

## 光学相干弹性成像在眼科学领域的应用研究进展

赵雁之<sup>1</sup> 综述 黄国富<sup>2</sup> 审校

<sup>1</sup>南昌大学第二附属医院眼科中心,南昌 330000; <sup>2</sup>南昌大学第三附属医院眼科中心,南昌 330000

黄国富现在中山大学中山眼科中心,广州 510060

通信作者:黄国富,Email:hgf2222@sina.com

**【摘要】** 光学相干弹性成像(OCE)是近年发展起来用于获取组织生物力学性能的新兴技术,类似于光学相干断层扫描血管成像,是一种功能性光学相干断层扫描成像技术。OCE 技术通过探测眼球各组织在载荷激励下的力学响应,定量分析组织的应力-应变曲线或杨氏模量等生物力学指标,从而绘制出其弹性二维/三维图像。OCE 具有多种优势,包括非侵入性、高分辨率、实时快速和三维成像能力;此外,该技术实现了结构图像和弹性图像相融合,能够同时提供眼组织的结构和力学属性信息,为眼科疾病的诊断和发病机制研究提供了新的视角和维度。本文从 OCE 的成像原理出发,就 OCE 的技术分类和研究现状,其在眼科领域的研究进展,包括辅助角膜屈光手术设计、圆锥角膜患者筛查、角膜交联手术疗效评估、白内障诊断分级、视网膜生物力学测量和近视发病机制研究等,以及 OCE 在实现眼科临床转化中面临的挑战和机遇进行综述。

**【关键词】** 光学相干断层扫描成像; 光学相干弹性成像; 生物力学性质; 诊断技术; 眼科

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(82360215)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20221116-00533

### Advances in optical coherence elastography in ophthalmology

Zhao Yanzhi<sup>1</sup>, Huang Guofu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ophthalmology Center, The Second Affiliated Hospital of Nanchang University, Nanchang 330000, China; <sup>2</sup>Ophthalmology Center, The Third Affiliated Hospital of Nanchang University, Nanchang 330000, China

Huang Guofu is working at Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510060, China

Corresponding author: Huang Guofu, Email: hgf2222@sina.com

**【Abstract】** Optical coherence elastography (OCE) is a novel technique developed in recent years to investigate the biomechanical properties of tissues, similar to optical coherence tomography angiography, a functional version of optical coherence tomography. OCE utilizes load excitation to detect the mechanical response of ocular tissues, facilitating quantitative analysis of stress-strain curves, Young's modulus, and other biomechanical indicators. It also generates two-dimensional/three-dimensional elastic maps of the tissues. With its noninvasive, high-resolution, real-time, rapid, and three-dimensional imaging capabilities, OCE provides both structural and mechanical information about ocular tissues, opening up new dimensions in ocular disease diagnosis and pathogenesis research. This article introduced the technical classification and research status of OCE, and highlighted its research progress in ophthalmology, including its applications in assisted refractive surgery design, keratoconus patient screening, assessment of corneal cross-linking surgery efficacy, cataract diagnosis and grading, measurement of retinal biomechanics, and research into myopia pathogenesis. The challenges and opportunities for clinical translation of OCE in ophthalmology were also discussed.

**【Key words】** Optical coherence tomography; Optical coherence elastography; Biomechanics; Diagnostic techniques; Ophthalmology

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (82360215)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20221116-00533

人体组织病理性改变通常会伴随力学特征,如硬度、弹性、黏弹性等的变化,弹性成像技术通过测量组织或器官在载荷激励下的形变来获得该组织器官的生物力学信息,从而提供有价值的临床诊断信息。光学相干弹性成像(optical coherence

elastography, OCE)是一种基于宽带光谱的干涉原理获取组织生物力学性质的新兴技术。OCE 是光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)技术的延伸,类似于光学相干断层扫描血管成像,是一种功能性 OCT,可以同时提供组织的结构

和生物力学性质信息。OCE 不仅保持了 OCT 的无创、非侵入、高分辨率、实时快速三维成像的优势,而且可以实现生物组织的高精度弹性定量检测。1998 年 Schmitt<sup>[1]</sup>首次提出,OCE 技术已被用于多个学科的疾病诊断和治疗监测,包括眼科学、肿瘤学、皮肤病学和心脏病学等<sup>[2-5]</sup>,特别是在眼组织生物力学性质检测方面表现出了巨大的应用潜能。目前 OCE 技术在角膜、晶状体、视网膜等组织弹性成像方面的可行性及准确性已得到了充分验证<sup>[6-7]</sup>。本文将从 OCE 成像原理出发,介绍 OCE 检测眼组织生物力学性质的相关研究及进展,并探讨当前 OCE 技术在眼科临床转化应用中面临的挑战和未来发展方向。

## 1 OCE 技术及其分类

OCE 系统由激励部分、振动信息检测部分和组织响应部分组成(图 1)<sup>[6]</sup>,可以根据研究领域集成不同类型的硬件和分析模型。OCE 通过探测组织在机械激励下产生的位移进行弹性成像,其工作过程包括:(1)外部或内部激励 其中,外部激励包括利用平板、超声、空气脉冲、激光探针、机械探针等方式对生物组织局部施加应力,内部激励包括心跳、呼吸等方式;(2)组织响应 通过胡克定律或弹性波速与弹性模量的定量关系计算组织的生物力学性质。根据不同的激励方式和数据处理方式,OCE 技术可以分为静态/准静态 OCE 和动态 OCE,这 2 种方法各有优势,实际工作中根据不同的应用领域可以选择不同的技术方式;(3)运动检测 采用 OCT 探测组织变形或弹性波的传播过程。

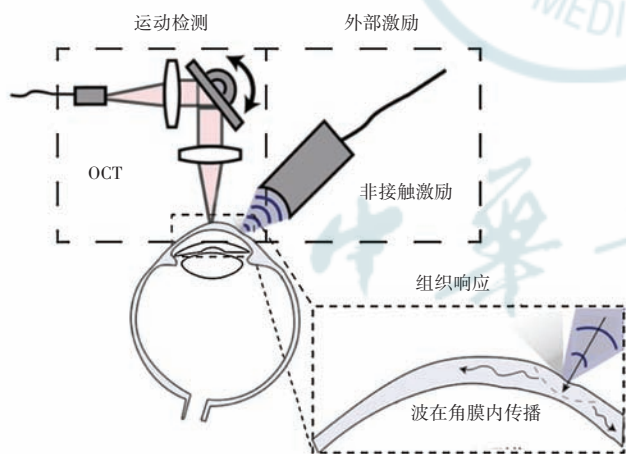


图 1 OCE 系统示意图<sup>[6]</sup> OCT:光学相干断层扫描

### 1.1 静态/准静态 OCE

静态/准静态 OCE 是早期采用的激励方法,与传统的拉伸实验原理类似,通过应力与应变的关系量化弹性。目前,静态/准静态 OCE 主要采用单轴压缩作为激励方式,工作过程包括 2 个步骤:(1)使用带有应力传感器的平板压迫组织表面,施加阶跃变化的静态/准静态负载,应力大小等于施加力与接触面积的比值;(2)OCT 连续扫描组织变形前后的图像,测量组织在负载下的应变,得到应力-应变曲线,曲线斜率即为组织的杨氏

模量。相对于动态 OCE,因为不需要考虑波的传播,采用单轴压缩方法的 OCE 技术拥有目前最高的分辨率;但由于无法精确测量组织内部应力,压缩 OCE 技术只能得到组织弹性相对分布图。值得注意的是,这一缺陷正在被逐步弥补、克服,如 Kennedy 等<sup>[8]</sup>采用一种柔性应力传感器实现了微弹性定量成像。单轴压缩方法也不是静态/准静态激励的唯一方式,Kling<sup>[9]</sup>通过改变环境压力诱导眼球形变,利用 OCT 技术检测角膜应变,获取角膜的应力分布。De Stefano 等<sup>[10]</sup>采用线性驱动的透镜与压力传感器结合实现准静态激励,采用 OCE 评估了在体人眼角膜的生物力学性质,结果发现对于同样的外部压力,角膜前基质位移小于后基质位移,表现出更硬的特性。另外,人体自主的呼吸和心跳诱导眼球运动也可以作为 OCE 技术的准静态激励方式,Lan 等<sup>[11]</sup>采用 OCE 技术评估了呼吸和心跳诱导的角膜运动对临床 OCE 测量精度和可重复性的影响,结果表明来自呼吸和心跳引起的角膜运动位移与外部激励引起的角膜位移相互独立。Nair 等<sup>[12]</sup>采用小范围眼压波动来模拟心跳引起的角膜位移,通过 OCE 技术评估了离体猪眼角膜交联前后的生物力学性质变化,结果表明基于心跳的 OCE 技术为完全被动和非接触的在体评估角膜刚度提供了新的可能。

### 1.2 动态 OCE

动态 OCE 技术包括振动位移检测、振动频率检测和波速检测 3 种方法,激励方式分别为谐波激励和瞬态激励。振动位移检测是通过向组织施加外部激励产生形变,然后采用 OCT 技术检测组织的形变量,获得组织的形变曲线来表征组织的生物力学性质。振动频率检测是通过谐波激励对组织施加连续不同频率的外部激励,当激励频率与组织固有频率相同时,就会发生共振,导致组织中的振动位移量或形变量增加。而不同刚度的组织具有不同的固有频率,因此谐波 OCE 技术可以通过测量组织的振动频谱映射组织弹性分布。基于机械波的 OCE 技术采用周期性脉冲波或准谐波(超声脉冲、空气脉冲、激光脉冲等)激励组织,产生由激励中心点向周边传播的机械波,其传播速度与组织的材料属性,如泊松比、杨氏模量、密度等直接相关,因此该技术可以通过机械波速度与组织弹性模量之间的定量关系计算组织的生物力学性质<sup>[13]</sup>。研究表明,对于角膜、巩膜这类薄壳型生物组织,其边界条件会对机械波产生明显的色散影响,采用兰姆波模型或修正的瑞利兰姆波模型可以更精确地量化其生物力学性质<sup>[14-16]</sup>。而对于晶状体这类近似均匀的组织,采用表面瑞利波模型可以更精确地量化其生物力学性质<sup>[17]</sup>。此外,用于动态 OCE 的外部激励方式也是目前的研究热点,不同激励方式所激发出的机械波带宽和振幅各不相同,如空气脉冲和机械探针在角膜中激发出的机械波带宽一般在 1 kHz 以内<sup>[18-19]</sup>。而角膜的机械波带宽一般约为 2 kHz,因此目前更多的采用超声脉冲方法来激励机械波,该方法具有非接触、非侵入、可聚焦、能量可控等优势<sup>[20]</sup>。最近的研究提出采用空气耦合超声换能器作为激励的 OCE 系统,可以在空气介质中完成角膜组织的弹性成像检测,不需要其他耦合介质,大大减少了 OCE 技术的操作复杂度<sup>[21-23]</sup>。

振动和波速测量都依赖于 OCE 系统的快速扫描和准确计



时。谐波 OCE 的成像速度由奈奎斯特采样定理和成像范围决定。基于波的 OCE 测量包括 2 个步骤: (1) 波速测量 相敏 OCT 探测组织受激前后的相位信号, 获得沿时间分布的位移图像, 通过传播距离与时间延迟的比率来计算波速; (2) 组织弹性重构 建立适当的分析模型解析波的行为(速度、色散、衰减等)。波在组织中的传播速度不仅与材料特性有关, 组织结构、边界条件、各向异性和激励类型等也均会影响波的传播, 因此, 需要建立精准的生物力学模型分析波速, 计算组织弹性, 如横向各向同性模型或混响模型等<sup>[24]</sup>。

## 2 OCE 技术在眼科的应用

眼科被认为是 OCE 有可能实现临床转化的医学领域之一<sup>[25]</sup>。人眼是复杂的光学系统, 在眼球运动和眼压波动等复杂动态生理环境下, 眼球各部分组织结构的生物力学性质对维持正常屈光功能至关重要, 因此眼组织生物力学性质测量对于眼部疾病的诊断、治疗监测及发病机制研究具有重要意义。OCE 技术可以同时获取眼组织结构图像和弹性图像, 直接建立起结构信息和弹性信息之间的联系, 为眼科疾病诊断和鉴别诊断提供新的客观依据。例如采用非接触的激励方式可以对角膜、晶状体、视网膜和视神经进行非侵入弹性成像, 用于筛查角膜屈光术前易发生角膜扩张的患者、圆锥角膜(keratoconus, KC)的早期诊断及眼压测量, 还可以为研究晶状体的调节机制、年龄相关性黄斑变性及早光眼视神经萎缩的进展等提供生物力学信息。

### 2.1 角膜生物力学测量

角膜作为一种非线性的弹性组织, 其生物力学性质是维持形态的关键因素, 间接决定了角膜的屈光力。早期 OCE 使用前房角镜压迫角膜, 采用散斑跟踪和二维互相关算法计算位移<sup>[26]</sup>。但由于无法提供稳定可靠的弹性模量定量计算结果, 这种方法在眼科领域并未得到广泛发展。目前, 基于机械波的 OCE 技术代替压缩 OCE 成为主要发展方向, 因为其不仅具有亚微米量级的空间分辨率, 还具有非侵入、非接触、定量量化的优势, 能够对角膜的亚层结构进行高精度弹性成像, 还能对角膜各向异性的弹性参数进行分区域和逐深度表征。Wang 等<sup>[27]</sup>通过量化兰姆波的相速度, 定量地计算角膜不同深度的弹性,

实现了角膜弹性的深度分辨; 且研究发现角膜弹性沿深度下降, 与传统机械拉伸研究结果一致。为了更精确地量化角膜各层的生物力学性质, Zvietcovich 等<sup>[28]</sup>利用 1 个环形振荡器激励角膜形成稳定的剪切波混响场, 并沿角膜轴向方向分析每个深度位置的混响剪切波场, 绘制了从角膜上皮到内皮的弹性分布图(图 2)。

角膜屈光手术通过去除角膜组织, 增加屈光力的同时降低了角膜生物力学性能。角膜扩张是由于生物力学性能失代偿导致的严重并发症。由于缺乏有效评估角膜生物力学性质的临床设备, 角膜扩张仍是目前屈光手术无法避免的并发症。Ramier 等<sup>[29]</sup>使用 OCE 对人眼角膜进行在体弹性成像, 并绘制了 12 名健康受试者的角膜高精度和高空间分辨率的弹性图像。术前角膜生物力学特性的定量评估对避免术后角膜扩张具有重要意义。目前屈光手术方案设计是基于人群角膜力学属性的平均值, 未考虑个体化差异。OCE 可以生成个体化的角膜力学特征图像, 用于指导屈光手术设计, 有利于提高术后视力的可预测性、长期稳定性及视觉质量。

KC 是一种非炎症性角膜病变, 其特征为进行性角膜变薄和膨出, 使其呈圆锥形状, 并导致高度不规则散光。角膜形态的改变被认为是继发于角膜生物力学性质异常<sup>[30]</sup>。已有临床研究表明, 角膜生物力学性质减弱早于其地形图改变<sup>[31]</sup>, 对角膜生物力学性质进行检测可以有效提高 KC 患者筛查和早期诊断的敏感性和特异性。De Stefano 等<sup>[32]</sup>使用 OCE 评估了健康受试者和 KC 患者之间角膜生物力学分布的差异, 结果表明 KC 患者角膜变薄区域刚度梯度减弱, 而这种局部差异会诱导角膜生物力学特性空间分布失代偿, 被认为是有可能导致 KC 进展的关键因素<sup>[30]</sup>。本课题组在之前的工作中使用声辐射力 OCE 技术逐点测量了人眼角膜圆锥区、过渡区域和周边角膜的杨氏模量, 发现角膜生物力学性质弱化主要位于圆锥区域, 周边角膜和健康人眼的角膜弹性模量无明显差异<sup>[33]</sup>, 这表明 OCE 技术可以精确定位角膜局部生物力学性质的改变, 有利于 KC 患者的早期筛查, 干预 KC 的病变进展。

角膜胶原交联手术(corneal crosslinking, CXL)可通过提高角膜基质的硬度和强度控制 KC 进展。不同 KC 患者的角膜生物力学性质和病变特征存在个体差异, 因此临床上需要采取不

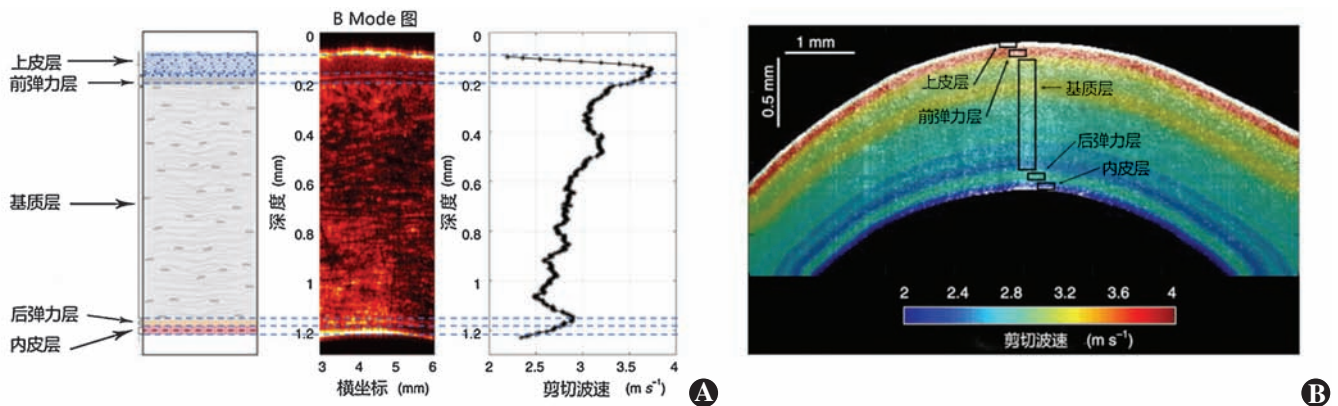


图 2 利用 OCE 对猪角膜各层进行弹性表征 A: 与角膜结构相关的剪切波速曲线 B: 二维角膜结构和弹性图像融合<sup>[28]</sup>

同的 CXL 手术方案,而 OCE 技术获取的角膜区域性生物力学性质参数可以用于指导术前定制个性化 CXL 手术方案。Zhou 等<sup>[34]</sup>使用微空气脉冲 OCE 比较了 3 种 CXL 方案引起的角膜杨氏模量变化,结果表明辐射总能量保持不变,相比于 9 mW/10 min 和 18 mW/5 min 的交联方案,3 mW/30 min 的交联方案处理后,角膜杨氏模量增加最多,交联效果最好。另外,CXL 术中环境氧气浓度和患者的注意力等不可控因素也会影响治疗效果,OCE 具有实时测量、动态反应角膜弹性变化的优势,对于监测术中角膜反应具有重要意义。这一优势同样可以用于评估术后治疗效果,不同于具有时间依赖性的角膜地形图检测,OCE 可以更快获取 CXL 术后角膜生物力学性质改变结果。Ferguson 等<sup>[35]</sup>采用 OCE 技术评估了患者接受 CXL 治疗前后生物力学特性的差异,发现 CXL 主要增加了角膜前基质刚度,CXL 术前与术后 3 个月的角膜生物力学性质差异超过 20%。

## 2.2 晶状体生物力学测量

晶状体位于眼球内部,OCE 具有无创、非接触的优势,有利于晶状体生物力学的研究。白内障的严重程度与硬度呈正相关,Zhang 等<sup>[36]</sup>通过低温诱导构建了白内障模型,并使用基于波的 OCE 评估晶状体硬度和透明度的相关性,发现当冷性白内障形成时,晶状体中弹性波速度增加,相应的刚度增加;当温度升高时,晶状体混浊消失,与新鲜晶状体刚度无明显差异。因此,OCE 可以通过评估晶状体的生物力学性质,用于临床白内障的诊断和分级。进一步地,采用 OCE 技术监测晶状体生物力学性质改变还可以为研究白内障的发病机制提供重要信息。氧化损伤被认为是导致年龄相关性白内障的重要原因,Zhang 等<sup>[37]</sup>应用 OCE 观察到氧化损伤诱导白内障形成过程中晶状体硬度增加,当使用还原剂阻断晶状体氧化进程后,不仅可以恢复晶状体透明度,还可以恢复弹性,这表明 OCE 技术检测晶状体生物力学性质对于开发治疗白内障和老视的药物具有重要意义。

人眼通过改变晶状体的形状调节屈光力,该过程主要依靠睫状体的收缩和松弛牵拉晶状体囊膜产生压力,因此晶状体弹性决定了其形变幅度。随年龄增加,晶状体逐渐变硬,形变能力逐步丧失,这是老视进展的重要原因。Wu 等<sup>[38]</sup>使用 OCE 原位测量了不同年龄阶段兔眼晶状体的杨氏模量,发现随着年龄的增长,晶状体的杨氏模量显著增加。另外,晶状体囊膜在实

现晶状体动态聚焦和维持晶状体弹性方面也起着重要作用,Mekonnen 等<sup>[39]</sup>利用 OCE 评估了晶状体囊膜完整性对晶状体生物力学特性的影响,结果发现晶状体囊膜撕裂会导致晶状体杨氏模量和剪切黏度大幅下降。因此,采用 OCE 技术检测晶状体囊膜的生物力学性质对于理解晶状体和晶状体囊膜的内在功能关系具有重要意义。

## 2.3 视网膜生物力学性质测量

视网膜生物力学性质会随着疾病的发生而改变。研究表明,视网膜病变往往会先出现生物力学性质异常,然后继发结构的改变,因此 OCE 可以提供比 OCT 更早期的诊断信息,如年龄相关性黄斑变性、视网膜色素变性和高度近视视网膜病变等。然而,受限于视网膜在眼球中的位置,很难对其进行有效的激励,OCE 对视网膜的研究在近几年才取得一定进展。He 等<sup>[40]</sup>利用声辐射力 OCE 实现了在体兔眼视网膜弹性成像,其展示了与解剖结构相对应的分层弹性图,结果表明视网膜弹性沿深度增加(图 3)。Li 等<sup>[41]</sup>基于 OCE 技术评估了商业视网膜假体电极的安全性,结果表明视网膜电极植入后视网膜各层弹性增加,但幅度非常小,不会影响视网膜的生物力学性能,这表明 OCE 具有评估患者长期使用假体电极安全性的潜力。

## 2.4 巩膜生物力学测量

巩膜是一种弹性结缔组织,在维持眼球外形方面起关键作用。近视眼轴增长、青光眼视神经损伤和视网膜脱离均与巩膜生物力学性质密切相关。巩膜结构复杂,生物力学特性表现为各向异性。Bronte-Ciriza 等<sup>[42]</sup>基于空气脉冲激励的 OCE 技术发现不同部位的巩膜弹性模量存在差异,赤道下部最小,为  $(1.84 \pm 0.30)$  Mpa,赤道颞侧最大,为  $(6.04 \pm 2.11)$  MPa;并且,角膜在应力状态下的形变量与巩膜的力学性能相关。进一步地,Zvietcovich 等<sup>[43]</sup>控制眼压变化,使用 OCE 监测角膜、角膜缘以及巩膜的弹性模量变化,发现在生理眼压下,角膜缘弹性模量位于角膜和巩膜之间,但是随着眼压的增加,角膜缘弹性模量超过了巩膜,这表明角膜缘具有足够的结构灵活性,可以在眼压变化的过程中稳定眼前节的形态结构。Vinas-Pena 等<sup>[44]</sup>使用 OCE 评估了巩膜胶原交联手术后不同区域巩膜生物力学性质的改变,发现后巩膜对交联手术的治疗更加敏感,其硬度增加更多。这表明 OCE 技术测量结果对于研究巩膜胶原交联术控制近视进展具有重要意义。

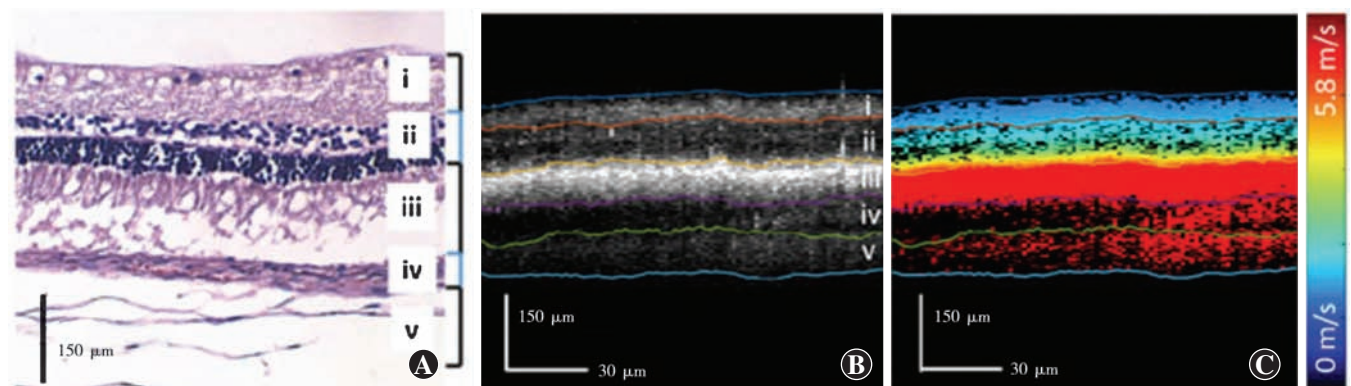


图 3 在体评估兔眼视网膜各层弹性 A: 视网膜组织结构 B: OCT 结构图 C: 与结构对应的剪切波速度映射图<sup>[40]</sup>



### 3 小结与展望

OCE 具有无损、非侵入、高空间分辨率和实时成像等特点,是一种可以应用于眼科的弹性检测技术。得益于眼组织的光学特性,OCE 具有足够的成像深度,目前已被广泛应用于眼科疾病研究。本文综述了目前 OCE 在眼科领域的主要研究方向,包括生物力学对角膜屈光手术的影响、KC 的诊断和治疗、晶状体的调节机制、视网膜疾病治疗监测和近视发病机制研究等。OCE 在眼组织生物力学研究领域表现出巨大的优势。但作为一项新的技术,一些因素限制阻碍了 OCE 的临床转化,例如激励的安全性、成像速度和力学参数的解析等。过去 20 年中,OCT 通过提供视网膜高分辨率的结构图像,改变了眼底疾病的诊断和治疗理念,作为 OCT 技术的延伸,OCE 被认为是未来十年十分有可能实现临床转化的新型功能型 OCT 技术。当前,眼科 OCE 技术已经进入前瞻性临床试验中,相信随着技术的不断更新和完善,将很快进入临床,成为新的眼科临床辅助诊断设备。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参考文献

- [1] Schmitt J. OCT elastography: imaging microscopic deformation and strain of tissue[J]. *Opt Express*, 1998, 3(6): 199-211. DOI: 10.1364/oe.3.000199.
- [2] Zvietcovich F, Nair A, Singh M, et al. *In vivo* assessment of corneal biomechanics under a localized cross-linking treatment using confocal air-coupled optical coherence elastography[J]. *Biomed Opt Express*, 2022, 13(5): 2644-2654. DOI: 10.1364/BOE.456186.
- [3] Gubarkova EV, Sovetsky AA, Vorontsov DA, et al. Compression optical coherence elastography versus strain ultrasound elastography for breast cancer detection and differentiation: pilot study[J]. *Biomed Opt Express*, 2022, 13(5): 2859-2881. DOI: 10.1364/BOE.451059.
- [4] Kalra A, Lowe A. An overview of factors affecting the skins young's modulus[J/OL]. *J Aging Sci*, 2016, 4: 2 [2023-03-10]. [https://www.researchgate.net/publication/307613863\\_An\\_Overview\\_of\\_Factors\\_Affecting\\_the\\_Skins\\_Youngs\\_Modulus](https://www.researchgate.net/publication/307613863_An_Overview_of_Factors_Affecting_the_Skins_Youngs_Modulus). DOI: 10.4172/2329-8847.1000156.
- [5] Bays HE, Khera A, Blaha MJ, et al. Ten things to know about ten imaging studies: a preventive cardiology perspective ("ASPC top ten imaging") [J/OL]. *Am J Prev Cardiol*, 2021, 6: 100176 [2023-03-10]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34327499/>. DOI: 10.1016/j.ajpc.2021.100176.
- [6] Kirby MA, Pelivanov I, Song S, et al. Optical coherence elastography in ophthalmology[J]. *J Biomed Opt*, 2017, 22(12): 1-28. DOI: 10.1117/1.JBO.22.12.121720.
- [7] Larin KV, Sampson DD. Optical coherence elastography-OCT at work in tissue biomechanics[Invited][J]. *Biomed Opt Express*, 2017, 8(2): 1172-1202. DOI: 10.1364/BOE.8.001172.
- [8] Kennedy KM, Chin L, McLaughlin RA, et al. Quantitative micro-elastography: imaging of tissue elasticity using compression optical coherence elastography[J/OL]. *Sci Rep*, 2015, 5: 15538 [2023-03-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26503225/>. DOI: 10.1038/srep15538.
- [9] Kling S. Optical coherence elastography by ambient pressure modulation for high-resolution strain mapping applied to patterned cross-linking[J/OL]. *J R Soc Interface*, 2020, 17(162): 20190786 [2023-03-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31964268/>. DOI: 10.1098/rsif.2019.0786.
- [10] De Stefano VS, Ford MR, Seven I, et al. Live human assessment of depth-dependent corneal displacements with swept-source optical coherence elastography[J/OL]. *PLoS One*, 2018, 13(12): e0209480 [2023-03-12]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30592752/>. DOI: 10.1371/journal.pone.0209480.
- [11] Lan G, Gu B, Larin KV, et al. Clinical corneal optical coherence elastography measurement precision: effect of heartbeat and respiration[J/OL]. *Transl Vis Sci Technol*, 2020, 9(5): 3 [2023-03-12]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32821475/>. DOI: 10.1167/tvst.9.5.3.
- [12] Nair A, Singh M, Aglyamov SR, et al. Heartbeat OCE: corneal biomechanical response to simulated heartbeat pulsation measured by optical coherence elastography[J]. *J Biomed Opt*, 2020, 25(5): 1-9. DOI: 10.1117/1.JBO.25.5.055001.
- [13] Liang X, Boppart SA. Biomechanical properties of *in vivo* human skin from dynamic optical coherence elastography[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2010, 57(4): 953-959. DOI: 10.1109/TBME.2009.2033464.
- [14] Zhu Y, Zhao Y, Zhang Y, et al. *In vivo* evaluation of the effects of SMILE with different amounts of stromal ablation on corneal biomechanics by optical coherence elastography[J/OL]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 13(1): 30 [2023-03-13]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36611322/>. DOI: 10.3390/diagnostics13010030.
- [15] Han Z, Aglyamov SR, Li J, et al. Quantitative assessment of corneal viscoelasticity using optical coherence elastography and a modified Rayleigh-Lamb equation[J/OL]. *J Biomed Opt*, 2015, 20(2): 20501 [2023-03-14]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25649624/>. DOI: 10.1117/1.JBO.20.2.020501.
- [16] Han Z, Li J, Singh M, et al. Optical coherence elastography assessment of corneal viscoelasticity with a modified Rayleigh-Lamb wave model[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2017, 66: 87-94. DOI: 10.1016/j.jmbm.2016.11.004.
- [17] Li Y, Zhu J, Chen JJ, et al. Simultaneously imaging and quantifying *in vivo* mechanical properties of crystalline lens and cornea using optical coherence elastography with acoustic radiation force excitation[J/OL]. *APL Photonics*, 2019, 4(10): 106104 [2023-03-15]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32309636/>. DOI: 10.1063/1.5118258.
- [18] Ramier A, Tavakol B, Yun SH. Measuring mechanical wave speed, dispersion, and viscoelastic modulus of the cornea using optical coherence elastography[J/OL]. *Opt Express*, 2019, 27(12): 16635-16649 [2023-03-15]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31252887/>. DOI: 10.1364/OE.27.016635.
- [19] Wang S, Larin KV. Shear wave imaging optical coherence tomography (SWI-OCT) for ocular tissue biomechanics[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(1): 41-44. DOI: 10.1364/OL.39.000041.
- [20] Wu C, Aglyamov SR, Han Z, et al. Assessing the biomechanical properties of the porcine crystalline lens as a function of intraocular pressure with optical coherence elastography[J]. *Biomed Opt Express*, 2018, 9(12): 6455-6466. DOI: 10.1364/BOE.9.006455.
- [21] Ambroziński Ł, Pelivanov I, Song S, et al. Air-coupled acoustic radiation force for non-contact generation of broadband mechanical waves in soft media[J/OL]. *Appl Phys Lett*, 2016, 109(4): 043701 [2023-03-15]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27493276/>. DOI: 10.1063/1.4959827.
- [22] Jin Z, Khazaeinezhad R, Zhu J, et al. *In-vivo* 3D corneal elasticity using air-coupled ultrasound optical coherence elastography[J]. *Biomed Opt Express*, 2019, 10(12): 6272-6285. DOI: 10.1364/BOE.10.006272.
- [23] Zvietcovich F, Nair A, Ambekar YS, et al. Confocal air-coupled ultrasonic optical coherence elastography probe for quantitative biomechanics[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(23): 6567-6570. DOI: 10.1364/OL.410593.
- [24] Pitre JJ Jr, Kirby MA, Li DS, et al. Nearly-incompressible transverse isotropy (NITI) of cornea elasticity: model and experiments with acoustic micro-tapping OCE[J/OL]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 12983 [2023-03-15]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32737363/>. DOI: 10.1038/s41598-020-69909-9.
- [25] Zvietcovich F, Larin KV. Wave-based optical coherence elastography: the 10-year perspective[J/OL]. *Prog Biomed Eng (Bristol)*, 2022, 4(1): 012007 [2023-03-16]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35187403/>. DOI: 10.1088/2516-1091/ac4512.
- [26] Ford MR, Dupps WJ Jr, Rollins AM, et al. Method for optical coherence elastography of the cornea[J/OL]. *J Biomed Opt*, 2011, 16(1): 016005 [2023-03-16]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21280911/>. DOI: 10.1117/1.3526701.
- [27] Wang S, Larin KV. Noncontact depth-resolved micro-scale optical



- coherence elastography of the cornea[J]. *Biomed Opt Express*, 2014, 5(11): 3807-3821. DOI:10.1364/BOE.5.003807.
- [28] Zvietovich F, Pongchalee P, Meemon P, et al. Reverberant 3D optical coherence elastography maps the elasticity of individual corneal layers [J/OL]. *Nat Commun*, 2019, 10(1): 4895 [2023-03-16]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31653846/>. DOI: 10.1038/s41467-019-12803-4.
- [29] Ramier A, Eltony AM, Chen Y, et al. *In vivo* measurement of shear modulus of the human cornea using optical coherence elastography [J/OL]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 17366 [2023-03-16]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33060714/>. DOI: 10.1038/s41598-020-74383-4.
- [30] Roberts CJ, Dupps WJ Jr. Biomechanics of corneal ectasia and biomechanical treatments[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2014, 40(6): 991-998. DOI: 10.1016/j.jcrs.2014.04.013.
- [31] Bao F, Geraghty B, Wang Q, et al. Consideration of corneal biomechanics in the diagnosis and management of keratoconus: is it important? [J/OL]. *Eye Vis (Lond)*, 2016, 3: 18 [2023-03-16]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27382596/>. DOI: 10.1186/s40662-016-0048-4.
- [32] De Stefano VS, Ford MR, Seven I, et al. Depth-dependent corneal biomechanical properties in normal and keratoconic subjects by optical coherence elastography[J/OL]. *Transl Vis Sci Technol*, 2020, 9(7): 4 [2023-03-16]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32832211/>. DOI: 10.1167/tvst.9.7.4.
- [33] Zhao Y, Yang H, Li Y, et al. Quantitative assessment of biomechanical properties of the human keratoconus cornea using acoustic radiation force optical coherence elastography [J/OL]. *Transl Vis Sci Technol*, 2022, 11(6): 4 [2023-03-17]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35666497/>. DOI: 10.1167/tvst.11.6.4.
- [34] Zhou Y, Wang Y, Shen M, et al. *In vivo* evaluation of corneal biomechanical properties by optical coherence elastography at different cross-linking irradiances [J]. *J Biomed Opt*, 2019, 24(10): 1-7. DOI: 10.1117/1.JBO.24.10.105001.
- [35] Ferguson TJ, Singuri S, Jalaj S, et al. Depth-resolved corneal biomechanical changes measured via optical coherence elastography following corneal crosslinking [J/OL]. *Transl Vis Sci Technol*, 2021, 10(5): 7 [2023-03-17]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34313710/>. DOI: 10.1167/tvst.10.5.7.
- [36] Zhang H, Wu C, Singh M, et al. Optical coherence elastography of cold cataract in porcine lens [J]. *J Biomed Opt*, 2019, 24(3): 1-7. DOI: 10.1117/1.JBO.24.3.036004.
- [37] Zhang H, Singh M, Nair A, et al. Elasticity changes in the crystalline lens during oxidative damage and the antioxidant effect of alpha-lipoic acid measured by optical coherence elastography; 6 [J/OL]. *Photonics*, 2021, 8(6): 207 [2023-03-17]. <https://www.mdpi.com/2304-6732/8/6/207>. DOI: 10.3390/photonics8060207.
- [38] Wu C, Han Z, Wang S, et al. Assessing age-related changes in the biomechanical properties of rabbit lens using a coaligned ultrasound and optical coherence elastography system [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015, 56(2): 1292-1300. DOI: 10.1167/iops.14-15654.
- [39] Mekonnen T, Zevallos-Delgado C, Zhang H, et al. The lens capsule significantly affects the viscoelastic properties of the lens as quantified by optical coherence elastography [J/OL]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11: 1134086 [2023-08-25]. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2023.1134086>. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1134086.
- [40] He Y, Qu Y, Zhu J, et al. Confocal shear wave acoustic radiation force optical coherence elastography for imaging and quantification of the *in vivo* posterior eye [J/OL]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2019, 25(1): 10.1109/jstqe.2018.2834435 [2023-03-17]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32042240/>. DOI: 10.1109/jstqe.2018.2834435.
- [41] Li R, Du Z, Qian X, et al. High resolution optical coherence elastography of retina under prosthetic electrode [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(3): 918-927. DOI: 10.21037/qims-20-1137.
- [42] Bronte-Ciriza D, Birkenfeld JS, de la Hoz A, et al. Estimation of scleral mechanical properties from air-puff optical coherence tomography [J]. *Biomed Opt Express*, 2021, 12(10): 6341-6359. DOI: 10.1364/BOE.437981.
- [43] Zvietovich F, Nair A, Singh M, et al. Dynamic optical coherence elastography of the anterior eye: understanding the biomechanics of the limbus [J/OL]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2020, 61(13): 7 [2023-08-25]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33141893/>. DOI: 10.1167/iops.61.13.7.
- [44] Vinas-Pena M, Feng X, Li GY, et al. *In situ* measurement of the stiffness increase in the posterior sclera after UV-riboflavin crosslinking by optical coherence elastography [J]. *Biomed Opt Express*, 2022, 13(10): 5434-5446. DOI: 10.1364/BOE.463600.

(收稿日期:2023-05-10 修回日期:2023-08-26)

(本文编辑:刘艳 施晓萌)

读者·作者·编者

## 本刊对基金项目的证明和著录要求

文稿所涉及的课题如为国家级、部级、省级等基金资助项目,请分别用中英文表述并分别列于文章中英文摘要关键词之下,“基金项目:”进行标识,并注明基金项目名称,并在圆括号内注明基金项目编号。基金项目名称应按国家有关部门规定的正式名称填写,多个基金资助的项目请全部列出,按资助机构的等级顺序排列,并以“;”隔开。如:基金项目:国家自然科学基金项目(30271269);国家重点基础研究发展规划(973计划)(2013CB532002);Fund program: National Natural Science Foundation of China(30271269);National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB532002)。获得基金项目资助的论文投稿时请提供基金项目资助证明的复印件或扫描后发至编辑部信箱。

## 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和中国中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊,月刊,96面,每月10日出版,每期定价26元,邮发代号:36-13,国内外公开发行,欢迎到各地邮局订阅或直接与本刊编辑部联系订购。联系电话:0371-87160872。

(本刊编辑部)