

SS-OCT 在角膜成像中的应用进展

赵丽丽¹, 宋继科^{1, 2, 3}, 卢秀珍^{2, 3}, 毕宏生^{2, 3}

引用:赵丽丽,宋继科,卢秀珍,等. SS-OCT 在角膜成像中的应用进展. 国际眼科杂志, 2024,24(7):1058-1063.

基金项目:国家重点研发计划项目(No.2019YFC1710203)

作者单位:¹(250014) 中国山东省济南市,山东中医药大学;
²(250002)中国山东省济南市,山东省眼病防治研究院 山东省
中西医结合眼病防治重点实验室 山东省高校中西医结合眼病
防治技术(强化)重点实验室;³(250002)中国山东省济南市,
山东中医药大学附属眼科医院

作者简介:赵丽丽,在读硕士研究生,研究方向:斜弱视。

通讯作者:卢秀珍,博士,主任医师,教授,硕士研究生导师,研究
方向:斜弱视. luxzhluxzh@163.com;毕宏生,博士,主任医师,教
授,博士研究生导师,研究方向:中西医结合临床眼科疾病的研
究、白内障及眼视光学. hongshengbi1@163.com

收稿日期:2023-09-25 修回日期:2024-05-20

摘要

成像技术的进步彻底改变了眼科领域,改变了我们对眼科疾病的理解、诊断和治疗。扫频源光学相干断层扫描(SS-OCT)是一种最新的非接触式高分辨率成像技术。它进一步提高了成像深度和扫描速度,增加了新的算法和功能。SS-OCT允许对角膜结构进行三维评估,提供角膜前、后表面的曲率和高度图以及角膜厚度图。这可以帮助眼科医生筛查和诊断角膜病变,如圆锥角膜、角膜营养不良和变性。SS-OCT 更快、更精准和更灵敏的角膜测量有助于对即将进行角膜和屈光手术的患者做好术前计划和术后监测。文章总结 SS-OCT 技术的发展及其在角膜疾病中潜在的临床效用与在手术中的应用进展,以支持更多未来可能的研究和临床治疗。

关键词:扫频源光学相干断层扫描(SS-OCT);屈光手术;角膜移植;散光

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2024.7.09

Progress in the application of swept - source optical coherence tomography in corneal imaging

Zhao Lili¹, Song Jike^{1,2,3}, Lu Xiuzhen^{2,3},
Bi Hongsheng^{2,3}

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No.2019YFC1710203)

¹Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, Shandong Province, China; ²Shandong Academy of Eye Disease Prevention and Therapy; Shandong Key Laboratory of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Eye Disease Prevention and Treatment; Shandong Key Laboratory of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Eye Disease Prevention

and Treatment Technology (Enhanced), Jinan 250002, Shandong Province, China; ³Affiliated Eye Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250002, Shandong Province, China

Correspondence to: Lu Xiuzhen. Shandong Academy of Eye Disease Prevention and Therapy; Shandong Key Laboratory of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Eye Disease Prevention and Treatment; Shandong Key Laboratory of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Eye Disease Prevention and Treatment Technology (Enhanced), Jinan 250002, Shandong Province, China. luxzhluxzh@163.com; Bi Hongsheng. Shandong Academy of Eye Disease Prevention and Therapy; Shandong Key Laboratory of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Eye Disease Prevention and Treatment; Shandong Key Laboratory of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Eye Disease Prevention and Treatment Technology (Enhanced), Jinan 250002, Shandong Province, China. hongshengbi1@163.com

Received: 2023-09-25 Accepted: 2024-05-20

Abstract

• Advances in imaging technology have revolutionized the field of ophthalmology, changing the understanding, diagnosis, and treatment of ophthalmic diseases. Swept-source optical coherence tomography (SS - OCT) is a non-contact high-resolution imaging technology. It further improves imaging depth and scanning speed, adds new algorithms and features. The application of SS-OCT enables the three-dimensional evaluation of corneal structures, offering curvature and height maps for both the anterior and posterior surfaces of the cornea, as well as precise corneal thickness mapping. These invaluable tools aid ophthalmologists in effectively screening and diagnosing various corneal lesions such as keratoconus, corneal dystrophy, and degeneration. Moreover, the enhanced speed, accuracy, and sensitivity provided by SS - OCT measurements facilitate improved surgical planning and postoperative monitoring for patients undergoing refractive surgery or keratoplasty. This article reviews the development of SS-OCT technology and its potential clinical utility in corneal diseases and surgical application, in order to support more possible future research and clinical treatment.

• KEYWORDS: swept - source optical coherence tomography (SS - OCT); refractive surgery; corneal transplantation; astigmatism

Citation: Zhao LL, Song JK, Lu XZ, et al. Progress in the application of swept-source optical coherence tomography in corneal imaging. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2024, 24 (7): 1058-1063.

0 引言

角膜是一种透明组织,具有显著的屈光和屏障作用^[1]。角膜屈光力约占眼睛总屈光度的70%,是重要的屈光间质。并且作为纤维膜的前1/6,角膜在维持眼球形状方面也起重要作用。角膜的结构和屈光知识对于准确诊断和监测扩张性角膜疾病以及计划和实施手术过程是必不可少的,对散光矫正和屈光手术领域也尤其重要。角膜厚度是角膜内皮功能的间接指标,可受眼压影响。角膜变薄有圆锥角膜(keratoconus, KC)或边缘透明变性的可能性。角膜增厚可能是内皮功能障碍,如Fuchs内皮营养不良^[2]。此外,人工晶状体(intraocular lens, IOL)的计算也依赖于对角膜结构的准确分析^[3]。扫频源光学相干断层扫描(swept-source optical coherence tomography, SS-OCT)由于其高分辨率和可再现性,已被广泛用于屈光手术、角膜移植和眼外伤的术前计划和术后随访。它还被用来研究KC、角膜营养不良及变性等各种角膜病变。这些疾病的临床特征可能常常是细微的,甚至可能是亚临床的,因此使用SS-OCT有助于确定诊断。其量化的角膜变化有助于对疾病的严重程度进行分级和评估其进展。

1 SS-OCT 技术研究进展

OCT是一种革命性的活体成像技术,可以精确、无接触地获得高分辨率组织图像,显示眼部结构的实时信息。最先由Huang等^[4]于1991年开发并获得第一张视网膜OCT图像,并由Izatt等^[5]于1994年首次报道应用于眼前节成像,并测量了角膜厚度(corneal thickness, CT)。其最初为低分辨率的时域OCT(time domain OCT, TD-OCT),随着技术革新和功能完善,之后迅速发展为基于傅里叶的频域OCT(Fourier domain OCT, FD-OCT)^[6]。它包括谱域OCT(spectral-domain OCT, SD-OCT)和SS-OCT。在2005年,Yasuno等^[7]研究了一种SS-OCT原型,利用单色、可调谐的光谱扫描光源和光电探测器来检测干涉信号,允许对眼前节结构进行3D成像和生物测量。

SS-OCT结合了光源、机械设计和信号处理等方面的进步,以应对眼前节成像的挑战。SD-OCT的光源是超发光二极管,而SS-OCT的光源是可调谐激光器。在SD-OCT中,宽波长光通过衍射被分割成光谱,然后被投射到分光镜,在那里实现光的干涉。在SS-OCT中,光源已经通过可调谐激光器被分割成光谱,因此在SS-OCT中不需要分光镜。这种简化的机制有助于高速数据采集^[8]。角膜成像需要准确定位和检测眼球运动。未对准和运动会导致生物识别中的误差。SD-OCT每秒可获得26 000-70 000次A扫描,而SS-OCT扫描速度更快,可达每秒100 000次A扫描。更短的扫描时间大大减少了运动伪影。它的自动对准功能可能会增加机器的可重复性。有研究表明SS-OCT能准确测量小学生的各项眼部参数^[9]。1 310 nm的长波长在不透明组织中的散射较少,因此允许更深的穿透力。角膜的前后边界可以被更清晰地描绘出来,不受基质混浊的干扰^[10]。其大大改善了采集信号的

信噪比,获取的图像受光学干扰的失真较小,产生更清晰的图像。

Chen等^[11]演示了SS-OCT技术的最新进展,在1 310 nm波长下具有325 kHz A扫描速率、12.2 mm轴向分辨率(在空气中)和15.5 mm深度范围(在空气中)。超高的扫描速率不仅通过最大限度地减少采集时间从而减少运动来促进生物学测量,而且还支持用于全面结构分析的体积OCT和用于可视化血管系统的OCT血管造影(OCT angiography, OCTA)。15.5 mm的深度范围覆盖了从角膜前表面到晶状体后囊的所有光学表面。此外,最新的研究报道SS-OCT可用于角膜密度的测量,并提供了健康眼睛角膜密度测定的标准值^[12]。

2 SS-OCT 在角膜成像中的应用

超声测厚仪(ultrasound pachymetry, USP)是目前应用最广泛的CT测量方法。USP的缺点是需要麻醉角膜、测量过程中探头的压痕、探头未对准或由于缺乏固定而导致偏心以及可能的感染传播风险。报告的测量结果有相当大的变异性。因此,非接触式设备是首选。最初的非接触式技术之一是19世纪末的Placido盘成像,它使用角膜前表面的反射来估计角膜曲率(corneal curvature, CC)。然而,后表面的评估是其主要限制之一^[13]。随后,出现了Placido裂隙扫描系统(Orbscan II)和旋转Scheimpflug相机系统(Pentacam)。Orbscan II发展于20世纪90年代末,结合了裂隙光的投影(原理与裂隙灯生物显微镜相同)和Placido盘的反射原理。它是第一个可获得角膜前后表面曲率的技术,并提供角膜前后表面的地形图。而Pentacam可以从不同的角度捕捉角膜的图像,对角膜进行全三维重建,因此被称为角膜地形图仪^[14]。2002年发表了第一份使用该技术测量角膜半径的报告,并在2005年发表了关于角膜厚度的测量协议^[15]。最近几年,OCT开始被广泛用于对角膜各层进行高分辨率成像,并评估角膜前表面和后表面的高度变化,实现点对点CT测量。其中SS-OCT表现了与其他设备相比更好地或类似地角膜参数测量,包括旋转Scheimpflug旋转成像设备、SD-OCT、LS900测量仪和USP^[16-17]。SS-OCT结合反射式角膜曲率计、CT测量和角膜后表面曲率测量来计算角膜屈光力(使用1.3375的折射率)。此外,在3.2 mm直径上计算角膜曲率测量值。有报道称它和Scheimpflug设备对于角膜后表面参数和总屈光力的评估并不能互换使用^[18-19]。但二者相比,SS-OCT具有更短的数据采集时间、更好的重复性和再现性。

2.1 角膜屈光手术 角膜屈光手术通过改变角膜形状来矫正屈光不正,其技术进展伴随着成像系统的不断改进,以指导更好的患者选择,减少手术并发症,并通过定制治疗优化视觉结果,从而使接受手术的患者安全性和有效性得到全面改善。SS-OCT提供的角膜前、后表面的高分辨率图像和详细地形图有助于屈光手术的术前筛查及术后评估、角膜散光评估和术后并发症(如角膜扩张)的诊断与治疗^[20-21]。它也可用于计划下一次手术的新瓣的厚度和直径^[16]。

传统上,至少250 μm的残余基质床厚度(residual stromal thicknesses, RST)被认为是安全的,可防止角膜扩张。由于角膜瓣切割不精确,术前RST的可预测性可能不可靠。因此Ye等^[22]在准分子激光原位角膜磨镶术

(laser-assisted *in situ* keratomileusis, LASIK) 术中利用 SS-OCT (CASIA) 测量了 RST, 并表现出高度可重复性。然而, 与 USP 相比, SS-OCT 设备倾向于低估基质厚度。此外, SS-OCT (ANTERIOR) 评估的屈光手术眼和圆锥角膜眼的角膜上皮都比 SD-OCT 测量的薄^[23]。因此, 各角膜测厚设备在没有校正的情况下不适合互换使用。

Abdelazeem 等^[16]首次描述了 SS-OCT (Triton-DRI) 对比具有不同类型 LASIK 瓣并发症的患者的角膜成像情况, 发现上皮内表现为角膜瓣下的高反射性病变, 呈岛、巢或连续片状, 以及很好地显示了角膜瓣皱褶。评估角膜后表面高度对于术后角膜扩张的早期发现和监测尤为重要。Chan 等^[24]首次利用 SS-OCT (CASIA) 纵向评估了 LASIK 和准分子激光屈光性角膜切削术 (PRK) 术后 1 a 内角膜后表面高度的变化, 发现后表面均有轻微但显著的前凸 (<5 mm), 表现亚临床角膜扩张, 且后表面高度在 LASIK 术后 1 a 内波动, 而在 PRK 术后 3 mo 就稳定下来。Hu 等^[25]比较小切口角膜基质内透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 后 Pentacam、超声 (SP-3000) 和 SS-OCT (CASIA) 测量的 CT, 发现 SS-OCT 的重复性最好, 并建议使用 SS-OCT 测量 SMILE 术后的 CT。Zhou 等^[26]对接受准分子激光治疗性角膜切削术 (phototherapeutic keratectomy, PTK) 的复发性角膜糜烂患者进行去除上皮后即时的 SS-OCT (CASIA) 成像, 发现与正常对照组相比基质表面更陡, 具有更高的规则散光和高阶像差。

2.2 屈光性白内障手术 现代白内障手术已经发展成为一种屈光手术, 术后的视力结果正在稳步改善^[27]。屈光性白内障手术的实施需要精细的术前规划和设计。SS-OCT 提供的眼轴、角膜屈光力、前房深度及角膜散光有助于优化 IOL 度数计算及评估安装位置^[28-29]。周桂梅等^[30]发现 SS-OCT (CASIA 2) 用于白内障患者的 CC 及散光测量有较好的重复性和可再现性。Shoji 等^[31]分析 SS-OCT (CASIA 2) 的测量结果, 发现 AL 每增加 1 mm, 角膜前表面曲率半径增加 532 μm , 晶状体厚度减少 58 μm 。Georgiev 等^[32]报道 SS-OCT (ANTERIOR) 测量的白内障老年患者的角膜像差与参考设备一致, 可以很好地表征角膜光学质量。

角膜散光是导致白内障术后视力下降的关键因素之一。Toric IOL 是现代白内障手术的金标准技术, Goggin 等^[33]研究指出仅根据角膜前表面曲率进行 Toric IOL 的计算, 由于后表面散光 (posterior corneal astigmatism, PCA) 的影响会导致散光过度矫正或矫正不足, 显著降低了患者术后的视觉质量。现在, 包括 PCA 在内的角膜总散光 (total corneal astigmatism, TCA) 值可以通过首个基于 SS-OCT 原理的光学生物测量仪 IOL Master 700 直接测量, 这对 Toric IOL 植入至关重要^[28]。有研究证实考虑到 IOL Master 700 测量的角膜后表面参数的 IOL 计算可以优化白内障术后的屈光结果^[34]。Athukorala 等^[35]报道与其他测量方法相比, IOL Master 700 测量的 TCA 与单焦点 IOL 术后屈光性散光的关系最密切。晶状体倾斜或神经适应性可能也是 TCA 和角膜前表面散光之间差异的原因。Muzyka-Woźniak 等^[36]发现对于低角膜散光 (<1.5 D), IOL Master 700 测量的角膜前表面散光和 TCA 之间的差异没有临床意义。然而, Rémignon 等^[37]发现采

用 Abulafia-Koch 公式估计的 TCA 与 IOL Master 700 测量的相比, 可预测性误差显著降低。Chai 等^[38]发现 IOL Master 700 的总角膜曲率 (total keratometry, TK) 与 Anterior 的总角膜屈光力 (total corneal power, TCP) 在残余散光预测方面达到了相当的准确性。这表明 Anterior 作为一种新的 SS-OCT 生物测量仪, 可能为散光预测提供一种新的选择。SS-OCT 还可以量化白内障手术角膜切口的形态学特征, 跟踪术后变化, 有效地评估主切口是否存在裂开、后弹力层脱离和伤口愈合情况, 以避免角膜水肿等并发症^[39]。此外, SS-OCT (OA-2000) 还可以很好地用于合并干眼的白内障患者的眼生物学参数测量^[40]。

2.3 角膜移植术 Eduard Zirm 在近 1905 年首次实施了角膜移植术, 这是治疗角膜盲的主要方法^[41]。其主要适应证是 Fuchs 内皮角膜营养不良、圆锥角膜和感染后角膜病变^[42]。术前, SS-OCT 能对供体角膜组织的曲率在保持低温的无菌条件下进行定量评估^[43-44]。术中或术后, SS-OCT 可进行 CT、内皮细胞密度、表面规则性、角膜混浊与否及其位置的成像与测量, 以观察供体和受体角膜之间的适配程度及免疫排斥反应, 实现术前的结果预测和术后随访^[43]。深板层角膜移植术 (deep anterior lamellar keratoplasty, DALK) 常用于治疗具有健康内皮的圆锥角膜和角膜基质疾病, 在全球范围内越来越受欢迎。与穿透性角膜移植术 (penetrating keratoplasty, PK) 相比, 它保留了宿主内皮细胞, 从而消除了内皮排斥的风险^[45]。Pasricha 等^[46]使用 SS-OCT (定制) 首次在 DALK 术中检测了不同角膜深度中大气泡 (big bubble, BB) 形成的成功率, 发现 <90% 的针深度可以成功形成完整的 BB。Bhullar 等^[47]在 DALK 体外模型中发现仅在生理性眼压 (10-20 mmHg) 下产生最佳直径的 BB。极高的眼压 (40 mmHg) 导致 BB 的直径明显小于生理性和低眼压 (5 mmHg) 时的直径。Satue 等^[48]提出 SS-OCT (Triton-DRI) 可检测后弹力层角膜内皮移植术 (descemet membrane endothelial keratoplasty, DMEK) 后早期植片脱位, 16 mm 径向扫描方案在快速扫描整个角膜 (角膜缘到角膜缘) 方面具有优势, 而 6 mm 径向扫描方案提供了所选区域的详细角膜成像。

2.4 圆锥角膜 KC 于 1854 年首次在文献中被描述, 以进行性中央或旁中央角膜基质变薄为特征, 通常伴随着高度近视散光以及不规则散光, 发生角膜扩张的风险较高, 可导致严重的视力损害。晚期的不可逆损伤也是我国致盲的重要原因^[49]。在晚期, 角膜移植是唯一可行的治疗方案。然而, 如果及早诊断, 像角膜胶原交联术 (corneal cross linking, CXL) 或基质环植入术 (intracorneal ring segments, ICRS) 这样侵入性较小的治疗方法可以用来减缓疾病的进展。KC 的诊断依赖于角膜地形图, 相关参数包括角膜前、后表面的曲率和高度值、像差、厚度和生物力学指标等^[50]。SS-OCT 对于角膜特征的分析可用于诊断、筛查亚临床 KC、检测 KC 进展以及随访 KC 的治疗结果^[51-52]。

Fujimoto 等^[53]报道可通过使用 SS-OCT 绘制角膜曲率和厚度图来检测 KC 进展速度。SS-OCT 的成像能力可以与人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术相结合, 评估正常眼和 KC 眼角膜参数的差异。Yousefi 等^[54]首次利用 SS-OCT (CASIA) 开发了一种无监督机器学习算法, 可

以很好地识别 KC 的状态和严重程度。Kamiya 等^[52]发现 SS-OCT (CASIA 2) 提供的角膜后表面高度图在区分圆锥角膜和正常眼睛方面提供了 0.991 的准确性,在确定 KC 分期方面提供了 0.874 的准确性。这表明它将有助于提高 KC 筛查和分期的诊断准确性。Kim 等^[55]认为 SS-OCT (ANTERIOR) 测量的最佳拟合球面 (best-fit sphere, BFS) 和环形椭球面 (best-fit toric-ellipsoid, BFT) 参考值的高度图是 KC 诊断的有效指标,可有效区分 KC、疑似 KC 及正常眼。Fujimoto 等^[56]使用 SS-OCT (CASIA) 发现 30 岁以下的年轻患者和老年患者 (特别是晚期 KC), 都表现出角膜后表面变陡的进展, 最大 K 值 (K_{max}) 较陡的年轻患者进展风险较大。Saad 等^[57]发现基于 SS-OCT (Anterior) 的曲率、高度和角膜厚度指数相结合的模型允许以非常好的准确度 (分别为 87% 和 99.5%) 自动检测早期 KC 和 KC。SS-OCT 对角膜上皮的分析也将在早期 KC 的检测中发挥作用。Fassbind 等^[58]开发了一款名为 Eye-Analyzer 的直观应用程序,使眼科医生和研究人员能够轻松分析角膜 OCT 扫描 (CASIA 2) 并与 AI 模型进行交互。该应用程序有助于 KC 的尽早诊断。Ghassemi 等^[59]发现 CASIA 2 与被公认为诊断 KC 标准工具的 Pentacam 在相关参数的测量上具有良好的一致性。

在 KC 早期,通常可以保持最佳矫正视力 (best corrected visual acuity, BCVA)。然而,随着疾病进展,BCVA 的恶化可能伴随着不规则散光和高阶像差的增加。Esaka 等^[51]利用 SS-OCT (CASIA) 选择了两个预测 KC 患者 BCVA 的参数,分别为角膜前表面高度的均方根和总彗差,预测正确率为 84.6%。Wang 等^[60]利用 SS-OCT (CASIA) 比较了 CXL 前后 KC 的疾病进展速度,发现非 CXL 组的所有角膜参数在整个随访期内保持稳定,而 CXL 组术后所有相关角膜参数的进展率均下降。Steinberg 等^[61]使用 SS-OCT (CASIA) 分析了 KC 患者的亚临床 KC 眼 ($60\% < KISA \text{ 指数} < 100\%$) 与正常眼 ($KISA \text{ 指数} < 60\%$) 之间的差异。角膜基质是角膜生物力学特性的主要贡献结构,KC 患者表现为角膜硬度降低^[62]。de Stefano 等^[63]应用 SS-OCT (定制) 对正常眼和 KC 眼进行光学相干弹性成像 (OCE),发现与正常眼相比,KC 眼的角膜前基质硬度相对不足,并证明它是临床上可获得的疾病生物标志物。此外,Monteiro 等^[64]发现了 KC 眼 CXL 术后角膜前基质硬度的增加。

2.5 角膜营养不良及变性 角膜营养不良是指一组典型的双侧、对称、缓慢进展且与环境及全身因素无关的角膜病。其按受影响的角膜层分为上皮、上皮下、基底膜 (basement membrane, BM)、基质、后弹力层 (descemet membrane, DM) 和内皮营养不良^[65]。SS-OCT 几乎在组织学细节上区分角膜层的能力标志着角膜营养不良诊断的另一个潜在突破。Fuchs 内皮角膜营养不良 (Fuchs endothelial corneal dystrophy, FECD) 是最常见的原发性角膜内皮营养不良症,特征为角膜内皮细胞进行性丧失,后弹力层增厚。Arnalich-Montiel 等^[66]利用 SS-OCT (CASIA) 评估了 FECD 患者的角膜顶点厚度、瞳孔中心厚度和最薄点厚度 (thinnest CT, TCT),报告了比其他设备更好的结果。FECD 通常发生在生命的第 50-60 a,存在一定程度的白内障的可能性很高。最新的研究定义了与 FECD 并存的白内障患者的 SS-OCT (CASIA 2) 的角膜屈

光度和 CT、高度图的详细特征以及傅立叶指数^[67]。Eker 等^[68]报告了 1 例滤泡样上皮基底膜营养不良,SS-OCT (Triton-DRI) 表现为在基底上皮水平可见 30-90 μm 的多个低反射圆形椭圆形结构,表明 SS-OCT 可用于该疾病的诊断并且有助于与其他上皮/上皮下角膜营养不良和角膜上皮囊性病变相鉴别。Mori 等^[69]将 SS-OCT (定制) 用于颗粒状角膜营养不良患者的 PTK 术前规划,模拟消融逐渐加深,以确定合适的消融深度。实际 PTK 的结果与术前评估数据非常一致。

Terrien 边缘性变性 (Terrien marginal degeneration, TMD) 是一种罕见的角膜变性类型,其特征是缓慢进行性的周边角膜变薄。Hattori 等^[70]利用 SS-OCT (CASIA) 评价了 TMD 的详细形态变化。发现患者角膜变薄,周边上皮层完整,并清楚地显示出变薄区域内空洞形成。Papamichael 等^[71]报告了 1 例继发于边缘角膜透明变性的双侧自发性角膜穿孔,SS-OCT (Triton-DRI) 被用于进行临床诊断、评估与监测临床疗效。Shimizu 等^[72]利用 SS-OCT (CASIA) 检测了外伤性角膜穿孔后有角膜瘢痕眼的角膜高阶像差,发现与视力相关。

3 总结与展望

总之,SS-OCT 结合其他成像技术对角膜组织的评估是了解其形态和功能不可或缺的过程。与之前的设备相比,SS-OCT 技术显著改善了角膜的成像质量与速度,并通过将可疑病变与扫描图像进行关联来帮助临床医生做出明确的诊断。随着技术的不断进步,它变得越来越受欢迎,准确、深入、可重复的成像以及角膜参数的自动量化显然在许多方面增强了我们的临床敏锐度。在未来,它的成像能力可以与 AI 技术和数据分析工具更好地结合,以提取更普遍适用的客观参数,以支持疾病诊断;以及需要更多研究来开发显微镜集成的 SS-OCT 系统,以适用于术中决策。此前关于扫频源光学相干断层扫描技术的研究多集中于眼底改变与血管成像,应用于眼前节疾病诊治时则多聚焦在青光眼和白内障^[73-74]。我们认为,SS-OCT 技术也有很大的潜力来重新定义未来对角膜的理解,亟待开发一种使用经过预处理的角膜 OCT 筛查数据来自动评估角膜健康状况的方法,并潜在地区分不同的疾病和条件,如圆锥角膜。作为标准 OCT 诊断的一部分,这将有助于疾病筛查,在早期阶段识别角膜病理和异常将迅速应用适当的治疗,改善结果。

参考文献

- [1] Ma JN, Wang Y, Wei PH, et al. Biomechanics and structure of the cornea: implications and association with corneal disorders. *Surv Ophthalmol*, 2018, 63(6):851-861.
- [2] Camburu G, Zemba M, Tătaru CP, et al. The measurement of central corneal thickness. *Rom J Ophthalmol*, 2023, 67(2):168-174.
- [3] Escolano Serrano J, Tarazona Jaimes CP, Monera Lucas CE, et al. Intraobserver repeatability of tomographic, pachymetric, and anatomical measurements in healthy eyes using a new swept-source optical coherence topographer. *Cornea*, 2022, 41(5):598-603.
- [4] Huang D, Swanson EA, Lin CP, et al. Optical coherence tomography. *Science*, 1991, 254(5035):1178-1181.
- [5] Izatt JA, Hee MR, Swanson EA, et al. Micrometer-scale resolution imaging of the anterior eye *in vivo* with optical coherence tomography. *Arch Ophthalmol*, 1994, 112(12):1584-1589.
- [6] Garcia Marin YF, Alonso-Caneiro D, Vincent SJ, et al. Anterior

segment optical coherence tomography (AS - OCT) image analysis methods and applications; a systematic review. *Comput Biol Med*, 2022, 146:105471.

[7] Yasuno Y, Madjarova VD, Makita S, et al. Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for *in vivo* investigation of human anterior eye segments. *Opt Express*, 2005, 13(26):10652-10664.

[8] Kishi S. Impact of swept source optical coherence tomography on ophthalmology. *Taiwan J Ophthalmol*, 2016, 6(2):58-68.

[9] Tomita M, Yamashita T, Terasaki H, et al. Success rate of swept-source optical coherence tomography biometry of eyes of elementary school students. *Clin Ophthalmol*, 2022, 16:3607-3612.

[10] Li P, Johnstone M, Wang RK. Full anterior segment biometry with extended imaging range spectral domain optical coherence tomography at 1340 nm. *J Biomed Opt*, 2014, 19(4):046013.

[11] Chen SY, Potsaid B, Li Y, et al. Highspeed, long range, deep penetration swept source OCT for structural and angiographic imaging of the anterior eye. *Sci Rep*, 2022, 12:992.

[12] Wang XY, Zhang TQ, Rachwani AR, et al. New algorithm for corneal densitometry assessment based on anterior segment optical coherence tomography. *Eye*, 2022, 36(8):1675-1680.

[13] Masiwa LE, Moodley V. A review of corneal imaging methods for the early diagnosis of pre-clinical Keratoconus. *J Optom*, 2020, 13(4):269-275.

[14] Lu WC, Miao YX, Li Y, et al. Comparison of multicolored spot reflection topographer and scheimpflug-placido system in corneal power and astigmatism measurements with normal and post-refractive patients. *J Refract Surg*, 2019, 35(6):370-376.

[15] Martin R. Cornea and anterior eye assessment with placido-disc keratometry, slit scanning evaluation topography and scheimpflug imaging tomography. *Indian J Ophthalmol*, 2018, 66(3):360-366.

[16] Abdelazeem K, Sharaf M, Saleh MGA, et al. Relevance of swept-source anterior segment optical coherence tomography for corneal imaging in patients with flap-related complications after LASIK. *Cornea*, 2019, 38(1):93-97.

[17] Monera Lucas CE, Escolano Serrano J, Tarazona Jaimés C, et al. Repeatability and comparability of a new swept-source optical coherence tomographer in optical biometry. *Arch Soc Esp Oftalmol (Engl Ed)*, 2022, 97(12):670-675.

[18] Mazur R, Wylegała A, Wylegała E, et al. Comparative analysis of corneal parameters performed with GalileiG6 and OCT casia 2. *Diagnostics*, 2023, 13(2):267.

[19] Ma S, Gao RY, Sun J, et al. Comparison of two swept-source optical coherence tomography devices, a Scheimpflug camera system and a ray-tracing aberrometer in the measurement of corneal power in patients with cataract. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2024, 262(5):1567-1578.

[20] Shih KC, Tse RHK, Lau YTY, et al. Advances in corneal imaging: current applications and beyond. *Asia Pac J Ophthalmol*, 2019, 8(2):105-114.

[21] Tañá-Rivero P, Aguilar-Córcoles S, Ruiz-Mesa R, et al. Repeatability of whole-cornea measurements using a new swept-source optical coherence tomographer. *Eur J Ophthalmol*, 2021, 31(4):1709-1719.

[22] Ye C, Yu M, Jhanji V. Stromal bed thickness measurement during laser *in situ* keratomileusis using intraoperative optical coherence tomography. *Cornea*, 2015, 34(4):387-391.

[23] Feng Y, Reinstein DZ, Nitter T, et al. Heidelberg anterior swept-

source OCT corneal epithelial thickness mapping: repeatability and agreement with optovue avanti. *J Refract Surg*, 2022, 38(6):356-363.

[24] Chan TC, Liu D, Yu M, et al. Longitudinal evaluation of posterior corneal elevation after laser refractive surgery using swept-source optical coherence tomography. *Ophthalmology*, 2015, 122(4):687-692.

[25] Hu L, Hu ZL, Savini G, et al. Repeatability and agreement of corneal thickness measurements by three methods of pachymetry in small incision lenticule extraction eyes. *Expert Rev Med Devices*, 2020, 17(12):1323-1332.

[26] Zhou W, Reinstein DZ, Archer TJ, et al. Intraoperative swept-source OCT-based corneal topography for measurement and analysis of stromal surface after epithelial removal. *J Refract Surg*, 2021, 37(7):484-492.

[27] Ahmed TM, Rehman Siddiqui MAR, Hussain B. Optical coherence tomography as a diagnostic intervention before cataract surgery—a review. *Eye*, 2023, 37(11):2176-2182.

[28] Sharma A, Batra A. Assessment of precision of astigmatism measurements taken by a sweptsource optical coherence tomography biometer - IOLMaster 700. *Indian J Ophthalmol*, 2021, 69(7):1760-1765.

[29] 柴华, 郑吉琦, 苏兰萍. 新型 SS-OCT 与 Scheimpflug 眼前节分析仪测量年龄相关性白内障患者角膜屈光力及散光的一致性. *国际眼科杂志*, 2023, 23(2):273-277.

[30] 周桂梅, 谭青青, 廖莹, 等. 眼前段光学相干断层扫描仪 CASIA2 测量白内障患者角膜曲率和散光的重复性和再现性. *眼科新进展*, 2021, 41(5):466-469.

[31] Shoji T, Kato N, Ishikawa S, et al. Association between axial length and *in vivo* human crystalline lens biometry during accommodation: a swept-source optical coherence tomography study. *Jpn J Ophthalmol*, 2020, 64(1):93-101.

[32] Georgiev S, Ruiss M, Dana-Fisus A, et al. Comparison of corneal aberrations from anterior segment swept source OCT versus Placido-topography combined spectral domain OCT in cataract patients. *Eye Vis*, 2023, 10(1):30.

[33] Goggin M, Zamora-Alejo K, Esterman A, et al. Adjustment of anterior corneal astigmatism values to incorporate the likely effect of posterior corneal curvature for toric intraocular lens calculation. *J Refract Surg*, 2015, 31(2):98-102.

[34] Srivannaboon S, Chirapapaisan C. Comparison of refractive outcomes using conventional keratometry or total keratometry for IOL power calculation in cataract surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2019, 257(12):2677-2682.

[35] Athukorala S, Kansara N, Lehman E, et al. Correlation between keratometric and refractive astigmatism in pseudophakes. *Clin Ophthalmol*, 2021, 15:3909-3913.

[36] Muzyka-Woźniak M, Oleszko A, Grzybowski A. Measurements of anterior and posterior corneal curvatures with OCT and scheimpflug biometers in patients with low total corneal astigmatism. *J Clin Med*, 2022, 11(23):6921.

[37] Rémygnon CH, Levron A, Agard E, et al. Impact of total corneal astigmatism estimated with the abulafia-Koch formula versus measured with a SS-OCT biometer on the refractive outcomes of a toric intraocular lens in cataract surgery. *J Refract Surg*, 2023, 39(3):171-179.

[38] Chai FY, Ma JX, Wang XG, et al. Total keratometry for toric intraocular lens calculation: comparison from two swept-source optical coherence tomography biometers. *Front Med*, 2023, 10:1276186.

[39] Gharaee H, Sedaghat MR, Sadeghi J, et al. Comparing morphologic features and complications of main clear corneal incision between junior and senior residents observed using anterior segment

optical coherence tomography. *Med Hypothesis Discov Innov Ophthalmol*, 2023,12(1):18–27.

[40] Yang F, Chang Y, Yang L, et al. Evaluation of the repeatability of optical coherence tomography in patients with age-related cataract associated with dry eye. *Int Ophthalmol*, 2023,43(1):233–238.

[41] 张冰洁, 孙恒, 张远平, 等. 角膜移植的研究进展. *国际眼科杂志*, 2015,15(6):989–992.

[42] Armitage WJ, Goodchild C, Griffin MD, et al. High-risk corneal transplantation: recent developments and future possibilities. *Transplantation*, 2019,103(12):2468–2478.

[43] Janunts E, Langenbucher A, Seitz B. *In vitro* corneal tomography of donor Cornea using anterior segment OCT. *Cornea*, 2016,35(5):647–653.

[44] Kaluzny BJ, Mlyniuk P, Liberski S, et al. Swept-source OCT for corneal graft quantitative evaluation in the eye bank and the correlation of the measurements to pre-excision values. *Sci Rep*, 2022,12:14834.

[45] Romano V, Iovieno A, Parente G, et al. Long-term clinical outcomes of deep anterior lamellar keratoplasty in patients with keratoconus. *Am J Ophthalmol*, 2015,159(3):505–511.

[46] Pasricha ND, Shieh C, Carrasco-Zevallos OM, et al. Needle depth and big-bubble success in deep anterior lamellar keratoplasty: an *ex vivo* microscope-integrated OCT study. *Cornea*, 2016,35(11):1471–1477.

[47] Bhullar PK, Carrasco-Zevallos OM, Dandridge A, et al. Intraocular pressure and big bubble diameter in deep anterior lamellar keratoplasty: an *ex vivo* microscope-integrated OCT with heads-up display study. *Asia Pac J Ophthalmol*, 2017,6(5):412–417.

[48] Satue M, Idoipe M, Sanchez-Perez A, et al. Evaluation of early graft detachment after descemet membrane endothelial keratoplasty using new swept-source optical coherence tomography. *Cornea*, 2016,35(10):1279–1284.

[49] 周雪琼, 戴至豪, 吴元. 圆锥角膜诊治技术的进展. *中国斜视与小儿眼科杂志*, 2021,29(2):41–44,19.

[50] Belin MW, Jang HS, Borgstrom M. Keratoconus: diagnosis and staging. *Cornea*, 2022,41(1):1–11.

[51] Esaka Y, Kojima T, Dogru M, et al. Prediction of best-corrected visual acuity with swept-source optical coherence tomography parameters in keratoconus. *Cornea*, 2019,38(9):1154–1160.

[52] Kamiya K, Ayatsuka Y, Kato Y, et al. Keratoconus detection using deep learning of colour-coded maps with anterior segment optical coherence tomography: a diagnostic accuracy study. *BMJ Open*, 2019,9(9):e031313.

[53] Fujimoto J, Swanson E. The development, commercialization, and impact of optical coherence tomography. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2016,57(9):OCT1–OCT13.

[54] Yousefi S, Yousefi E, Takahashi H, et al. Keratoconus severity identification using unsupervised machine learning. *PLoS One*, 2018,13(11):e0205998.

[55] Kim KY, Lee S, Jeon YJ, et al. Anterior segment characteristics in normal and keratoconus eyes evaluated with a new type of swept-source optical coherence tomography. *PLoS One*, 2022,17(9):e0274071.

[56] Fujimoto H, Maeda N, Shintani A, et al. Quantitative evaluation of the natural progression of keratoconus using three-dimensional optical coherence tomography. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2016,57(9):OCT169–OCT175.

[57] Saad A, Debellemanière G, Debellemanière G, et al. Discrimination between keratoconus, forme fruste keratoconus, and normal eyes using a novel OCT-based tomographer. *J Cataract Refract Surg*, 2023,49(11):1092–1097.

[58] Fassbind B, Langenbucher A, Streich A. Automated cornea diagnosis using deep convolutional neural networks based on cornea topography maps. *Sci Rep*, 2023,13(1):6566.

[59] Ghassemi H, Zarei-Ghanavati M, Khastavan M, et al. Agreement between swept-source optical coherence tomography and rotating scheinplugg camera in measurement of corneal parameters in normal and keratoconic eyes. *J Ophthalmic Vis Res*, 2023,18(4):386–395.

[60] Wang YM, Chan TC, Yu MCY, et al. Comparative evaluation of progression rate in keratoconus before and after collagen crosslinking. *Br J Ophthalmol*, 2018,102(8):1109–1113.

[61] Steinberg J, Casagrande MK, Frings A, et al. Screening for subclinical keratoconus using swept-source Fourier domain anterior segment optical coherence tomography. *Cornea*, 2015,34(11):1413–1419.

[62] Mas Tur V, MacGregor C, Jayaswal R, et al. A review of keratoconus: Diagnosis, pathophysiology, and genetics. *Surv Ophthalmol*, 2017,62(6):770–783.

[63] de Stefano VS, Ford MR, Seven I, et al. Depth-dependent corneal biomechanical properties in normal and keratoconic subjects by optical coherence elastography. *Transl Vis Sci Technol*, 2020,9(7):4.

[64] Monteiro T, Alfonso JF, Franqueira N, et al. Predictability of tunnel depth for intrastromal corneal ring segments implantation between manual and femtosecond laser techniques. *J Refract Surg*, 2018,34(3):188–194.

[65] Lisch W, Weiss JS. Early and late clinical landmarks of corneal dystrophies. *Exp Eye Res*, 2020,198:108139.

[66] Arnalich-Montiel F, Ortiz-Toquero S, Auladell C, et al. Accuracy of corneal thickness by swept-source optical coherence tomography and scheinplugg camera in virgin and treated fuchs endothelial dystrophy. *Cornea*, 2018,37(6):727–733.

[67] Nowińska A, Chlasta-Twardzik E, Dembski M, et al. Corneal analysis with swept source optical coherence tomography in patients with coexisting cataract and fuchs endothelial corneal dystrophy. *Diagnostics*, 2021,11(2):223.

[68] Eker S, Oflaz AB, Bozkurt B. Anterior segment swept source optical coherence tomography and *in vivo* confocal microscopy findings in a case with bleb-like epithelial basal membrane dystrophy. *Cornea*, 2023,42(8):1049–1051.

[69] Mori H, Miura M, Iwasaki T, et al. Three-dimensional optical coherence tomography-guided phototherapeutic keratectomy for granular corneal dystrophy. *Cornea*, 2009,28(8):944–947.

[70] Hattori T, Kumakura S, Mori H, et al. Depiction of cavity formation in Terrien marginal degeneration by anterior segment optical coherence tomography. *Cornea*, 2013,32(5):615–618.

[71] Papamichael E, Logeswaran A, Papastefanou VP, et al. Evaluation and management of a spontaneous corneal rupture secondary to pellucid marginal degeneration, using swept-source anterior segment optical coherence tomography. *Oxf Med Case Reports*, 2021,2021(3):omab003.

[72] Shimizu E, Yamaguchi T, Tsubota K, et al. Corneal higher-order aberrations in eyes with corneal scar after traumatic perforation. *Eye Contact Lens*, 2019,45(2):124–131.

[73] 纪风涛, 王慧, 魏科, 等. SS-OCTA 评估增殖性糖尿病视网膜病变玻璃体切除术后黄斑微血管的变化. *国际眼科杂志*, 2023,23(5):747–753.

[74] Zheng Q, Hu M, Li ZL, et al. Assessment of anterior chamber angle changes after phacoemulsification with swept-source OCT. *Int J Ophthalmol*, 2021,14(10):1527–1532.