

光学相干断层扫描血管成像在眼科中的应用进展

薛佳佳, 汤永强*

重庆医科大学附属第二医院眼科, 重庆

收稿日期: 2025年12月21日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月23日

摘要

光学相干断层扫描血管成像(OCTA)是近年来日趋兴起的无创性眼科影像学检查,其通过获取红细胞的运动对比,可清晰呈现出眼底血管结构和血流情况。OCTA凭借非侵入性、快速扫描、高分辨率、三维成像等核心优势,目前已成为眼部多种疾病(尤其是眼底疾病)诊疗的关键工具。此外,OCTA也可用于眼前节疾病的诊断和治疗效果的评估,如评估角膜新生血管的治疗效果、鉴别良恶性眼表肿瘤等。同时,OCTA与人工智能相结合对疾病的早期识别、诊断和疗效评估方面 also 具有重要作用。本文将围绕OCTA技术在眼科临床实践中的应用现状与进展进行综述。

关键词

光学相干断层扫描血管成像, 眼部疾病, 眼底血管造影, 人工智能, 诊断, 价值

Application Progress of Optical Coherence Tomography Angiography in Ophthalmology

Jiajia Xue, Yongqiang Tang*

Department of Ophthalmology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: December 21, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 23, 2026

Abstract

Optical Coherence Tomography Angiography (OCTA) is a non-invasive ophthalmic imaging examination

*通讯作者。

文章引用: 薛佳佳, 汤永强. 光学相干断层扫描血管成像在眼科中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(1): 2246-2258. DOI: 10.12677/acm.2026.161283

that has become increasingly popular in recent years. By obtaining the movement comparison of red blood cells, it can clearly present the structure and blood flow conditions of the fundus. With core advantages including non-invasiveness, rapid scanning, high resolution, and three-dimensional imaging, OCTA has now become a key tool for the diagnosis and treatment of various ocular diseases (particularly fundus diseases). Additionally, OCTA can be applied to the diagnosis of anterior segment diseases and the evaluation of treatment outcomes—such as assessing therapeutic efficacy for corneal neovascularization, and differentiating between benign and malignant ocular surface tumors. Meanwhile, the combination of OCTA and artificial intelligence plays an important role in the early identification, diagnosis, and treatment effect evaluation of diseases. This article provides a review of the current clinical applications and recent advancements of OCTA in ophthalmic practice.

Keywords

Optical Coherence Tomography Angiography, Ocular Diseases, Fundus Angiography, Artificial Intelligence, Diagnosis, Value

Copyright © 2026 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

Huang 等[1]人于 1991 年首次提出光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)技术,自此眼科临床进入了无创性观察眼底精细结构的新时代,且随着 OCT 技术的不断优化,已从初代时域 OCT,发展至基于傅立叶域探测的光谱域 OCT (spectral domain OCT, SD-OCT)及组织穿透力与分辨率更优的扫频源 OCT (swept-source OCT, SS-OCT) [2] [3]。与此同时,随着临床诊疗需求的不断提高以及对眼部多种疾病发生发展机制的深入研究,目光聚焦于观察眼底血管的变化。在此之前,相关研究利用多普勒 OCT 与时域 OCT 进行血管可视化[4],这被称为光学多普勒断层扫描,其主要应用于皮肤血管的成像。Makita 等[5]于 2006 年首次利用“光学相干造影术”对人眼血管系统进行可视化成像。随着技术的不断进步,2014 年美国发布第一台商业 OCTA 产品,该产品的研发基于 SD-OCT 技术[6]。目前临床上应用较为广泛的 OCTA 主要是 SD-OCTA 和 SS-OCTA。OCTA 技术兼具非侵入性、快速扫描、高分辨率及三维成像等优势,能快速清晰地呈现视网膜与脉络膜微小血管的分层成像,且直观地识别出不同血管层的病变差异,为眼底血管疾病的早期诊断提供关键证据。当然,眼底血管造影(fundus angiography, FA)也是用来诊断眼底疾病的方法之一,不过相较于 FA, OCTA 则具备以下突出优势: (1) 非侵入性,无不良反应发生,适用范围更广[7]; (2) 检查快速高效,操作便捷,可实现视网膜、脉络膜不同血管层次的三维成像,清晰显示微血管细节; (3) 对血管密度、面积及无灌注区面积等进行精确量化,对早期微血管病变更为敏感[8]。

2. OCTA 关键技术细节: 设备类型比较、伪影控制与量化指标规范

2.1. OCTA 设备核心类型及技术差异

2.1.1. 不同类型 OCTA 技术原理

SD-OCTA 是以宽光谱光源为基础,通过光谱仪分行采集干涉光信号,利用傅立叶变换将光谱信息转换为深度信息,进而生成二维断层图像[9]。其血管成像依赖于血流运动,通过检测相邻 B 扫描间的信号强度变化,区分血流区域与静态组织,从而重构视网膜、脉络膜血管的三维结构。因该技术的设备结构

相对成熟, 成本可控, 目前已广泛用于临床常规筛查。而 SS-OCTA 采用扫频光源, 通过快速扫描覆盖宽光谱范围, 无需光谱仪分行采集[9]。其血流成像机制与 SD-OCTA 一致, 但扫频源的高帧率特性使数据采集效率大幅提升, 可在极短时间内完成大范围扫描。此外, SS-OCTA 多采用 1050 nm 长波长光源, 在组织穿透深度和信号稳定性方面具有独特优势[10], 更适合深层血管结构的成像分析。

2.1.2. SD-OCTA 与 SS-OCTA 关键性能对比

在成像速度方面, SD-OCTA 依赖光谱仪分行采集数据, 成像帧率通常为 70~147 kHz; 而 SS-OCTA 帧率可达 100~200 kHz (实验系统可达 1.6~1.7 MHz)[11]。高帧率使 SS-OCTA 能显著减少眼球运动伪影, 尤其适用于儿童、老年或配合度较差的患者。在空间分辨率方面, 两者横向分辨率差异较小, 主要受探头设计和扫描模式影响, 对黄斑区微小血管病变的检测灵敏度无显著差异; 但在轴向分辨率方面, SS-OCTA 凭借扫频光源的宽光谱带宽优势, 可达 1~3 μm , 优于 SD-OCTA 的 3~5 μm , 更有利于区分视网膜浅层毛细血管丛(superficial capillary plexus, SCP)和深层毛细血管丛(deep capillary plexus, DCP)的精细血管结构[12]。在组织穿透深度方面, SS-OCTA 的 1050 nm 长波长对视网膜色素上皮层(Retinal pigment epithelium, RPE)及脉络膜组织的散射吸收更少[12]。因此 SS-OCTA 更适合检测脉络膜新生血管(如年龄相关性黄斑变性)、脉络膜萎缩等眼底病变。

2.2. OCTA 图像伪影的类型、成因及识别方法

2.2.1. 运动伪影

引起运动伪影的原因有很多, 包括眼球无意识运动、眼睑颤动、头部晃动以及呼吸节律引发的躯干振动等[13]。在儿童、老年患者或焦虑人群中, 伪影风险显著升高[13]。其图像的特征性表现为血管走行断裂、扭曲或重复成像, 视网膜层间结构错位, 图像边缘出现“拖尾”或“锯齿状”伪影, 见图 1。

2.2.2. 投影伪影

投影伪影是指光信号在视网膜多层结构穿透时的叠加效应, 即 SCP 或视网膜大血管的血流信号, 被误判为 DCP 或脉络膜层的血流信号。尤其是黄斑中心凹周围或视盘旁大血管区域, 投影伪影发生率显著升高[14]。其图像典型表现为深层血管图像中出现与浅层血管走形完全一致的“镜像样”血管影, 且伪影血管与真实深层血管无分支连接, 呈“漂浮状”, 见图 2。

2.2.3. 信号衰减伪影

信号衰减伪影是指光信号在传播路径中被吸收或散射导致的信号强度下降[14], 主要诱因包括屈光介质混浊、RPE 色素沉着或萎缩、脉络膜增厚或纤维化等[15]。其在图像上表现为图像局部或整体亮度降低、血管信号模糊甚至消失。在屈光介质混浊的相关伪影中, 图像边缘呈现出“雾状”模糊, 血管轮廓难以分辨, 见图 3; RPE 相关伪影则多局限于黄斑区, 表现为局部血管信号中断, 与 RPE 病变范围一致[15]。

2.2.4. 其它常见伪影

比如噪声伪影、配准伪影及血流信号溢出伪影等[16]。噪声伪影源于设备探测器的电子噪声、光源稳定性波动或低信号强度下的图像干扰, 在扫描区域边缘、屈光介质混浊患者或低功率扫描模式中更易出现。其识别特征为图像中分布不规则的“颗粒状”或“斑点状”噪声点, 无明确血管走形规律, 信号强度忽高忽低[14]。配准伪影是 OCTA 成像需对多次扫描的 B 扫描图像进行配准叠加, 当眼球运动幅度超过配准算法补偿范围, 会导致配准失败, 出现层间错位或重复成像。识别特征为视网膜层间结构出现“双线征”或“错位征”。血流信号溢出伪影是指大血管血流信号过强, 向周围无血管区域扩散, 识别特征为大血管周围出现“光晕状”信号延伸[14]。

2.2.5. 伪影示意图

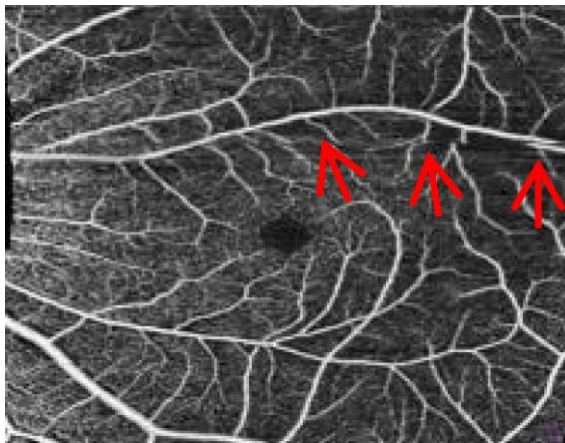


Figure 1. Motion artifacts (red arrows)
图 1. 运动伪影(红色箭头)

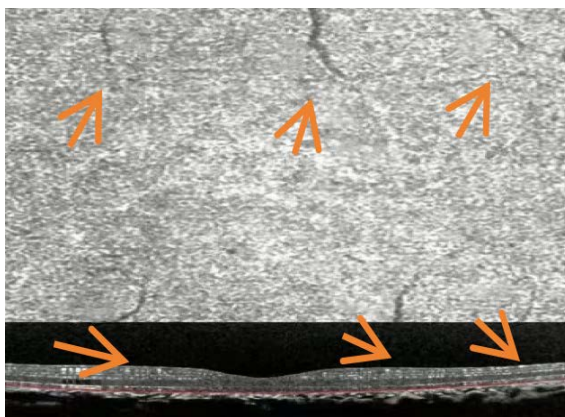


Figure 2. Projection artifacts (orange arrows)
图 2. 投影伪影(橙色箭头)

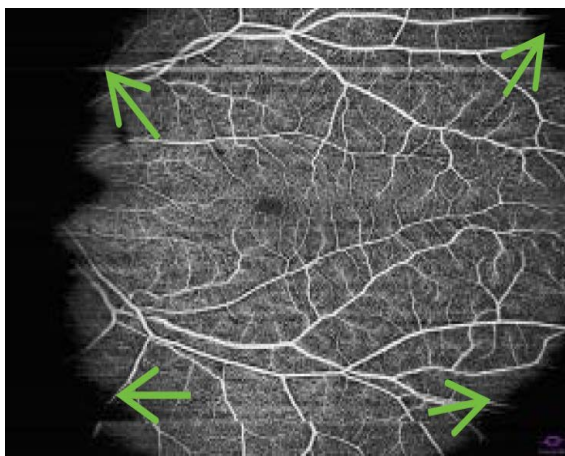


Figure 3. Signal attenuation artifact (green arrows)
图 3. 信号衰减伪影(绿色箭头)

2.3. OCTA 主流量化指标的定义、计算方法与设备间可比性

2.3.1. 血管密度

血管密度(vascular density, VD)是指特定区域内血管的占比, 是反映视网膜、脉络膜微循环灌注状态的核心指标, 临床中以黄斑区和视盘周围区域为主要测量部位[17]。计算方法主要包括面积法和长度法: 面积法通过图像分割算法提取血管区域的像素面积, 除以总测量区域面积, 是目前大多设备的默认计算方式, 其优势在于操作简单、重复性高; 长度法则是通过测量区域内所有血管的总长度, 除以区域面积, 这更能反映血管分支的密集程度, 但受血管直径阈值设定影响较大。

2.3.2. 灌注密度

[18]灌注密度(perfusion density, PD)是指在一定扫描范围内, 被血流所占据的面积比例, 其核心是在血管形态识别的基础上, 进一步筛选出具有有效血流信号的血管区域, 更能反映微循环的功能状态。其计算逻辑为通过血流信号强度阈值筛选, 提取灌注血流的像素面积或长度, 除以总测量区域面积。

2.3.3. 黄斑无血管区参数

黄斑无血管区(foveal avascular zone, FAZ)是黄斑中心凹处无毛细血管分布的圆形或椭圆形区域, 位于 SCP 层, 是反映黄斑微循环完整性的关键指标, 核心参数包括面积、周长、圆形度和偏心指数[19]。其中[19] FAZ 面积指 FAZ 边界包围的区域面积, FAZ 周长指 FAZ 边界总长度, 这两种参数设备可以自动测量, 其通过血管分割算法自动识别 FAZ 边界, 生成参数值[19]; FAZ 圆形度指数(circularity index, CI)反映 FAZ 形态规则性, 计算公式为 $CI = 4\pi \times \text{面积} / \text{周长}^2$ [20]。FAZ 偏心指数(eccentricity index, EI)反映 FAZ 中心与黄斑中心凹的偏移程度, 计算公式为: $EI = 1 - (\text{短轴长度} / \text{长轴长度})$, EI 值约接近 0, 表示 FAZ 形状越接近圆形。

2.3.4. 量化指标在不同 OCTA 设备间的可比性分析

不同设备的核心技术参数不同, 导致量化指标(VD、FAZ 面积等)存在差异[21]: 光源波长影响组织穿透深度和信号采集效率; 血管分割算法差异导致血管区域识别精度不同; 扫描模式、采样密度等也会影响测量的结果; 量化指标定义的细微差异也会导致结果偏差。此外, 设备的校准状态、操作人员的扫描技巧等也会进一步放大设备间的差异。同类设备的一致性高于不同类型设备[22]: VD 测量的组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)在同类设备中大于 0.8, 一致性较好, 而在不同类型设备中 ICC 值略低[23]。FAZ 面积的一致性略低, ICC 约为 0.75~0.90。PD 的设备间一致性最差, ICC 约为 0.65~0.80 [24]。

3. OCTA 在眼科临床的应用

3.1. 眼底疾病

3.1.1. OCTA 在脉络膜新生血管中的应用

脉络膜新生血管(Choroidal neovascularization, CNV)是脉络膜疾病中最为常见的病理改变, 可继发于年龄相关性黄斑变性(Age-related macular degeneration, ARMD)、特发性脉络膜新生血管(Idiopathic choroidal neovascularization, ICNV)等多种眼底疾病[25]。由于 CNV 常累及黄斑区, 表现出视力下降、视物变形等症状, 患者的生活质量显著下降。Koutsiaris 等[26]发现 OCTA 识别高度近视继发 CNV (myopia CNV, mCNV)的敏感性高达 94.10%, 特异性最高可达 100.00%。陈昌熙等[27]经过荟萃分析发现, OCTA 在 AMD 患者中检测 CNV 的特异性处于极高水平, 这与 Koutsiaris 等[26]的研究结论相一致。Iacono 等[28]发现在病理性近视(pathologic myopia, PM)所致 CNV 的诊断及治疗监测中, OCTA 与荧光素血管造影(fundus fluorescein angiography, FFA)具有较好的一致性。这表明 OCTA 在识别 CNV 方面具有良好的应用

前景。马野川等[29]通过 OCTA 观察抗血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)治疗 mCNV 前后脉络膜微循环的变化, 发现 OCTA 不仅能识别 mCNV 的类型, 还验证了玻璃体腔注射雷珠单抗治疗 mCNV 的安全性与有效性。上述研究结果表明 OCTA 在抗 VEGF 治疗 CNV 的临床疗效评估中具有显著价值。Heinke 等[30]利用 OCTA 与人工智能(Artificial Intelligence, AI)相结合, 评估 ARMD 继发的难治性 CNV 玻璃体腔注射法瑞西单抗的疗效, 发现与治疗前相比, 治疗后视网膜内及视网膜下液体、色素上皮分离的体积均呈现下降趋势, 这不仅证明法瑞西单抗对难治性 CNV 具有良好的临床疗效, 同时也表明 AI 可以用来辅助评估抗 VEGF 治疗 CNV 的效果。

3.1.2. OCTA 在糖尿病视网膜病变中的应用

近年来, 随着糖尿病患病率的增长, 糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)的发生率也随之上升, 且呈现出明显的年轻化趋势[31]。DR 是临床上最常见的视网膜血管病, 眼底常有以下表现, 包括微血管瘤、硬性及软性渗出、无灌注区和新生血管(neovascularization, NV)等[31]。由于 DR 早期患者多无明显症状, 多数患者因视力下降而就诊时, 病情往往已发展至增殖期[32]。因此, 实现 DR 早期诊断与治疗具有重要意义。齐志浩等[33]通过 OCTA 在无 DR (NDR)组、轻度非增殖性 DR (NPDR)组及对照组中进行对比, 研究发现与对照组相比, 中大脉络膜血管的 VD 在 NDR 组呈现显著下降趋势, 而轻度 NPDR 未见明显异常。同时, 与对照组相比, SCP 及 DCP 的 VD 在轻度 NPDR 组中显著减少, 而 NDR 组未见明显异常。因此得出在 DR 出现以前糖尿病就已经影响了视网膜及脉络膜血管, 且对脉络膜血管的影响发生在视网膜之前, 这也进一步表明 OCTA 能够检测出更早期细微的视网膜及脉络膜微血管病变。FFA 作为诊断 DR 的金标准[34], 因有创、耗时久且无法实现眼底血管三维成像, 在临床应用中存在一定局限, 而 OCTA 恰好弥补这些不足, 使其在 DR 的诊断及评估治疗疗效中具备突出优势。李小凤等[34]应用 OCTA 和 FFA 对 DR 患者的眼底病变进行对比, 发现 OCTA 与 FFA 在 DR 患者部分眼底病变的检出具有较高的一致性。杨燕燕等[35]人通过比较 FFA 与 OCTA 识别重度 NPDR 及 PDR 患者中的 NV, 与李小凤等[34]研究结果一致; 且他们的研究结果还发现, 相较于 FFA, OCTA 更易检测出抗 VEGF 治疗后的微小 NV, 因此在检测和随访 DR 患者 NV 方面 OCTA 更有优势。同时, [36]有相关研究发现通过 OCTA 与 AI 两者相结合, 发现能够以较高的准确率、灵敏度和特异性识别早期 DR, 并对 NPDR 病情严重程度进行分类。上述研究证明 OCTA 不仅能早期识别 DR, 且与 AI 联合应用对 DR 病情严重程度的评估均具有重要意义。

3.1.3. OCTA 在视网膜静脉阻塞中的应用

视网膜静脉阻塞(Retinal vein occlusion, RVO)也是目前临床上常见的视网膜血管病变之一。根据阻塞发生部位, 可分为视网膜中央静脉阻塞(Central RVO, CRVO)和视网膜分支静脉阻塞(Branch RVO, BRVO)[37]。RVO 的眼底表现包括静脉迂曲扩张、视网膜出血、黄斑水肿及渗出等。Moussa 等[38]通过对比 FFA 与 OCTA 在评估 RVO 患眼中的灌注状态, 发现 OCTA 在识别微血管异常、测量 FAZ 面积、视网膜毛细血管非灌注区域定位以及高分辨率呈现上述区域细节等方面, 均表现出比 FFA 更突出的优势。朱紫怡等[39]采用 OCTA 比较 RVO 患眼与健康眼之间黄斑区血流灌注状态与最佳校正视力(Best-Corrected Visual Acuity, BCVA)的相关性, 研究发现, 与健康眼相比, RVO 组黄斑区 SCP 及 DCP 的 VD 显著降低, 且与 BCVA 呈负相关。当然, OCTA 不仅能够对不同深度的视网膜毛细血管密度进行可视化, 还可实现对治疗效果的动态监测。冯美任等[40]利用 OCTA 评估 RVO 继发黄斑水肿(Macular edema, ME)进行抗 VEGF 与地塞米松植入联合治疗后的疗效, 发现两组患者联合治疗后 BCVA 与视网膜 VD 均得到明显改善。这表明抗 VEGF 联合地塞米松植入治疗 RVO-ME 具有良好的临床疗效。

3.1.4. OCTA 在高度近视中的应用

目前近视已成为全球重大公共问题[41], 呈现发病率激增、低龄化加剧、高度近视(High myopia, HM)

风险增加的趋势。HM 是指等效球镜 $> -6.00\text{D}$ 的屈光状态, 且随着屈光程度的不断加深, 可能会发展成为 PM, 继而出现一系列眼部病理性损伤, 如豹纹状眼底、视网膜劈裂、黄斑变性、CNV、脉络膜萎缩等[42]。俞灏等[43]的研究发现与非 HM 组相比, HM 组的视网膜 SCP、DCP 的 VD 在除黄斑中心凹外的区域均表现为降低, 同时总体及表层 FAZ 体积明显增大, 且首次揭示眼轴长度(Axial length, AL)与 FAZ 体积呈正相关。这表明 OCTA 不仅可以捕捉近视患者视网膜、脉络膜血管变化, 且可以为研究 HM 的发展探索新的观察指标。Alshareef 等[44]的研究发现, 近视眼脉络膜毛细血管层、中血管层的 VD 显著下降, 而大血管层的 VD 与正视眼相比无统计学差异。这一结果提示, 脉络膜厚度变薄可能与中小血管萎缩引起的血流灌注不足有关。Liu 等[45]通过 OCTA 发现, HM 会使黄斑区脉络膜产生特征性结构改变, 表现为黄斑中心凹及黄斑区域的脉络膜血管指数(Choroidal vessel index, CVI)、脉络膜血管体积(Choroidal vessel volume, CVV)、脉络膜基质体积均显著降低, 同时脉络膜厚度也随之变薄。上述研究表明 OCTA 可以用来观察 HM 患者视网膜、脉络膜的血流变化[46][47]。另外有研究发现近视性黄斑病变的严重程度可以用来评估 PM 的进展, 且深度学习(deep learning, DL)模型对识别近视性黄斑病变具有较高的灵敏度及特异性, 这些研究成果表明早期检测近视性黄斑病变的病灶、合理利用 DL 模型等, 有助于保护 HM 的视力, 且对 PM 的临床诊断和大规模筛查具有重要意义。

3.2. OCTA 在青光眼中的应用

青光眼是全球不可逆致盲性眼病之一, 以视神经进行性萎缩和特征性视野缺损为典型表现[48]。早发现早诊断早治疗, 对延缓病情进展, 并尽可能保留患者的视功能具有重要意义。Hsia 等[49]借助 OCTA, 分析进展期及重度青光眼患者黄斑微血管系统与视力(vision acuity, VA)之间的关联。结果显示: 进展期青光眼组中, 黄斑区表层、深层的 VD 与 VA 的相关性最为显著; 在重度青光眼组中, 鼻侧深层网格区 VD 与 VA 相关性最高。与其它血管参数相比, 深层黄斑 VD 与 VA 的相关性最高。以上结果表明深层黄斑 VD(尤其是鼻侧深层网格区 VD), 有望成为评估重度青光眼的潜在结构指标[50]。在一项探讨青光眼进展风险的纵向随访研究中发现: 黄斑和视乳头周围 VD 越低, 轻至中度青光眼的视网膜神经纤维层(Retinal nerve fiber layer, RNFL)厚度进展速度越快。他们的研究还发现, 这种相关性与基线 RNFL 厚度无关。表明 OCTA 有望为评估青光眼进展、预测病情恶化速度等方面提供参考。Yospon 等[51]采用 OCTA 技术, 对比健康眼、青光眼疑似眼及青光眼患眼在视神经与视盘周围区域的血管灌注密度(Vessel perfusion density, VPD)及血流指数(Flux index, FI)的差异, 发现青光眼患眼的平均 VPD、各象限 VPD 及 FI, 均显著低于健康眼与青光眼疑似眼; 且重度青光眼患眼的平均 VPD、FI 水平进一步低于轻、中度青光眼患眼, 这些研究结果表明视神经及视盘周围区域血管密度与青光眼病情的严重程度相关。Pourjavan 等[52]研究将 OCT、OCTA 与 AI 相结合, 提出了预测眼龄的生物模型, 该项研究为多模态成像对早期青光眼风险分层提供了初步证据。表明在不久的将来 OCTA 与 AI 结合可以更好地识别青光眼的早期特征, 对提升诊断效率和更早的治疗具有重大意义[53]。有研究发现利用 DL 技术模型在区分青光眼和健康眼时表现出高灵敏度和特异性, 且可以实现自动化青光眼筛查, 适用于大规模人群筛查和早期诊断; 另外该研究还发现, 在黄斑和视盘区域评估中, OCTA 单独使用优于 OCT/OCTA 联用。该发现证实, OCTA 提供的微血管血流信息是早期检测青光眼的关键因素。

3.3. OCTA 在眼前节疾病中的应用

OCTA 因能清晰显示视网膜、脉络膜血管而成为眼底疾病诊疗的核心工具。随着分辨率的不断提升, 其应用范围逐渐突破眼后段, 向解剖结构更复杂、血管网络更精细的眼前节拓展, 与临床对“无创、实时、高分辨率显示眼前节血管”的需求相契合[54]。现阶段, 裂隙灯摄影(slit-lamp photography, SLP)与 FA

仍然是眼前节血管评估的核心临床手段, 其中 SLP 是最为常用的检查方式[55]。不过, 二者均存在局限: SLP 在角膜伴随水肿、沉积物或瘢痕时, 血管可视化能力显著降低; FA 虽能精准评估正常与病变血管, 但因有创性、造影剂渗漏风险等, 使其临床应用范围受到限制。Stanzel 等[56]的研究证实, OCTA 不仅可以识别出 SLP 所遗漏的细小退行性血管, 且相较于吲哚菁绿血管造影(indocyanine green angiography, ICGA), OCTA 对这类血管的成像效果更具优势。Ang 等[57]的研究则进一步补充了相关证据, 指出 OCTA 获取的图像质量与 ICGA 和 FFA 的图像处于相当水平。Roberts 等[58]研究发现 OCTA 不仅可以无创性、高分辨率识别虹膜血管结构, 还可用于虹膜新生血管(Iris NV, INV)的分期评估。Devarajan 等[59]对比 OCTA 与 ICGA 监测角膜新生血管(corneal NV, CoNV)抗 VEGF 治疗的反应, 结果显示二者在 CoNV 消退的检测上效果相近。Foo 等[60]人以存在 CoNV 和角膜疤痕的人眼为研究对象, 通过 OCTA 评估抗 VEGF 对眼部新生血管(ocular neovascular disease, FND)的治疗反应, 研究结果显示 CoNV 的消退和角膜疤痕面积均呈降低趋势。Shiozaki 等[61]研究证实 SS-OCTA 可识别传统检查易漏诊的亚临床残留的 INV, 且抗 VEGF 治疗后 INV 的 VD 均下降。上述研究均证实 OCTA 可监测抗 VEGF 对 FND、INV 血管的治疗效果。Liu 等[62]的研究结果表明, 眼表鳞状细胞癌(ocular surface squamous, OSSN)患者的上皮下组织及肿瘤结膜成分下方组织中的血管面积密度(vascular area density, VAD)显著高于未受累眼。Binotti 等[63]通过 OCTA 技术, 对比良、恶性病变之间的血管参数, 发现恶性病变病灶周围血管在深度和直径上均大于其它病变, 这一特点或许可作为鉴别病变良恶性的潜在指标。Theotoka 等[64]则通过 OCTA 监测 OSSN 的治疗反应, 观察到治疗过程中上皮下 VAD 及最终 VAD 均呈显著降低趋势。上述研究提示, 借助 OCTA 对肿瘤血管密度进行评估, 有望成为恶性肿瘤分级的辅助手段。

3.4. OCTA 在眼球发育与屈光状态监测中的应用

在儿童和青少年眼球发育过程中, OCTA 能够精确评估视网膜和脉络膜的结构和血流变化[65]。研究发现, 儿童屈光度从远视向近视方向发展时, 眼轴逐渐变长, 同时黄斑中心凹及周围脉络膜厚度随之变薄。脉络膜作为视网膜的主要供血系统, 其血流灌注状态直接影响视网膜和巩膜的氧合水平[66]。研究表明, 脉络膜血流减少可能会导致巩膜缺氧, 进而触发近视发展的信号通路。OCTA 能够量化脉络膜毛细血管层血流灌注面积和 CVV, 为近视发展机制研究提供新视角[67]。随着近视程度加深, 黄斑区视网膜毛细血管 VD 减少, ChT 变薄。HM 患者 SCP 和 DCP 的 VD 均显著低于正视眼, 且 FAZ 面积增大[68][69]。目前对于儿童近视防控主要包括增加户外活动时间、配戴角膜塑形镜(Orthokeratology lens, OK 镜)、使用低浓度阿托品等[70]。Diao K 等[71]研究发现 OCTA 对视网膜、脉络膜 VD 及 FAZ 相关参数检测的可重复性方面具有良好的一致性。表明 OCTA 在探索近视发生发展的过程中具有潜力。谢意等[72]发现低中度近视青少年佩戴 OK 镜 2 周及 1 月后视网膜血流 VD 较前升高, 表明 OK 镜可以有效改善近视患者视网膜微循环状态。郑卓涛等[73]通过研究发现使用低浓度阿托品滴眼液后黄斑部微血管系统的 VD 均较前增加, 且 ChT 增厚明显, 证明局部使用低浓度阿托品滴眼液同样可以改善视网膜微循环, 延缓近视的进展。王慧航等[74]研究发现重复低水平红光治疗可以显著升高 CVV、ChT、降低 CVI。[75][76]既往研究发现机器学习可以预测角膜塑形镜治疗的反应和治疗效果, 且都获得了较好的矫正效果。Qi 等[77]人提出了 DeepMyopia 深度学习系统, 该系统不仅可预测儿童近视发生的风险, 还可以模拟评估干预措施的效果。综上, OCTA 技术可以评估不同近视防控方法的干预效果, 其与 AI 的联合应用可帮助临床医师对近视的发展及病情做出更准确的诊断。

4. 总结与展望

OCTA 作为 OCT 技术的改进与创新, 以无创性、快速扫描、高分辨率、三维血管成像的优势, 已广

泛应用于眼部多种疾病。其不仅可清晰地呈现眼底血管,且弥补了 FA 的不足,更好地对眼部疾病进行诊断和治疗,并不断深入了解疾病的发生发展机制,探索出个体化治疗方案。与此同时,OCTA 与 AI 的联合应用,拓展了疾病诊断范围,不仅仅局限于眼部疾病,已有研究应用 AI 模型分析 OCTA 图像检测阿尔茨海默症和轻度认知障碍[78],凭借 OCTA 高分辨率捕捉视网膜微循环细微变化,为该类神经系统疾病提供无创筛查手段。当然,未来还有望实现通过视网膜微血管特征,预警心血管疾病、慢性肾病等全身性疾病,成为多种疾病早期筛查的便捷工具。

OCTA 的临床应用,虽然提升了对眼部多种疾病早期诊断与诊疗监测的精准度,但仍存在一定的局限性,主要表现为以下几点:(1) 对检查者的固视配合能力和屈光介质混浊程度相关,若配合欠佳或屈光介质混浊明显等会产生伪影干扰;(2) 观察范围及组织穿透能力有限,且扫描范围越大,图像质量越差;(3) 目前许多疾病的研究参数划分标准尚未形成统一,容易形成分歧;(4) OCTA 无造影剂渗漏,因此无法对视网膜屏障功能进行评估。总体而言,随着 OCTA 技术的发展,为临床工作的开展带来了极大的便利,相信随着 OCTA 临床应用的持续深入,且与 AI 的密切结合,其应用范围将进一步拓展,并在多种疾病的诊断和治疗中发挥更为重要的作用。

参考文献

- [1] Huang, D., Swanson, E.A., Lin, C.P., Schuman, J.S., Stinson, W.G., Chang, W., *et al.* (1991) Optical Coherence Tomography. *Science*, **254**, 1178-1181. <https://doi.org/10.1126/science.1957169>
- [2] Sambhav, K., Grover, S. and Chalam, K.V. (2017) The Application of Optical Coherence Tomography Angiography in Retinal Diseases. *Survey of Ophthalmology*, **62**, 838-866. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2017.05.006>
- [3] 沈锦琰, 武志峰. 扫频相干光层析成像术在脉络膜疾病应用的研究进展[J]. 临床眼科杂志, 2022, 30(5): 474-479.
- [4] Zhao, Y., Chen, Z., Saxer, C., Xiang, S., de Boer, J.F. and Nelson, J.S. (2000) Phase-Resolved Optical Coherence Tomography and Optical Doppler Tomography for Imaging Blood Flow in Human Skin with Fast Scanning Speed and High Velocity Sensitivity. *Optics Letters*, **25**, 114-116. <https://doi.org/10.1364/ol.25.000114>
- [5] Makita, S., Hong, Y., Yamanari, M., Yatagai, T. and Yasuno, Y. (2006) Optical Coherence Angiography. *Optics Express*, **14**, 7821-7840. <https://doi.org/10.1364/oe.14.007821>
- [6] Spaide, R.F., Fujimoto, J.G., Waheed, N.K., Sadda, S.R. and Staurengi, G. (2018) Optical Coherence Tomography Angiography. *Progress in Retinal and Eye Research*, **64**, 1-55. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2017.11.003>
- [7] 肖欢, 李梦玥, 段俊国. 基于 OCTA 探索近视患者眼底改变的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(3): 143-147.
- [8] Kwapong, W.R., Tang, F., Liu, P., Zhang, Z., Cao, L., Feng, Z., *et al.* (2024) Choriocapillaris Reduction Accurately Discriminates against Early-Onset Alzheimer's Disease. *Alzheimer's & Dementia*, **20**, 4185-4198. <https://doi.org/10.1002/alz.13871>
- [9] Novais, E.A., Adhi, M., Moul, E.M., Louzada, R.N., Cole, E.D., Husvot, L., *et al.* (2016) Choroidal Neovascularization Analyzed on Ultrahigh-Speed Swept-Source Optical Coherence Tomography Angiography Compared to Spectral-Domain Optical Coherence Tomography Angiography. *American Journal of Ophthalmology*, **164**, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2016.01.011>
- [10] Ma, J.X., Zhang, Z.Y., Di, R., *et al.* (2024) Comparative Study between Swept-Source and Spectral-Domain OCTA for Imaging of Choroidal Neovascularization in Age-Related Macular Degeneration. *International Journal of Ophthalmology*, **17**, 2067-2073.
- [11] Zhi, Z., Qin, W., Wang, J., Wei, W. and Wang, R.K. (2015) 4D Optical Coherence Tomography-Based Micro-Angiography Achieved by 16-MHz FDML Swept Source. *Optics Letters*, **40**, 1779-1782. <https://doi.org/10.1364/ol.40.001779>
- [12] Spaide, R.F., Koizumi, H. and Pozzoni, M.C. (2008) Enhanced Depth Imaging Spectral-Domain Optical Coherence Tomography. *American Journal of Ophthalmology*, **146**, 496-500. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2008.05.032>
- [13] Hsia, Y., Chang, H.L., Wang, T.H., *et al.* (2025) The Artifacts in Macular and Peripapillary Optical Coherence Tomography Angiography in Patients with Different Severities of Glaucoma. *Ophthalmology Science*, **6**, Article ID: 1000964.
- [14] 中华医学会眼科学分会眼底病学组, 中国医师协会眼科医师分会眼底病专业委员会, 许迅, 俞素勤. 我国眼底相干光层析血管成像术的操作和阅片规范(2017 年) [J]. 中华眼科杂志, 2017, 53(10): 729-734.

- [15] 魏文斌, 王倩. 光学相干层析血流成像的读片常识及要点[J]. 中华眼科杂志, 2017, 53(5): 396-400.
- [16] 韩锐, 刘信志, 秦雅雯, 等. 光相干断层扫描血管成像中图像伪影的研究进展[J]. 中华眼底病杂志, 2025, 41(1): 25-140.
- [17] 孙姣, 王佳琳, 王艳玲, 等. 眼部血管密度测量及其临床意义研究进展[J]. 眼科新进展, 2018, 38(11): 1089-1093.
- [18] 艾诗蓓, 郑枫, 曹明哲, 等. 不同程度糖尿病性视网膜病变患者的生化指标及光学相干断层扫描血管成像的差异[J]. 眼科学报, 2022, 37(12): 918-925.
- [19] 赵立宇, 杨芳, 吴昌凡, 等. 视网膜血管病中黄斑中心凹无血管区的研究进展[J]. 中华眼底病杂志, 2021, 37(2): 158-162.
- [20] Grieshop, J., Gaffney, M., Linderman, R.E., Cooper, R.F. and Carroll, J. (2023) The Shape of the Foveal Avascular Zone: When a Circle Isn't Round. *Translational Vision Science & Technology*, **12**, Article 26. <https://doi.org/10.1167/tvst.12.6.26>
- [21] Jacques, S.L. (2013) Optical Properties of Biological Tissues: A Review. *Physics in Medicine and Biology*, **58**, R37-R61. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/11/r37>
- [22] Ponugoti, A., Ngo, H., Stinnett, S., Kelly, M.P. and Vajzovic, L. (2024) Repeatability and Reproducibility of Quantitative OCT Angiography Measurements from Table-Top and Portable Flex Spectralis Devices. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **262**, 1785-1793. <https://doi.org/10.1007/s00417-023-06351-3>
- [23] Lu, Y., Wang, J.C., Cui, Y., Zhu, Y., Zeng, R., Lu, E.S., et al. (2020) A Quantitative Comparison of Four Optical Coherence Tomography Angiography Devices in Healthy Eyes. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **259**, 1493-1501. <https://doi.org/10.1007/s00417-020-04945-9>
- [24] 王婷婷, 朱益华, 范梦杰, 等. 应用光学相干断层扫描血管成像评估视网膜血流的可重复性及再现性[J]. 眼科学报, 2021, 36(6): 439-448.
- [25] 陈慧黎, 梅立新, 戴巧云, 等. 光学相干断层扫描血管成像在眼科的应用进展[J]. 国际眼科杂志, 2021, 21(11): 1918-1921.
- [26] Koutsiaris, A.G., Batis, V., Liakopoulou, G., Tachmitzi, S.V., Detorakis, E.T. and Tsironi, E.E. (2022) Optical Coherence Tomography Angiography (OCTA) of the Eye: A Review on Basic Principles, Advantages, Disadvantages and Device Specifications. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, **83**, 247-271. <https://doi.org/10.3233/ch-221634>
- [27] Chen, C., Liu, M., Cao, K., Yusufu, M. and Wang, J. (2020) Diagnostic Value of Optical Coherence Tomography Angiography for Choroidal Neovascularization in Age-Related Macular Degeneration: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ophthalmic Research*, **64**, 704-712. <https://doi.org/10.1159/000511265>
- [28] Iacono, P., Giorno, P., Varano, M. and Parravano, M. (2019) Structural and Optical Coherence Tomography Angiography in Myopic Choroidal Neovascularization: Agreement with Conventional Fluorescein Angiography. *European Journal of Ophthalmology*, **31**, 149-157. <https://doi.org/10.1177/1120672119882333>
- [29] 马野川, 王颖, 龚蕤. 使用 OCTA 观察抗 VEGF 治疗 mCNV 前后脉络膜微循环变化[J]. 锦州医科大学学报, 2025, 46(3): 64-70.
- [30] Heinke, A., Warter, A., Nagel, I.D., Agnihotri, A., Mehta, N.N., Galang, C.M.B., et al. (2025) Faricimab for Treatment-Resistant Choroidal Neovascularization (CNV) in Neovascular Age-Related Macular Degeneration (NAMD): Seven-Months Results Using Artificial Intelligence and Octa. *International Journal of Retina and Vitreous*, **11**, Article No. 68. <https://doi.org/10.1186/s40942-025-00691-4>
- [31] 中国研究型医院学会糖尿病学专业委员会. 社区医疗机构糖尿病视网膜病变筛查工作流程与管理规范的专家共识(2023 版) [J]. 中华糖尿病杂志, 2024, 16(1): 20-27.
- [32] Ozer, F., Tokuc, E.O., Albayrak, M.G.B., Akpınar, G., Kasap, M. and Karabas, V.L. (2022) Comparison of before versus after Intravitreal Bevacizumab Injection, Growth Factor Levels and Fibrotic Markers in Vitreous Samples from Patients with Proliferative Diabetic Retinopathy. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **260**, 1899-1906. <https://doi.org/10.1007/s00417-021-05515-3>
- [33] Qi, Z., Si, Y., Feng, F., Zhu, J., Yang, X., Wang, W., et al. (2023) Analysis of Retinal and Choroidal Characteristics in Patients with Early Diabetic Retinopathy Using WSS-OCTA. *Frontiers in Endocrinology*, **14**, Article 1184717. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1184717>
- [34] 李小凤, 高健, 廖荣丰. 荧光素血管造影与光学相干断层扫描血管成像对比研究糖尿病视网膜病变[J]. 安徽医科大学学报, 2020, 55(8): 1290-1294.
- [35] Yang, Y., Li, F., Liu, T., Jiao, W. and Zhao, B. (2023) Comparison of Widefield Swept-Source Optical Coherence Tomographic Angiography and Fluorescein Fundus Angiography for Detection of Retinal Neovascularization with Diabetic Retinopathy. *BMC Ophthalmology*, **23**, Article No. 315. <https://doi.org/10.1186/s12886-023-03073-2>

- [36] Ryu, G., Lee, K., Park, D., Park, S.H. and Sagong, M. (2021) A Deep Learning Model for Identifying Diabetic Retinopathy Using Optical Coherence Tomography Angiography. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 23024. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02479-6>
- [37] Wong, T.Y. and Scott, I.U. (2010) Retinal-Vein Occlusion. *New England Journal of Medicine*, **363**, 2135-2144. <https://doi.org/10.1056/nejmcp1003934>
- [38] Moussa, M., Leila, M., Bessa, A.S., Lolah, M., Abou Shousha, M., El Hennawi, H.M., et al. (2019) Grading of Macular Perfusion in Retinal Vein Occlusion Using En-Face Swept-Source Optical Coherence Tomography Angiography: A Retrospective Observational Case Series. *BMC Ophthalmology*, **19**, Article No. 127. <https://doi.org/10.1186/s12886-019-1134-x>
- [39] 朱紫怡, 杨叶蓁, 张凤, 等. 视网膜静脉阻塞合并黄斑灌注状态不良与视力的相关性[J]. 中南大学学报(医学版), 2024, 49(6): 943-950.
- [40] Ren, F., Gong, H., Zhang, H., et al. (2023) Evaluating the One-Year Efficacy of Combined Anti-VEGF and Dexamethasone Implant Treatment for Macular Edema in Retinal Vein Occlusions. *Medical Science Monitor*, **29**, e939277.
- [41] 严梦南, 燕振国, 樊爱芳, 等. 青年近视人群屈光度与眼球生物学参数的相关性[J]. 国际眼科杂志, 2021, 21(4): 738-741.
- [42] Pan, Z., Xian, H., Li, F., Wang, Z., Li, Z., Huang, Y., et al. (2025) Myopia and High Myopia Trends in Chinese Children and Adolescents over 25 Years: A Nationwide Study with Projections to 2050. *The Lancet Regional Health—Western Pacific*, **59**, Article ID: 101577. <https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2025.101577>
- [43] 俞灏, 焦子芸, 王宁宇, 等. 高度近视患者黄斑区和视盘区视网膜结构及微血管密度变化及其与眼轴长度的关系[J]. 吉林大学学报(医学版), 2025, 51(5): 1274-1280.
- [44] Alshareef, R.A., Khuthaila, M.K., Januwada, M., Goud, A., Ferrara, D. and Chhablani, J. (2017) Choroidal Vascular Analysis in Myopic Eyes: Evidence of Foveal Medium Vessel Layer Thinning. *International Journal of Retina and Vitreous*, **3**, Article No. 28. <https://doi.org/10.1186/s40942-017-0081-z>
- [45] Liu, L., Zhu, C., Yuan, Y., Hu, X., Chen, C., Zhu, H., et al. (2022) Three-Dimensional Choroidal Vascularity Index in High Myopia Using Swept-Source Optical Coherence Tomography. *Current Eye Research*, **47**, 484-492. <https://doi.org/10.1080/02713683.2021.2006236>
- [46] Ohno-Matsui, K. (2017) What Is the Fundamental Nature of Pathologic Myopia? *Retina*, **37**, 1043-1048. <https://doi.org/10.1097/iae.0000000000001348>
- [47] Du, R. and Ohno-Matsui, K. (2022) Novel Uses and Challenges of Artificial Intelligence in Diagnosing and Managing Eyes with High Myopia and Pathologic Myopia. *Diagnostics*, **12**, Article 1210. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12051210>
- [48] 中华医学会眼科学分会青光眼学组, 中国医师协会眼科医师分会青光眼学组. 中国青光眼指南(2020 年) [J]. 中华眼科杂志, 2020, 56(8): 573-586.
- [49] Hsia, Y., Wang, T., Huang, J. and Su, C. (2022) Relationship between Macular Microvasculature and Visual Acuity in Advanced and Severe Glaucoma. *American Journal of Ophthalmology*, **236**, 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2021.10.005>
- [50] Moghimi, S., Zangwill, L.M., Pentead, R.C., Hasenstab, K., Ghahari, E., Hou, H., et al. (2018) Macular and Optic Nerve Head Vessel Density and Progressive Retinal Nerve Fiber Layer Loss in Glaucoma. *Ophthalmology*, **125**, 1720-1728. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2018.05.006>
- [51] Yospon, T. and Rojananuangnit, K. (2023) Optical Coherence Tomography Angiography (OCTA) Differences in Vessel Perfusion Density and Flux Index of the Optic Nerve and Peri-Papillary Area in Healthy, Glaucoma Suspect and Glaucomatous Eyes. *Clinical Ophthalmology*, **17**, 3011-3021. <https://doi.org/10.2147/opth.s429718>
- [52] Pourjavan, S., Nazaran, N., Vaucourt, T., Abdouli, N., El Maftouhi, A. and Macq, B. (2025) AI-Based Ocular Age Estimation from Combined OCT and OCTA Metrics: Decade-Stratified Normative Modelling in Healthy Eyes—A Pilot Study. *Clinical Ophthalmology*, **19**, 3855-3867. <https://doi.org/10.2147/opth.s542219>
- [53] Pourjavan, S., Gouverneur, F., Macq, B., Van Drooghenbroeck, T., De Potter, P., Boschi, A., et al. (2024) Advanced Analysis of OCT/OCTA Images for Accurately Differentiating between Glaucoma and Healthy Eyes Using Deep Learning Techniques. *Clinical Ophthalmology*, **18**, 3493-3502. <https://doi.org/10.2147/opth.s472231>
- [54] Wen, Y., Jiang, D., Tang, K. and Chen, W. (2023) Current Clinical Applications of Anterior Segment Optical Coherence Tomography Angiography: A Review. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **261**, 2729-2741. <https://doi.org/10.1007/s00417-023-05997-3>
- [55] Ang, M., Sim, D.A., Keane, P.A., Sng, C.C.A., Egan, C.A., Tufail, A., et al. (2015) Optical Coherence Tomography Angiography for Anterior Segment Vasculature Imaging. *Ophthalmology*, **122**, 1740-1747. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2015.05.017>

- [56] Stanzel, T.P., Devarajan, K., Lwin, N.C., Yam, G.H., Schmetterer, L., Mehta, J.S., *et al.* (2018) Comparison of Optical Coherence Tomography Angiography to Indocyanine Green Angiography and Slit Lamp Photography for Corneal Vascularization in an Animal Model. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 11493. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29752-5>
- [57] Ang, M., Cai, Y., MacPhee, B., Sim, D.A., Keane, P.A., Sng, C.C.A., *et al.* (2016) Optical Coherence Tomography Angiography and Indocyanine Green Angiography for Corneal Vascularisation. *British Journal of Ophthalmology*, **100**, 1557-1563. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2015-307706>
- [58] Roberts, P.K., Goldstein, D.A. and Fawzi, A.A. (2017) Anterior Segment Optical Coherence Tomography Angiography for Identification of Iris Vasculature and Staging of Iris Neovascularization: A Pilot Study. *Current Eye Research*, **42**, 1136-1142. <https://doi.org/10.1080/02713683.2017.1293113>
- [59] Devarajan, K., Ong, H.S., Lwin, N.C., Chua, J., Schmetterer, L., Mehta, J.S., *et al.* (2019) Optical Coherence Tomography Angiography Imaging to Monitor Anti-VEGF Treatment of Corneal Vascularization in a Rabbit Model. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 17576. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54171-5>
- [60] Foo, V.H.X., Ke, M., Tan, C.Q.L., Schmetterer, L., Mehta, J.S. and Ang, M. (2021) Anterior Segment Optical Coherence Tomography Angiography Assessment of Corneal Vascularisation after Combined Fine-Needle Diathermy with Subconjunctival Ranibizumab: A Pilot Study. *Advances in Therapy*, **38**, 4333-4343. <https://doi.org/10.1007/s12325-021-01849-w>
- [61] Shiozaki, D., Sakimoto, S., Shiraki, A., Wakabayashi, T., Fukushima, Y., Oie, Y., *et al.* (2019) Observation of Treated Iris Neovascularization by Swept-Source-Based En-Face Anterior-Segment Optical Coherence Tomography Angiography. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 10262. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46514-z>
- [62] Liu, Z., Karp, C.L., Galor, A., Al Bayyat, G.J., Jiang, H. and Wang, J. (2020) Role of Optical Coherence Tomography Angiography in the Characterization of Vascular Network Patterns of Ocular Surface Squamous Neoplasia. *The Ocular Surface*, **18**, 926-935. <https://doi.org/10.1016/j.jtos.2020.03.009>
- [63] Binotti, W.W., Mills, H., Nosé, R.M., Wu, H.K., Duker, J.S. and Hamrah, P. (2021) Anterior Segment Optical Coherence Tomography Angiography in the Assessment of Ocular Surface Lesions. *The Ocular Surface*, **22**, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.jtos.2021.07.009>
- [64] Theotoka, D., Liu, Z., Wall, S., Galor, A., Al Bayyat, G.J., Feuer, W., *et al.* (2022) Optical Coherence Tomography Angiography in the Evaluation of Vascular Patterns of Ocular Surface Squamous Neoplasia during Topical Medical Treatment. *The Ocular Surface*, **25**, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.jtos.2022.03.006>
- [65] 徐梦月, 李娜, 许澈, 刘艳, 王剑锋. 利用 SS-OCTA 分析不同屈光状态下儿童脉络膜厚度变化[J]. 眼科学, 2025, 14(1): 28-35.
- [66] Zhou, X., Ye, C., Wang, X., Zhou, W., Reinach, P. and Qu, J. (2021) Choroidal Blood Perfusion as a Potential “rapid Predictive Index” for Myopia Development and Progression. *Eye and Vision*, **8**, Article No. 1. <https://doi.org/10.1186/s40662-020-00224-0>
- [67] 唐冲, 计岩, 黄凡凡, 等. 基于 SS-OCTA 的成年近视患者黄斑区脉络膜厚度和血流特点的观察[J]. 重庆医科大学学报, 2025, 50(1): 80-87.
- [68] 孙沅, 王健, 孙沂, 等. OCTA 用于检测不同屈光人群的黄斑区视网膜密度和厚度及其相关性分析[J]. 现代生物医学进展, 2019, 19(14): 2797-2800.
- [69] 李娜, 齐艳华. 利用 OCTA 评估屈光不正对学龄儿童黄斑区血流及视网膜厚度的影响[J]. 国际眼科杂志, 2020, 20(8): 1439-1442.
- [70] Vagge, A., Ferro Desideri, L., Nucci, P., Serafino, M., Giannaccare, G. and Traverso, C.E. (2018) Prevention of Progression in Myopia: A Systematic Review. *Diseases*, **6**, Article 92. <https://doi.org/10.3390/diseases6040092>
- [71] Diao, K., Huang, X., Yao, M., Li, J., Fan, F., Pan, H., *et al.* (2023) Inter-Examiner and Intra-Examiner Reliability of Optical Coherence Tomography Angiography in Vascular Density Measurement of Retinal and Choriocapillaris Plexuses in Healthy Children Aged 6-15 Years. *Frontiers in Medicine*, **10**, Article 1161942. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1161942>
- [72] 谢意. OCTA 观察青少年近视患者佩戴 OK 镜后黄斑区微循环变化及不同中医证型之间微循环差异的相关研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都中医药大学中西医结合临床(眼科), 2020.
- [73] 郑卓涛, 张凌月, 封炎, 等. 低浓度阿托品滴眼液对近视儿童青少年视网膜与脉络膜厚度及微循环的影响[J]. 眼科新进展, 2023, 43(11): 887-892.
- [74] Wang, H., Zhong, H., Zhang, J., Wei, W., Cui, X. and Zheng, W. (2024) Impact of Repeated Low-Level Red-Light Exposure on Choroidal Thickness and Blood Flow in Pediatric Patients: A SS-OCTA Study. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **50**, Article ID: 104412. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2024.104412>

- [75] Fang, J., Zheng, Y., Mou, H., Shi, M., Yu, W. and Du, C. (2023) Machine Learning for Predicting the Treatment Effect of Orthokeratology in Children. *Frontiers in Pediatrics*, **10**, Article 1057863. <https://doi.org/10.3389/fped.2022.1057863>
- [76] Cao, J., Sun, X., Sun, L., Song, H., Niu, K. and He, Z. (2023) Deep Learning Based Prediction of Myopia Control Effect in Children Treated with Overnight Orthokeratology. *Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice*, **50**, 41-47. <https://doi.org/10.1097/icl.0000000000001054>
- [77] Qi, Z., Li, T., Chen, J., Yam, J.C., Wen, Y., Huang, G., *et al.* (2024) A Deep Learning System for Myopia Onset Prediction and Intervention Effectiveness Evaluation in Children. *NPJ Digital Medicine*, **7**, Article No. 206. <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01204-7>
- [78] 吴美初, 柯殷雨, 唐云华, 等. 深度学习探讨视网膜成像在阿尔茨海默病管理中的应用[J]. 眼科新进展, 2024, 44(8): 663-667.