张,眼球稳定性下降,导致角膜硬度下降。也有研究显示CH和屈光不正的相关性不显著,同时可能还会影响眼压的测量,从而增加青光眼的风险[36]。

5.3. 成人近视与 Corvis ST

目前应用Corvis ST评估近视特别是高度近视角膜生物力学的报道研究仍较少,对高度近视的角膜生物力学的认识也是有限的。2015年,Wang等[37]利用Corvis ST首次研究发现,随着近视程度的加深,高度近视的眼睛比低中度近视的眼睛角膜生物力学表现出更长的DA和更小的HCR,还有更小的角膜硬度,可见在外力刺激下近视程度高的角膜出现形变的几率更高。也有研究认同这一结论,但其相关性不大,而是认为角膜硬度与年龄呈正相关[38],因此需要更大的样本量进一步研究。同时更大的DA可能诱发对IOP测量值的低估[39],这也引发我们对高度近视与IOP关系的思考[37],提早预防高度近视相关并发症的发生。

Lee等[27]借助Corvis ST对角膜不同屈光状态时的生物力学相关指标展开分析,发现在A2V、PD与DA这3项参数上,近视病人的角膜不同于正常者的角膜:相较于正视或低中度近视,高度近视者的此3项参数明显偏高;并且以上参数均与IOP显著相关,与CCT呈弱相关,提示可能对近视眼和青光眼发病机制之间的联系具有重要意义。同时也有研究表明[40],Corvis ST的相关测量参数受IOP影响较大,

与 CCT、角膜曲率等的相关性不显著, 因此我们在分析不同程度近视的角膜生物力学特性时应重点考虑 IOP 对角膜生物力学的影响。He 等[41]对比正视眼、高度近视眼的角膜生物力学的研究结果显示, 高度近视表现出更小的 HCR (6.56 ± 0.15 mm), 更大的 DA (1.07 ± 0.01 mm), 更快的 A2V (-0.37 ± 0.01 m/s) 和更短的 A2L (1.57 ± 0.05 mm), 说明高度近视表现出更大的最大变形幅度, 表明角膜更弱, 更易变形, 验证和扩展了先前发表的关于该主题的研究。高度近视的特征是巩膜胶原纤维直径减小, 糖蛋白合成快, 胶原水解酶增加, 诱导巩膜变薄, 巩膜组织丧失, 巩膜扩张。由于角膜和巩膜都来自同一个中胚层, 因此在近视的发展和进展过程中, 角膜中可能存在类似的变化。所以说角膜生物力学可能是高度近视中巩膜机械强度的指标。此外, 有流行病学研究表明, 高度近视增加了原发性开角型青光眼的易感性, 角膜生物力学的类似改变对阐述双方之间的联系可能有所帮助, 另一项研究显示[42], 在青光眼中, 更大的最大变形幅度和更快的视野进展速度之间存在显著关系。因此, 加强对角膜生物力学的认识有利于我们了解高度近视与原发性开角型青光眼之间的关系[41]。沈如月等[43]研究中, 我们可以发现高度近视患者的角膜生物力学与 AL 和 CCT 呈正相关关系, 负向相关于 IOP 与视网膜神经纤维层(retinal nerve fiber layer, RNFL)厚度, 提示高度近视患者的角膜更容易发生形变, 且下方的 RNFL 受到严重影响, 建议高度近视患者在测量角膜生物力学时需与眼底视网膜厚度联系起来, 密切关注眼底视网膜纤维层的损害程度, 以便尽早发现并干涉 RNFL 的受累情况, 提早预防视觉功能进一步损害。在未来的研究中, 我们可以进一步扩大样本量, 进一步深化对角膜生物力学在高度近视中的作用和理解, 并将其与眼底视网膜联系起来综合分析, 获得更真实可靠的结论。

Kenia 等[20]在印度年轻人中得出与以往一致的结论, 即高度近视角膜更柔软、更易变形, 同时还利用了最新的参数分析低中度近视与高度近视的角膜在 SPA1、DAR、IR 和 CBI 等角膜生物力学预测指标方面表现相似, 无统计学差异, 有助于更全面地了解角膜变形和生物力学特性的测量。在最新的研究中, Sedaghat 等[44]基于既有研究, 对超高度近视(大于 9.00 D)的角膜生物力学属性展开分析, 认为最大压陷下相关的参数与近视的发展相关性是最强的, 其中差别最大的两个参数是 HCR 和 IR, 与 HCR 呈正相关, 与 IR 呈负相关, 表明高度近视且眼轴较长患者的角膜“更软”。为了支持这一可能的结论, 最近一项研究报告称, 高度近视患者的角膜切线模量较低, 因此角膜刚度较低[45]。但仍有必要进行进一步的研究, 以了解角膜硬度较低的角膜是否是近视发展的原因或结果。而在极端近视患者中, 由于轴向伸长导致的巩膜胶原纤维排列的改变, 有研究表明, 更硬的巩膜可以限制角膜变形, 相反, 在高度和极端近视患者中, 更柔顺或更软的巩膜可能会使角膜在最高凹陷时发生更大的位移[46]。

5.4. 儿童青少年近视与 Corvis ST

同样 Corvis ST 在未成年人人群中仍然有所研究, 对近视防控起到一定的指导意义。He 等[47]首次使用 Corvis ST 评估了中国健康儿童的角膜生物力学特性, 发现角膜生物力学特性在双侧眼中通常是对称的, CCT 和 IOP 对 Corvis ST 生物力学参数有重要影响, 而年龄、SE 和性别对儿童的 Corvis ST 测量几乎没有影响。但因本研究[47]样本量相对较小, 且未测量 AL, 所以需要在未来的研究中进一步扩大样本量来评估儿童群体的角膜生物力学。李芳等[48]应用 CorVis ST 分析不同屈光状态下的儿童角膜生物力学特性, 研究表明 SE 与 A1T 具有正相关关系, AL 与 A1L 呈正相关关系, 提示眼轴偏长及度数较高的近视儿童的角膜粘弹性可能较低, 这与以往的研究相一致, 即在成人及儿童人群中的研究均发现近视度数越高, 角膜粘弹性越低。另外, 也有研究发现, 我国青少年群体的角膜生物力学参数和屈光度存在联系, 即近视眼表现出更低的角膜硬度, 但 IOP 与屈光度不具有相关性, 不管是否校正角膜生物力学因素, 并且幼年时期的角膜形变程度可能延续至成年, 提示角膜变形能力增强、角膜硬度降低可能是近视加快的危险因素之一, 因此增加角膜生物力学强度可能对控制近视发展有一定指导作用, 为近视防控提供新的

思路和参考依据[49]。此文中还提到[49]，某种药物对控制近视进展有效，因此利用 Corvis ST 测量角膜生物力学可用于评判用药疗效与监测的指标之一。此外，角膜塑形镜已逐渐用于近视防控中，Corvis ST 也可用于角膜塑形镜的患者选择与效果评估，同样具有较好的应用前景。

6. 总结

综上所述，Corvis ST 在近视方面已有一定研究基础，但在各参数间的变化尚无统一论，且新型参数在近视方面研究较少，在未来的研究领域，是否可将新型参数与眼部的其他生物参数联合分析，仍需要进一步扩大研究来阐明近视人群中角膜生物力学的一致性，制定统一的参考标准，为近视防控、角膜屈光手术、眼疾病预防等提供实用性参考。

基金项目

云南省科技厅地方高校联合专项重点项目(202001BA070001-007)；江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ211224)。

参考文献

- [1] 薛超, 向尧齐, 王雁, 等. 人眼角膜基质生物力学特性研究[J]. 眼科新进展, 2019, 39(11): 1009-1013.
- [2] Ma, J., Wang, Y., Wei, P., *et al.* (2018) Biomechanics and Structure of the Cornea: Implications and Association with Corneal Disorders. *Survey of Ophthalmology*, **63**, 851-861. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2018.05.004>
- [3] 慕璟玉, 王雁, 浏梦, 等. 近视的病因研究新进展[J]. 国际眼科杂志, 2021, 21(10): 1746-1750.
- [4] 张耀花. 飞秒激光角膜屈光手术生物力学效应研究进展[J]. 中华实验眼科杂志, 2020, 38(6): 534-538.
- [5] Ruberti, J.W., Sinha Roy, A. and Roberts, C.J. (2011) Corneal Biomechanics and Biomaterials. *Annual Review of Biomedical Engineering*, **13**, 269-295. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-070909-105243>
- [6] Beshtawi, I.M., Akhtar, R., Hillarby, M.C., *et al.* (2013) Biomechanical Properties of Human Corneas Following Low- and High-Intensity Collagen Cross-Linking Determined with Scanning Acoustic Microscopy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **54**, 5273-5280. <https://doi.org/10.1167/iovs.13-12576>
- [7] 代智敏, 谷浩, 莫云飞, 等. 角膜生物力学的测量及临床应用进展[J]. 现代生物医学进展, 2021, 21(9): 1796-1800.
- [8] 汪倩, 王琳琳, 张妍, 等. 角膜生物力学特性的测量方法研究现状[J]. 国际眼科杂志, 2016, 16(10): 1840-1846.
- [9] Luce, D.A. (2005) Determining *in Vivo* Biomechanical Properties of the Cornea with an Ocular Response Analyzer. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, **31**, 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2004.10.044>
- [10] Zimmermann, M., Pitz, S., Schmidtman, I., *et al.* (2017) Tonographic Effect of Ocular Response Analyzer in Comparison to Goldmann Applanation Tonometry. *PLOS ONE*, **12**, e0169438. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169438>
- [11] Sullivan-Mee, M., Billingsley, S.C., Patel, A.D., *et al.* (2008) Ocular Response Analyzer in Subjects with and without Glaucoma. *Optometry and Vision Science*, **85**, 463-470. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3181784673>
- [12] Okafor, K.C. and Brandt, J.D. (2015) Measuring Intraocular Pressure. *Current Opinion in Ophthalmology*, **26**, 103-109. <https://doi.org/10.1097/ICU.0000000000000129>
- [13] Carbonaro, F., Hysi, P.G., Fahy, S.J., *et al.* (2014) Optic Disc Planimetry, Corneal Hysteresis, Central Corneal Thickness, and Intraocular Pressure as Risk Factors for Glaucoma. *American Journal of Ophthalmology*, **157**, 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2013.10.017>
- [14] Terai, N., Raikup, F., Haustein, M., *et al.* (2012) Identification of Biomechanical Properties of the Cornea: The Ocular Response Analyzer. *Current Eye Research*, **37**, 553-562. <https://doi.org/10.3109/02713683.2012.669007>
- [15] Mcmonnies, C.W. (2012) Assessing Corneal Hysteresis Using the Ocular Response Analyzer. *Optometry and Vision Science*, **89**, E343-E349. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3182417223>
- [16] Tejwani, S., Shetty, R., Kurien, M., *et al.* (2014) Biomechanics of the Cornea Evaluated by Spectral Analysis of Waveforms from Ocular Response Analyzer and Corvis-ST. *PLOS ONE*, **9**, e97591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097591>

- [17] Huseynova, T., Waring, G.O.T., Roberts, C., *et al.* (2014) Corneal Biomechanics as a Function of Intraocular Pressure and Pachymetry by Dynamic Infrared Signal and Scheimpflug Imaging Analysis in Normal Eyes. *American Journal of Ophthalmology*, **157**, 885-893. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2013.12.024>
- [18] Hon, Y. and Lam, A.K. (2013) Corneal Deformation Measurement Using Scheimpflug Noncontact Tonometry. *Optometry and Vision Science*, **90**, e1-e8. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e318279eb87>
- [19] Tian, L., Wang, D., Wu, Y., *et al.* (2016) Corneal Biomechanical Characteristics Measured by the CorVis Scheimpflug Technology in Eyes with Primary Open-Angle Glaucoma and Normal Eyes. *Acta Ophthalmologica*, **94**, e317-e324. <https://doi.org/10.1111/aos.12672>
- [20] Kenia, V.P., Kenia, R.V. and Pirdankar, O.H. (2020) Association between Corneal Biomechanical Parameters and Myopic Refractive Errors in Young Indian Individuals. *Taiwan Journal of Ophthalmology*, **10**, 45-53. https://doi.org/10.4103/tjo.tjo_15_19
- [21] Lee, H., Roberts, C.J., Kim, T.I., *et al.* (2017) Changes in Biomechanically Corrected Intraocular Pressure and Dynamic Corneal Response Parameters before and after Transepithelial Photorefractive Keratectomy and Femtosecond Laser-Assisted Laser *In Situ* Keratomileusis. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, **43**, 1495-1503. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2017.08.019>
- [22] Yang, K., Xu, L., Fan, Q., *et al.* (2019) Repeatability and Comparison of New Corvis ST Parameters in Normal and Keratoconus Eyes. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 15379. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51502-4>
- [23] 任胜卫, 杨凯丽, 徐丽妍, 等. Corvis ST 测量近视患者新型角膜生物力学参数的重复性及其影响因素[J]. 中华实验眼科杂志, 2019(12): 990-994.
- [24] Nakao, Y., Kiuchi, Y. and Okumichi, H. (2020) Evaluation of Biomechanically Corrected Intraocular Pressure Using Corvis ST and Comparison of the Corvis ST, Noncontact Tonometer, and Goldmann Applanation Tonometer in Patients with Glaucoma. *PLOS ONE*, **15**, e0238395. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238395>
- [25] Guo, L.L., Tian, L., Cao, K., *et al.* (2021) Comparison of the Morphological and Biomechanical Characteristics of Keratoconus, Forme Fruste Keratoconus, and Normal Corneas. *Seminars in Ophthalmology*, **36**, 671-678. <https://doi.org/10.1080/08820538.2021.1896752>
- [26] Hassan, Z., Modis, L., Szalai, E., *et al.* (2014) Examination of Ocular Biomechanics with a New Scheimpflug Technology after Corneal Refractive Surgery. *Contact Lens & Anterior Eye*, **37**, 337-341. <https://doi.org/10.1016/j.clae.2014.05.001>
- [27] Lee, R., Chang, R.T., Wong, I.Y., *et al.* (2016) Assessment of Corneal Biomechanical Parameters in Myopes and Emmetropes Using the Corvis ST. *Clinical and Experimental Optometry*, **99**, 157-162. <https://doi.org/10.1111/cxo.12341>
- [28] 吴雪琴, 黄芳铭. 儿童青少年如何科学防控近视[N]. 中国食品报, 2021-10-13(003).
- [29] Holden, B.A., Fricke, T.R., Wilson, D.A., *et al.* (2016) Global Prevalence of Myopia and High Myopia and Temporal Trends from 2000 through 2050. *Ophthalmology*, **123**, 1036-1042. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.01.006>
- [30] Dong, L., Kang, Y.K., Li, Y., *et al.* (2020) Prevalence and Time Trends of Myopia in Children and Adolescents in China: A Systemic Review and Meta-Analysis. *Retina*, **40**, 399-411. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000002590>
- [31] Tseng, G.L. and Chen, C.Y. (2016) Evaluation of High Myopia Complications Prevention Program in University Freshmen. *Medicine (Baltimore)*, **95**, e5093. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005093>
- [32] Wu, P.C., Huang, H.M., Yu, H.J., *et al.* (2016) Epidemiology of Myopia. *The Asia-Pacific Journal of Ophthalmology (Phila)*, **5**, 386-393. <https://doi.org/10.1097/APO.0000000000000236>
- [33] Haarman, A.E.G., Enthoven, C.A., Tideman, J.W.L., *et al.* (2020) The Complications of Myopia: A Review and Meta-Analysis. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **61**, 49. <https://doi.org/10.1167/iovs.61.4.49>
- [34] Sefat, S.M., Wiltfang, R., Bechmann, M., *et al.* (2016) Evaluation of Changes in Human Corneas after Femtosecond Laser-Assisted LASIK and Small-Incision Lenticule Extraction (SMILE) Using Non-Contact Tonometry and Ultra-High-Speed Camera (Corvis ST). *Current Eye Research*, **41**, 917-922. <https://doi.org/10.3109/02713683.2015.1082185>
- [35] Bueno-Gimeno, I., Espana-Gregori, E., Gene-Sampedro, A., *et al.* (2014) Relationship among Corneal Biomechanics, Refractive Error, and Axial Length. *Optometry and Vision Science*, **91**, 507-513. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000000231>
- [36] Del Buey, M.A., Lavilla, L., Ascaso, F.J., *et al.* (2014) Assessment of Corneal Biomechanical Properties and Intraocular Pressure in Myopic Spanish Healthy Population. *Journal of Ophthalmology*, **2014**, Article ID: 905129. <https://doi.org/10.1155/2014/905129>
- [37] Wang, J., Li, Y., Jin, Y., *et al.* (2015) Corneal Biomechanical Properties in Myopic Eyes Measured by a Dynamic Scheimpflug Analyzer. *Journal of Ophthalmology*, **2015**, Article ID: 161869. <https://doi.org/10.1155/2015/161869>

- [38] Matalia, J., Francis, M., Tejwani, S., *et al.* (2016) Role of Age and Myopia in Simultaneous Assessment of Corneal and Extraocular Tissue Stiffness by Air-Puff Applanation. *Journal of Refractive Surgery*, **32**, 486-493. <https://doi.org/10.3928/1081597X-20160512-02>
- [39] Salvat, M.L., Zeppieri, M., Tosoni, C., *et al.* (2015) Corneal Deformation Parameters Provided by the Corvis-ST Pachy-Tonometer in Healthy Subjects and Glaucoma Patients. *Journal of Glaucoma*, **24**, 568-574. <https://doi.org/10.1097/IJG.000000000000133>
- [40] Asaoka, R., Nakakura, S., Tabuchi, H., *et al.* (2015) The Relationship between Corvis ST Tonometry Measured Corneal Parameters and Intraocular Pressure, Corneal Thickness and Corneal Curvature. *PLOS ONE*, **10**, e0140385. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140385>
- [41] He, M., Wang, W., Ding, H., *et al.* (2017) Corneal Biomechanical Properties in High Myopia Measured by Dynamic Scheimpflug Imaging Technology. *Optometry and Vision Science*, **94**, 1074-1080. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001152>
- [42] Zhang, C., Tatham, A.J., Abe, R.Y., *et al.* (2016) Corneal Hysteresis and Progressive Retinal Nerve Fiber Layer Loss in Glaucoma. *American Journal of Ophthalmology*, **166**, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2016.02.034>
- [43] 沈如月, 叶聪, 梁远波, 等. Corvis ST 评估高度近视患者角膜生物力学参数及其相关因素[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2019(3): 193-199.
- [44] Sedaghat, M.R., Momeni-Moghaddam, H., Azimi, A., *et al.* (2020) Corneal Biomechanical Properties in Varying Severities of Myopia. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **8**, Article ID: 595330. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.595330>
- [45] Hon, Y., Chen, G.Z., Lu, S.H., *et al.* (2017) High Myopes Have Lower Normalised Corneal Tangent Moduli (Less Stiff Corneas) than Low Myopes. *Ophthalmic & Physiological Optics*, **37**, 42-50. <https://doi.org/10.1111/opo.12335>
- [46] Nguyen, B.A., Reilly, M.A. and Roberts, C.J. (2020) Biomechanical Contribution of the Sclera to Dynamic Corneal Response in Air-Puff Induced Deformation in Human Donor Eyes. *Experimental Eye Research*, **191**, Article ID: 107904. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2019.107904>
- [47] He, M., Ding, H., He, H., *et al.* (2017) Corneal Biomechanical Properties in Healthy Children Measured by Corneal Visualization Scheimpflug Technology. *BMC Ophthalmology*, **17**, Article No. 70. <https://doi.org/10.1186/s12886-017-0463-x>
- [48] 李芳, 钟兴武, 杨军, 等. 应用 CorVis ST 评估不同屈光状态儿童的角膜生物力学特性[J]. 第三军医大学学报, 2021, 43(8): 766-771.
- [49] 龙文, 李周越, 胡音, 等. 角膜生物力学及校正眼压与青少年屈光状态的相关性[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2020, 22(9): 652-658.