

文章编号: 1004-7220(2026)01-0041-07

# 眼生物力学 2025 年度研究进展

杨舒, 王雁

(南开大学附属眼科医院; 天津医科大学 眼科临床学院; 天津市眼科医院; 天津市眼科学与视觉科学重点实验室;  
天津市眼科研究所; 南开大学眼科学研究院, 天津 300020)

**摘要:** 眼生物力学作为揭示眼部疾病生理病理力学作用机制的新兴领域, 正日益受到关注。本文简要概述了2025年一系列新兴眼生物力学测量技术及其研究进展, 以实现眼组织力学特性的多维度精准量化, 同时展现并强调了人工智能与多模态融合作为“加速器”助力临床理解眼生物力学的作用。此外, 本文重点回顾了2025年度力学因素相关的若干焦点, 例如力学在近视、圆锥角膜、青光眼等主要眼病发生发展中的生物学机制, 为寻找新的干预靶点提供角度和思路。未来该领域有望实现从“测量力”到“调控力”的全方位认知, 为眼科相关疾病提供全新的解决方案。

**关键词:** 眼生物力学; 生物力学测量技术; 人工智能; 近视; 青光眼

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2026.01.008

## Research Progress of Ocular Biomechanics in 2025

YANG Shu, WANG Yan

(Nankai University Affiliated Eye Hospital; Clinical College of Ophthalmology, Tianjin Medical University; Tianjin Eye Hospital; Tianjin Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science; Tianjin Eye Institute; Nankai University Eye Institute, Tianjin 300020, China)

**Abstract:** Ocular biomechanics, an increasingly vital field for elucidating the pathophysiological mechanisms of eye diseases, is garnering increasing attention. This review concisely summarizes a series of novel ocular biomechanical measurement techniques and their research advances in 2025, which enable multi-dimensional and precise quantification of ocular tissue mechanical properties. It also demonstrates and emphasizes how the integration of artificial intelligence with multi-modal data serves as an ‘accelerator’, enhancing the clinical understanding of ocular biomechanics. Furthermore, the review highlights recent key points in exploring the role of mechanical factors in the pathogenesis of major ocular diseases, including myopia, keratoconus, and glaucoma, offering new perspectives for identifying novel interventional targets. In the future, it is expected to evolve from ‘measuring forces’ to ‘modulating forces’, thereby paving the way for innovative therapeutic strategies in ophthalmology.

**Key words:** ocular biomechanics; biomechanical measurement techniques; artificial intelligence; myopia; glaucoma

收稿日期: 2025-11-29; 修回日期: 2025-12-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2404502), 国家自然科学基金面上项目(82271118), 天津市医学重点建设学科建设项目(TJYXZDXK-3-004A-3)

通信作者: 王雁, 教授, E-mail: wangyan7143@vip.sina.com

随着力学与医学的深度交叉融合,生物力学在眼科疾病发生发展过程中的重要作用逐渐显现,眼生物力学研究也日益受到关注。该领域的前期发展多聚焦于测量技术的研发,以改善技术相对短缺的现状,而目前一批具有革命性的高精度眼生物力学测量技术正不断涌现。加之近年来人工智能(artificial intelligence, AI)与多模态技术的深度融合,眼生物力学研究正在从现象描述向机制解析转变。这一转变不仅使研究人员能够更精准地进行疾病的诊断与分类,更能深入探究疾病发生发展的内在力学机制,从而为研究眼球各组织在生理与病理状态下的生物力学特性,及其与细胞行为、疾病发生发展的动态交互过程提供新的可能。本文将简要概述上述领域在2025年的最新研究进展。

## 1 眼生物力学新兴测量技术

眼生物力学研究的测量技术正经历着从宏观整体到微观局部、从组织到细胞的深刻转变。离体测量方面,以拉伸试验和膨胀试验为代表的传统技术,虽技术成熟、模型完善、易于解读,但其空间分辨率低、制样形态要求严格,仅能衡量组织整体的宏观力学,无法满足当前实验室解析角膜、巩膜等高度异质性眼组织的研究需求。在体测量方面,2005年眼反应分析仪(ocular response analyzer, ORA)和2010年可视化角膜生物力学分析仪(Corvis ST, CST)的相继问世,首次使临床医生能够在诊室中无创、定量地评估患者角膜的生物力学特性,显著推动了圆锥角膜筛查、屈光手术术前风险评估及青光眼诊断等领域的发展,无疑是眼生物力学从实验室走向临床的关键里程碑。然而,随着生物力学在多种眼病诊疗中的重要性被发现,上述两类设备的局限性也日益凸显:两者均基于空气脉冲激励角膜,并分别通过光电系统或Scheimpflug成像捕捉角膜的整体变形响应,本质上反映角膜的整体生物力学,缺乏局部特异性的空间分布信息,并易受眼内压(intraocular pressure, IOP)、角膜厚度等因素的干扰。目前以原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)为代表的新型离体测量技术和以布里渊显微镜(Brillouin microscopy, BM)、弹性成像技术为代表的新型活体测量方法被提出,以求更全面地满足逐渐增长的眼生物力学测量相关的实验

室研究和临床需求。

### 1.1 原子力显微镜

AFM的核心原理在于通过悬臂梁偏转或振动频率变化探测其微观探针与物质表面间极微弱的原子间相互作用力(如范德华力),实现对样品表面纳米级形貌与局部力学性质(包括弹性模量与黏附力)的定量成像。在组织层面上,科研人员借助AFM对角膜、巩膜局部力学性质进行纳米级精准量化,并以此绘制出组织力学空间异质化的分布图,促进了组织“成分-结构-力学”因果链的建立<sup>[1-3]</sup>。在细胞层面上,Lionadi等<sup>[4]</sup>使用AFM成功地描绘了角膜上皮细胞在分裂过程中动态、多维的力学图谱;Geng等<sup>[5]</sup>则揭示出不同近视程度下角膜基质细胞的力学状态,使研究人员能够直接从细胞的力学状态探索力学调控的源头机制。尽管AFM存在测量耗时、数据解析复杂,且难以模拟在体IOP对组织预应力的影响等局限,目前依然是实验室中离体条件下直接表征眼科组织及单细胞内在物理特性的关键工具,在眼生物力学基础研究中具有不可替代的价值。

### 1.2 布里渊光学显微镜

BM是一种基于布里渊散射原理的高分辨、无标记、无接触的全光学成像技术,通过检测光与组织中内在声波相互作用产生的多普勒频移,可对生物组织的纵向弹性模量进行空间映射,直接评估组织的内在材料特性。2025年度,商用BOSS布里渊光学扫描系统已被用于对临床正常眼、圆锥角膜、角膜屈光术后和交联术后的角膜生物力学测量,表现出独特的局部生物力学空间分辨能力,不受IOP和角膜厚度影响的测量独立性,以及良好的可重复性和诊断效能<sup>[6-9]</sup>。本研究团队先后成功测量了不同近视程度、不同年龄人群的晶状体在体力学特性,不仅绘制了不同在体状态下晶状体的力学图谱,更首次精准定位了年龄相关的晶状体力学变化特征,深化了对晶状体衰老机制的理解<sup>[10-11]</sup>。该研究对进一步研究老视的发病机理、开发延缓老视进展的策略,以及理解白内障的早期病理生理机制具有重要意义。

尽管BOSS系统的推出展现出其未来在眼科临床应用的巨大潜力,但成为更成熟的临床实用化仪器仍有很大改进空间。与传统的ORA和CST在体

力学测量仪器相比,该系统目前采用逐点捕获的数据采集方式,测量时间更长,患者依从性和测量效率较低;由于对检测光稳定性的较高要求,该系统对测量环境温度(尤其重要)、湿度、清洁度等指标要求较为严格。除上述系统外,最新报道的融合光学相干断层扫描和眼球追踪技术以实现三维信号定位的运动追踪布里渊成像系统(motion-tracking Brillouin, MTB)取得了进展<sup>[12-13]</sup>,实现了对角膜组织更精准的三维力学地形图式图谱绘制,在亚临床期圆锥角膜的评估上表现出优于当前 Scheimpflug 技术的临床标准形态学评估方法,具有极强的临床转化参考价值。

### 1.3 弹性成像技术

弹性成像技术是一种可实现无创、在体的组织生物力学测量技术,基于不同的成像原理主要包括光学相干弹性成像(optical coherence elastography, OCE)和超声剪切波弹性成像(ultrasonic shear wave elastography, SWE)。OCE 适用于眼前段精细力学的探索,而 SWE 则有望成为临床眼后段及深部组织生物力学快速筛查的利器,两者在弹性成像技术中互补与融合。

OCE 是一种利用光学相干断层扫描的高分辨率、深度分辨能力,捕捉组织受外部可控载荷激励后产生的内部微小形变或波传播,再通过力响应分析后,定量得出组织的弹性模量、剪切模量等关键生物力学参数的技术。2025 年度,采用气冲<sup>[14]</sup>、声辐射力<sup>[15]</sup>、压电机械接触<sup>[16-17]</sup>和磁动力<sup>[18]</sup>等激励源的多种 OCE 已被开发用于表征角膜、晶状体等眼前节组织的生物力学特性。其中,部分研究成功实现了活体人角膜的测量,是推动 OCE 从实验室走向临床的重要一步<sup>[14,19]</sup>。然而,OCE 穿透深度有限,难以有效评估眼后段结构;其高灵敏度易受眼球自主颤动和心搏的影响,因此对图像稳定性和处理算法的要求较高。

SWE 是一种通过发射聚焦超声脉冲在组织中产生微米级的“推挤”效应,激发横向传播的剪切波,再利用超高速超声成像序列追踪该剪切波的传播速度,依据弹性力学模型对生物组织的剪切模量或弹性模量进行实时二维映射,从而直接评估组织整体区域力学性质的技术。由于超声波能穿透光学混浊介质,使其较光学技术(如 OCE、BM 等)在眼

后段组织的生物力学测量上具有突出优势。目前的研究显示,SWE 不仅被用于人眼在体角膜和晶状体弹性的测量<sup>[20-21]</sup>,更被用于人眼在体眼球后壁(视网膜-脉络膜-巩膜复合体)、视盘、视神经和球后脂肪组织的测量<sup>[22-25]</sup>。然而,该技术空间分辨率远低于 OCE,且力学模型相对简化,难以开展精细的层析力学分析和异质性力学表征;同时,受近场盲区与超声波在软组织中迅速衰减的限制,该技术在表浅区域(如角膜中央)或极软组织中的测量仍存在挑战。

## 2 AI 与多模态融合

如果说新兴测量技术是眼生物力学研究前进的基础,那么 AI 与多模态数据融合则像是强大的“加速器”,推动该领域迅速发展。

AI 在优化和简化传统的眼生物力学数据处理流程中具有巨大优势。本团队提取原始角膜动态变形视频像素点的轮廓数据,结合集成学习模型等机器算法,构建出独立的新型生物力学参数和表征局部角膜生物力学的新方法<sup>[26-28]</sup>;Zhou 等<sup>[29]</sup>借助一种创新的深度学习模型,绕过了传统复杂的计算步骤,直接、快速地从原始 OCE 数据中预测弹性模量,极大地提高了计算效率和自动化程度。

同时,研究显示,AI 强大的模式识别和数据挖掘能力在处理眼生物力学领域常见的高维度、非线性、多模态数据具有更深刻的价值<sup>[26]</sup>。多项研究证实,融合角膜形态学、生物力学参数及临床风险因素的 AI 模型,在早期圆锥角膜诊断效能上显著优于任何单一数据源模型<sup>[26,30-32]</sup>。此外,本团队借助机器学习模型(XGBoost)整合多模态临床数据,并完成特征重要性排序,可精准量化角膜生物力学参数对屈光手术效果的核心影响,为术者提供决策依据<sup>[33]</sup>。由此可见,AI 与多模态数据的深度融合不仅能显著提高临床诊断精度,还能够反哺临床认知,为医生理解眼生物力学问题提供全新的思路和视角。

## 3 主要眼生物力学相关疾病研究

### 3.1 近视

近年来,关于近视的研究已从传统的遗传和光学因素,逐渐转向对眼球生物力学特性的深入探

索。2025年多项研究已明确证实,生物力学并非近视的单纯伴随现象,更可能是驱动其发生与进展的核心驱动因素,为近视的风险分层和靶向干预开辟了全新路径。

当前研究进一步明确,近视的生物力学改变并非巩膜的“专利”,而是一种涉及眼球各结构的系统性重塑。研究发现,近视人群黄斑区眼球壁的弹性下降<sup>[25]</sup>,且高度近视人群中后巩膜葡萄肿和近视性黄斑病变的发生均与角膜易于变形的生物力学特性显著相关<sup>[34-35]</sup>。此外,角膜与巩膜前部、赤道部的生物力学特性之间存在可量化的关联<sup>[36-37]</sup>。角膜生物力学参数中的最高凹陷硬度参数(stiffness parameter at highest concavity, SP-HC),被证实为可间接反映活体巩膜生物力学特性的潜在关键指标,从而为无创推断活体巩膜生物力学特性提供了可行途径,具有重要的临床转化价值<sup>[36]</sup>。在成人近视中,还伴随着晶状体核的生物力学硬化,这种硬化与调节功能的改变密切相关<sup>[11]</sup>。

在机制层面,研究呈现出从整体到局部、从宏观组织到微观细胞分子的全面深化。本团队发现,高度近视人群的角膜不仅表现为组织整体硬度的下降(软化),更伴随中央到周边硬度梯度与水平-垂直不对称性的消失,即角膜力学异质性趋于消失<sup>[1]</sup>。Zhang等<sup>[38]</sup>在正常树鼯眼中发现,巩膜生物力学特性从后极部到前部由软到硬呈梯度分布,且近视中巩膜生物力学特性的削弱可能率先出现于赤道部及前部。同时,细胞层面的研究证实,Wnt7b/ $\beta$ -catenin通路可通过调控MMP-2,影响I型胶原的代谢,最终形成改变巩膜硬度的“信号-分子-力学”通路<sup>[39]</sup>;而力学环境刺激巩膜细胞整合素后,可调节F-肌动蛋白重构,进而促进YAP核转位,影响I型胶原代谢,形成“力学-信号-分子”通路<sup>[40]</sup>。这为开发靶向生物力学的抗近视药物提供了坚实的实验证据。

在因果关系的确立上,两项基于英国生物样本库(UK Biobank)的人群分析研究一致表明,较低的角膜滞后量(corneal hysteresis, CH)和角膜阻力因子(corneal resistance factor, CRF)是近视的致病性风险因素<sup>[41-42]</sup>。反向孟德尔随机化(Mendelian randomization, MR)分析虽提示屈光状态可能对生物力学有微弱的反馈影响,但主导路径仍为“生物

力学减弱导致近视”<sup>[41]</sup>。

### 3.2 圆锥角膜

圆锥角膜(keratoconus, KC)是一种广为人知的生物力学改变相关疾病,前述内容已提到新兴测量技术和融合AI的多态数据处理可显著提高了该疾病的早期诊断率。然而,在KC基础致病机制(如慢性揉眼的机械性刺激)的相关研究中,2025年度尚未出现重大突破性进展。目前多数研究仍依赖模拟揉眼动作的离体细胞模型,尽管已发现WNT10A和COL12A1等分子可能是揉眼致病生物力学机制中的关键信号分子<sup>[43]</sup>,但尚无成熟的标准化KC疾病或力学加载动物模型可用于机制验证。因此,优化动物模型构建方法,并加强长期观察与评估,以更精准地模拟人类KC的病理生理过程,仍将是该领域未来基础研究的重点<sup>[44]</sup>。

### 3.3 青光眼

青光眼生物力学研究已从对静态压力(主要IOP)的关注,逐步聚焦于视神经乳头(optic nerve head, ONH)和小梁网(trabecular meshwork, TM)这两个核心靶点。

传统青光眼力学研究聚焦于静态IOP对筛板的压迫,而最新的青光眼力学研究则关注动态生物力学的致病作用。研究发现,眼球运动可产生不对称的ONH应力促进青光眼进展,且高度近视的长眼轴在眼球运动时不对称ONH应力分布更高,提示每一次眼球转动都可能是一次对筛板的微创伤<sup>[45-46]</sup>。ONH是青光眼病理中生物力学损伤的核心靶点。眼压波动产生的各种应力(拉伸、压缩、剪切)通过影响ONH细胞的生物学,最终导致组织重塑和神经损伤。因此,合适的体外模型是ONH细胞力学研究的重要部分。目前研究多采用水凝胶等材料模拟细胞外基质(extracellular matrix, ECM),构建更接近生理状态的3D微环境,实现从传统2D模型向先进3D模型的转化。此类模型可同时施加压缩和拉伸应力,且能更精准探究细胞与ECM的相互作用机制,是当前眼生物力学领域的研究前沿。

在TM力学研究中,先进的3D牵引力显微镜技术揭示了青光眼TM内部存在牵引力失衡现象,进而引发ECM的显著重组,这可能是破坏房水流出稳态的关键因素<sup>[48]</sup>;结合3D牵引力显微镜和胶原

原纤维应变映射技术的研究,更是精准明确了人类 TM 细胞骨架系统的力学贡献权重<sup>[49]</sup>。研究发现,80%的牵引力源于肌动蛋白,15%~20%源于微管,中间丝的贡献微乎其微,这提示肌动球蛋白可能是青光眼 TM 首要力学靶点。上述研究结果提示,在青光眼的病理进展过程中,细胞力学功能失调可能是 ECM 异常重塑、房水流出通路组织硬化及纤维化的早期驱动事件。

## 4 总结与展望

2025 年度,眼生物力学领域呈现出三大趋势:

① 新兴测量技术推动研究从宏观整体到微观局部、从组织到细胞的深刻转变,实现眼生物力学特性的多层次精确量化。② AI 与多模态融合,实现信息高效整合、数据优化处理,极大程度上加速了临床对眼生物力学问题的理解。③ 眼生物力学相关疾病研究从关联性认知迈向因果性探索,从疾病诊断转变为机制解析与靶点探究,以期发现新的干预靶点,实现从源头上预防和治疗疾病。

基于 2025 年眼生物力学研究进展,如何实现新兴力学检测技术的测量标准化和临床实用化、如何借助 AI 与多模态数据融合技术破解眼生物力学核心难题、如何厘清力学因素在各眼科疾病发生发展中的具体作用和分子调控机制,将是未来的重要发展方向。最终,通过生物力学性质表征和力学生物学分子机制发掘,实现从“测量力”到“调控力”的全方位眼生物力学认知升级,为近视防控、青光眼治疗等重大临床挑战提供全新的解决方案。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**杨舒负责文献查阅及资料整理,论文撰写;王雁负责论文构思、审校及修改。

## 参考文献:

[1] YANG S, DENG H, ZHANG J, *et al.* Spatial heterogeneity of corneal biomechanical properties in myopia at nanoscale: a preliminary study[J]. *Exp Eye Res*, 2025, 253: 110277.

[2] ZHAI Y, WANG J, MENDOZA VO, *et al.* Spatial relationship between histological staining intensity and corneal stiffness variations: insights from AFM indentation in infant African green monkeys [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2025, 169: 107047.

[3] KAZAILI A, ZHUOLA N, SADEK NA, *et al.* Regional quantification of glycosaminoglycans and their association with collagen fibril ultrastructure in the sclera following enzymatic degradation[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2025, 172: 107169.

[4] LIONADI I, MCLARNON L, BHATTACHARYA G, *et al.* Quantitative biomechanical profiling of transformed human corneal epithelial cells[J]. *Nanoscale*, 2025, 39: 22807-22818.

[5] GENG JY, LU Y, LI SC, *et al.* Quantification of mechanical-cytoskeletal coupling in human corneal cells across myopia severity[J]. *Biophys Rep*, 2025, 5(3): 100213.

[6] VINCIGUERRA R, HERBER R, CEN KZ, *et al.* KERATO biomechanics study 2: a comparative evaluation before and after corneal cross-linking using brillouin microscopy and dynamic scheimpflug imaging [J]. *J Refract Surg*, 2025, 41(6): e594-e601.

[7] VINCIGUERRA R, PALLADINO S, HERBER R, *et al.* The KERATO biomechanics study 1: a comparative evaluation using brillouin microscopy and dynamic scheimpflug imaging [J]. *J Refract Surg*, 2024, 40(8): e569-e578.

[8] JIANG Q, SUN Y, GU Z, *et al.* Application of the brillouin optical scanning system in the regional corneal biomechanical evaluation of keratoconus and its correlation with corvis ST parameters [J]. *Bioengineering*, 2025, 12(6): 634.

[9] YU YZ, CAO J, MA Y, *et al.* Comparison of corneal biomechanics in post-smile, post-LASEK, and normal eyes with Brillouin microscopy [J]. *J Optom*, 2025, 18(4): 100579.

[10] SONG F, CHANG L, QU S, *et al.* *In vivo* analysis of age-related changes in longitudinal modulus and morphology of the crystalline lens: a combined brillouin optical scanning and OCT study [J]. *Exp Eye Res*, 2025, 260: 110591.

[11] CHANG L, SONG F, QU S, *et al.* *In vivo* Brillouin analysis of lens nucleus and cortex in adult myopic eyes and their correlation with accommodation [J]. *Investig Ophthalmol Vis Sci*, 2025, 66(4): 6.

[12] RANDLEMAN JB, ZHANG H, HAMMOUD B, *et al.* Three-dimensional mechanical characterization of normal, subclinical, and keratoconic corneas using motion tracking brillouin microscopy [J]. *Am J Ophthalmol*, 2025, 278: 305-316.

[13] HAMMOUD B, ZHANG H, SUSANNA BN, *et al.* Focal weakening/thinnest corneal point proximity in normal, subclinical, and keratoconic corneas using motion-tracking brillouin microscopy [J]. *Ophthalmol Sci*, 2025, 5(6):

- 100882.
- [14] DUVVURI C, SINGH M, LAN G, *et al.* Determinants of human corneal mechanical wave dispersion for *in vivo* optical coherence elastography [J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2025, 14(1): 26.
- [15] ROHMAN L, NAVIA JC, ZEVALLOS-DELGADO C, *et al.* *In vivo* safety evaluation of acoustic radiation force for optical coherence elastography of the crystalline lens[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2025, 14(8): 35.
- [16] SINGH A, NAIR A, SHE Z, *et al.* Optical coherence elastography detects increased corneal stiffness in nonhuman primates with experimental glaucoma [J]. *J Biomed Opt*, 2025, 30(12): 124508.
- [17] FENG X, LI GY, JIANG Y, *et al.* Optical coherence elastography measures mechanical tension in the lens and capsule[J]. *Acta Biomater*, 2025, 199: 252-261.
- [18] ZHANG X, OU M, XIAO T, *et al.* Method for assessing local mechanical properties of the cornea based on spectroscopic magnetomotive optical coherence elastography[J]. *IEEE Trans Bio-Med Eng*, 2025, 72(10): 2991-2999.
- [19] LU C, REN J, WEI X, *et al.* Ultra-fast line-field swept source scanning optical coherence elastography [J]. *Biomed Opt Express*, 2025, 16(8): 3105-3115.
- [20] KWOK S, PAN X, PAN M, *et al.* Regional biomechanical weakening in keratoconus corneas detected by *in vivo* high-frequency ultrasound elastography[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2025, 14(3): 22.
- [21] QADER AH, BAHARI NB, RAHIM EBA, *et al.* Evaluation of age-related changes in human lens stiffness through a novel non-invasive method using shear wave ultrasound elastography[J]. *Curr Eye Res*, 2025, 50(11): 1112-1122.
- [22] YUAN Y, LI F, TEN W, *et al.* *In vivo* assessment of regional scleral stiffness by shear wave elastography and its association with choroid and retinal nerve fiber layer characteristics in high myopia[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2025, 263(7): 2059-2067.
- [23] KÖK M, AYAN A, ARAYICI ME, *et al.* Utilizing shear wave elastography for the evaluation of ocular involvement in systemic sclerosis [J]. *Diagnostics*, 2025, 15(10): 1227.
- [24] ZHANG Y, ZHOU Y, CHEN T, *et al.* Ultrasound super-resolution imaging and shear wave elastography for the non-invasive diagnosis of non-proliferative diabetic retinopathy: a pilot study[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2025, 15(5): 4059-4070.
- [25] QIAN T, LI F, ZHAO T, *et al.* Correlation between axial length and the elasticity of the posterior segment of eyeball in myopic eyes without posterior staphyloma: a shear wave elastography-based cross-sectional study [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2025, 263(10): 2975-2983.
- [26] WANG Y, ZOU H, WEI P, *et al.* Artificial intelligence in refractive surgery [M]//GRZYBOWSKI A. *Artificial intelligence in ophthalmology*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 251-259.
- [27] CHEN X, TAN Z, HUO Y, *et al.* Localized corneal biomechanical alteration detected in early keratoconus based on corneal deformation using artificial intelligence [J]. *Asia-Pac J Ophthalmol*, 2023, 12(6): 574-581.
- [28] TAN ZP, CHEN X, LI KS, *et al.* Artificial intelligence-based diagnostic model for detecting keratoconus using videos of corneal force deformation [J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2022, 11(9): 32.
- [29] ZHOU X, ZHU S, SHEN K, *et al.* Shear wave optical coherence elastography imaging by deep learning[J]. *J Biophotonics*, 2025, 18(9): e70027.
- [30] DU K, PENG R, CHEN Y, *et al.* Enhancing early keratoconus detection with multimodal machine learning: integrating tomography, biomechanics, and clinical risk factors[J]. *Am J Ophthalmol*, 2025, 280: 334-346.
- [31] HUO Y, XIE R, LI J, *et al.* Ethnicity optimized indices enhance the diagnostic efficiency of early keratoconus: a multicenter validation study [J]. *Contact Lens Anterior Eye*, 2025, 8(3): 102382.
- [32] WANG Y, XIE L, YAO K, *et al.* Evidence-based guidelines for keratorefractive lenticule extraction surgery [J]. *Ophthalmology*, 2025, 132(4): 397-419.
- [33] ZHANG M, JI S, HUO Y, *et al.* Analyzing the effect of surgical and corneal parameters on the postoperative refractive outcomes of smile in myopic eyes based on machine learning[J]. *Am J Ophthalmol*, 2025, 271: 455-465.
- [34] LIAO X, YU G, JIANG Y, *et al.* The corneal biomechanics of the posterior staphyloma[J]. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2025: 105231.
- [35] YASHIRO K, AOKI S, KITAMOTO K, *et al.* Biomechanical properties measured with dynamic scheimpflug analyzer in myopic maculopathy [J]. *Am J Ophthalmol*, 2025, 276: 92-98.
- [36] XIE R, HUO Y, LI Y, *et al.* Analysis of *in vivo* sclera impact on the biomechanics of myopic eyes[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2025, 14(6): 8.
- [37] HUO Y, CHANG L, XIE R, *et al.* Analysis of the sclera elasticity properties and comparison with corneal biomechanics properties *in vivo* and *in vitro*[J]. *Exp Eye Res*, 2025, 255: 110383.
- [38] ZHANG X, EL HAMDAOUI M, LIM S, *et al.*

- Microindentation reveals softening of the equatorial and anterior sclera during early myopia development in tree shrew eyes[J]. *Acta Biomater*, 2025, 201: 446-456.
- [39] WEN B, LI H, TAO H, *et al.* Regulatory effects of the Wnt7b/ $\beta$ -catenin/MMP-2 signaling pathway on scleral stiffness in Guinea pigs with form-deprivation myopia[J]. *Investig Ophthalmol Vis Sci*, 2025, 66(5): 19.
- [40] LIU X, YUAN Y, WU Y, *et al.* Extracellular matrix stiffness modulates myopia scleral remodeling through integrin/F-actin/YAP axis[J]. *Investig Ophthalmol Vis Sci*, 2025, 66(2): 22.
- [41] WEI P, HAN G, SU Q, *et al.* Corneal biomechanics as a causal factor in myopia and astigmatism: evidence from mendelian randomization [J]. *Ophthalmol Sci*, 2025, 5(5): 100738.
- [42] LI X, LUO S, LIN K, *et al.* Causal links between corneal biomechanics and myopia: evidence from bidirectional mendelian randomization in the UK biobank [J]. *Bioengineering*, 2025, 12(4): 412.
- [43] MOON L, KAUR P, WANG J, *et al.* Mechanical strain of corneal epithelium influences the expression of genes implicated in keratoconus [J]. *Investig Ophthalmol Vis Sci*, 2025, 66(1): 52.
- [44] ZOU Z, LI S, ZHANG H. Advances in keratoconus animal models: from genetics to biomechanics[J]. *Exp Eye Res*, 2025, 254: 110330.
- [45] KANG E, PARK JH, YOO C, *et al.* The association between asymmetric stress distribution on the lamina cribrosa and glaucoma progression[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2025, 263(3): 819-828.
- [46] KANG E, PARK JH, YOO C, *et al.* Asymmetric stress distribution on lamina cribrosa in glaucoma patients with high myopia [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2025, 263, 7: 1985-1995.
- [47] STRAT AN, GANAPATHY PS. Considerations and implications of current *in vitro* model systems to study optic nerve head cellular mechanobiology [J]. *Front Cell Dev Biol*, 2025, 13: 1699793.
- [48] KARIMI A, AGA M, STANIK A, *et al.* 3D traction force microscopy in human trabecular meshwork tissues: effects of ROCK and YAP/TAZ inhibition in normal and glaucomatous tissues[J]. *Tissue Cell*, 2025, 96: 103005.
- [49] KARIMI A, STANIK A, GOLCHIN H, *et al.* Actin-microtubule synergy dominates force transmission and collagen strain in human trabecular meshwork [J]. *Acta Biomater*, 2025, 203: 478-491.