

OCTA 评估视网膜血流密度在眼科疾病的应用

李霄彤^{1,2}, 孙瑞雪²

引用:李霄彤,孙瑞雪. OCTA 评估视网膜血流密度在眼科疾病的应用. 国际眼科杂志, 2026,26(7):1192-1197.

作者单位:¹(050000)中国河北省石家庄市,河北医科大学;
²(050000)中国河北省石家庄市,河北医科大学附属石家庄市人民医院眼科

作者简介:李霄彤,在读硕士研究生,住院医师,研究方向:眼底病。

通讯作者:孙瑞雪,硕士,主任医师,硕士研究生导师,研究方向:眼底病. rxsun1976@126.com

收稿日期:2025-11-26 修回日期:2026-05-19

摘要

光学相干断层扫描血管成像(OCTA)是一种创新型的非侵入性成像技术,它通过检测血流运动信号,无需注射造影剂即可实现对视网膜及脉络膜毛细血管网络的无创、分层、三维定量可视化。OCTA 因其无创、高分辨、可量化的特性使其在疾病筛查、精准分期、治疗决策和预后预测中展现出巨大潜力,其核心优势在于其能精确量化关键微循环指标,如血流密度(VD)、无灌注区面积(NPA)、黄斑中心凹无血管区(FAZ)形态及新生血管活动性。在糖尿病视网膜病变(DR)、视网膜血管阻塞性疾病(RVO/RAO)、年龄相关性黄斑变性(ARMD)和青光眼中 OCTA 可在临床可在病灶出现前,敏感地检测出深层毛细血管丛的血流密度降低,为早期筛查和风险分层提供依据。此外,OCTA 在葡萄膜炎、病理性近视等疾病中也展现出重要价值。文章系统阐述了 OCTA 的技术原理、关键量化参数及其在多种眼科疾病管理中的核心应用价值,并对 OCTA 在眼科标准治疗当中进行了科学展望,随着硬件扫描速度、广角成像能力、人工智能算法及多模态整合的进一步发展,OCTA 有望成为眼科标准诊疗的重要组成部分,并可能为神经系统及全身性疾病的微循环研究提供无创窗口。

关键词:光学相干断层扫描血管成像(OCTA);视网膜微循环;血流密度;眼科疾病;精准医疗

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.7.14

Application of OCTA in evaluating retinal vascular density in ocular diseases

Li Xiaotong^{1,2}, Sun Ruixue²

¹Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China; ²Department of Ophthalmology, Shijiazhuang People's Hospital Affiliated to Hebei Medical University,

Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China

Correspondence to: Sun Ruixue. Department of Ophthalmology, Shijiazhuang People's Hospital Affiliated to Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China. rxsun1976@126.com

Received:2025-11-26 Accepted:2026-05-19

Abstract

• Optical coherence tomography angiography (OCTA) is an innovative non-invasive imaging technology that enables non-invasive, layered, and three-dimensional quantitative visualization of the retinal and choroidal capillary networks by detecting blood flow signals in a contrast-free manner. With its non-invasiveness, high resolution, and quantifiability, OCTA demonstrates significant potential in disease screening, precise staging, treatment decision-making, and prognosis prediction. Its core advantage lies in the accurate quantification of key microcirculation parameters, such as vessel density (VD), non-perfusion area (NPA), foveal avascular zone (FAZ) morphology, and neovascular activity. In diabetic retinopathy (DR), retinal vascular occlusive diseases (RVO/RAO), age-related macular degeneration (ARMD), and glaucoma, OCTA can sensitively detect reduced vessel density in the deep capillary plexus before clinically visible lesions appear, providing a basis for early screening and risk stratification. Additionally, OCTA has shown important value in managing uveitis, pathological myopia, and other ocular conditions. This review systematically elaborates on the technical principles, key quantitative parameters, and core application value of OCTA in the management of various ophthalmic diseases and presents scientific prospects for the application of OCTA in standardized ophthalmic treatment. With further advancements in hardware scanning speed, wide-field imaging capabilities, artificial intelligence algorithms, and multi-modal integration, OCTA is expected to become an essential component of standard ophthalmic diagnosis and treatment. It may also provide a non-invasive window for microcirculation research in neurological and systemic diseases.

• KEYWORDS: optical coherence tomography angiography (OCTA); retinal microcirculation; vessel density; ocular diseases; precision medicine

Citation: Li XT, Sun RX. Application of OCTA in evaluating retinal vascular density in ocular diseases. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026,26(7):1192-1197.

0 引言

视网膜作为高代谢活性的神经组织,其血液供应至关重要,且结构独特。视网膜血管组织主要包括两个独立的循环系统:视网膜血管系统和脉络膜血管系统^[1]。视网膜中央血管系统由视网膜中央动脉供血,供应视网膜内五层,为终末动脉系统,分支间吻合极少,单一血管阻塞易致相应区域缺血。脉络膜血管系统由睫状后短动脉等多分支供血,血流速度快、血容量大,主要为视网膜外五层提供营养支持与温度调节^[2]。视网膜内层血管形成两个毛细血管丛:浅层毛细血管丛位于神经纤维层和神经节细胞层,分布密集,为神经节细胞及其纤维供血;深层毛细血管丛位于内核层深部,血管网眼更细密,主要为内核层的双极细胞、水平细胞和无长突细胞等神经元提供营养支持。现临床上荧光素血管造影(fundus fluorescein angiography, FFA)和吲哚菁绿血管造影(indocyanine green angiography, ICGA)被广泛应用于视网膜及脉络膜血流的造影成像。FFA主要反映血流动态信息,而非血管结构本身,其图像易受染料渗漏、着染等因素干扰^[3]。重要的是,这两种技术均属有创检查,需要静脉注射外源性造影剂,存在发生过敏反应等严重不良事件的风险,且无法实现真正的三维分层定量分析。

OCTA作为一种无创造影技术,利用视网膜和脉络膜血流运动信号形成精准的图像。它利用散斑、相位或幅度变化区分流动血液与静止组织,实现分层血流成像,无需注射造影剂即可生成三维血流图像。该技术可分层显示视网膜浅层、深层毛细血管丛及脉络膜毛细血管层,并提供血流密度、无灌注区面积、黄斑无血管区形态等定量参数,从而无创、分层、三维定量地可视化视网膜和脉络膜毛细血管网络^[4]。近年来, Park等^[5]首次提供了连续的血管密度地形图,为观察血管变化提供了高分辨率视角。该方法通过二值化与骨架化处理,减少非功能性大血管干扰,提高了微血管密度测量准确性,有助于未来识别疾病的早期微血管异常。

1 OCTA 评估视网膜血流密度的关键定量参数

1.1 血流密度与灌注密度

血流密度(vessel density, VD)是指在特定分析区域内,被血流信号(即血管)所占据的面积与总分析区域面积的百分比^[6]。它更侧重于血管的“长度”或“线密度”。灌注密度(perfusion density, PD)则是指在特定分析区域内,所有血流信号像素点所占的面积百分比,它更侧重于区域的“灌注”状态。

1.2 黄斑无血管区相关参数

黄斑无血管区(foveal avascular zone, FAZ)是黄斑中心凹特有的无毛细血管区域,其形态与中心凹功能密切相关。FAZ面积是最常用的参数,在许多血管性疾病[如糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)、视网膜静脉阻塞(retinal vein occlusion, RVO)]中会异常扩大^[7]。FAZ的周长增加、圆度降低(形态更不规则)提示FAZ边界毛细血管的丢失或破坏,是微循环不稳定的标志。

1.3 脉络膜毛细血管层血流评估

通过增强深度成像(enhanced depth imaging, EDI) OCTA技术,可以对脉络膜毛细血管层(choriocapillaris, CC)的血流进行量化,通常以血流面积或缺失百分比来表示^[8]。这在年龄相关性黄斑

变性(age-related macular degeneration, ARMD)和病理性近视等疾病的评估中至关重要。

2 OCTA 检查视网膜血流密度在主要眼科疾病中的应用

2.1 DR

2.1.1 DR 的诊断和管理

DR是糖尿病(diabetes mellitus, DM)最常见的微血管并发症,也是世界上导致视力受损和失明的主要原因之一。DR的核心病理改变是长期高血糖导致的视网膜微血管进行性损害^[9],其特征包括毛细血管闭锁、周细胞丢失和血-视网膜屏障破坏,最终引发缺血、渗漏及新生血管形成等后果。在诊断与评估DR时,FFA作为传统标准,通过静脉注射荧光素钠动态观察视网膜血流,能够有效检测微动脉瘤渗漏、无灌注区及新生血管等晚期病变,为临床分期(如ETDRS标准)和治疗决策(如激光光凝范围界定)提供关键依据。然而,FFA具有侵入性,存在过敏风险,相比之下,OCTA作为一种无创成像技术,它能对DR微血管病变的全过程进行精细化^[10]。

2.1.2 OCTA 在 DR 早期筛查中的敏感性

深层毛细血管丛(deep capillary plexus, DCP)的血流密度降低是DR极早期的特异性生物标志物,其改变与高血糖诱导的代谢损伤直接相关,OCTA通过检测DCP的微循环变化,可在临床体征出现前实现风险预警。DCP位于视网膜外丛状层,对缺氧敏感。高血糖导致线粒体功能障碍和氧化应激,引发DCP毛细血管周细胞选择性丢失,表现为血流密度降低,在无明显DR的糖尿病患者中,DCP血流密度已下降10%–15%,早于SCP变化(仅下降5%),提示DCP对代谢损伤(如高血糖)更敏感,为DR的极早期筛查提供了客观依据^[11]。临床报道1例HbA_{1c}>8%的患者,其OCTA结果显示DCP血流密度较健康组低12.3%,但FFA和眼底检查均正常,6 mo后出现微动脉瘤。在尚未出现肉眼可见视网膜病变的糖尿病患者中,OCTA通常能够检测到DCP血流密度的特异性降低^[12],以此来精确预测DR病变。目前,DCP血流密度作为DR早期生物标志物仍面临因果关系不明、设备阈值未统一、混杂因素未考量及缺乏大样本验证等问题。在未来OCTA的应用当中,应开展多中心研究建立正常值范围,推动设备标准化,开展纵向队列明确时间关系,整合多参数构建预测模型,建立质控标准,方能成为DR早期筛查的核心指标。

2.1.3 OCTA 在 DR 参数的预测与分级价值

OCTA技术通过无创、分层成像与量化分析,为DR的早期识别、精准分级与进展预测提供了关键工具。多中心研究表明,OCTA参数与DR严重程度显著相关。例如FAZ面积>0.35 mm²或毛细血管无灌注区(capillary nonperfusion area, CNP)范围>10%,OCTA结果分别提示视力下降风险增加3倍和1 a内进展为增殖性DR(proliferative diabetic retinopathy, PDR)的风险达68%^[13]。研究证实,DCP的血管密度下降和FAZ扩大比SCP更为敏感,在临床前期即可检测到微血管改变,为早期干预提供了依据。基于“全域成像+分层量化”范式,OCTA整合了FAZ边界完整性分级、CNP象限分布以及DCP血管密度等参数,构建了客观的评估体系:例如当DCP密度<40%且FAZ圆度指数<0.75时,提示中度缺血需强化血糖控制^[14]。

2.1.4 OCTA 在 DR 治疗应用的双重作用 OCTA 在 DR 治疗中兼具指导性(如激光光凝决策)和评估性[如抗血管内皮生长因子(anti-vascular endothelial growth factor, VEGF)疗效监测]双重作用^[15]。OCTA 在 DR 治疗中通过量化缺血、水肿等病症变化,指导激光光凝决策并动态评估抗 VEGF 疗效,实现治疗个体化。基于病症的缺血程度,无灌注区(non-perfusion area, NPA)范围>10%时,光凝有效率有大幅提升。在 1 例 PDR 患者颞侧 NPA 占 15%,光凝后新生血管消退,光凝有效率提升至 92%^[16]。抗 VEGF 疗效监测方面,在 DME 治疗时,OCTA 不仅能观察黄斑区水肿消退,还能动态监测 DCP 血流密度恢复情况,这一双重作用使 OCTA 成为个体化治疗的“导航仪”。目前,OCTA 在 DR 治疗中已从辅助诊断迈向治疗导航,但实现个体化精准仍需突破开展大样本前瞻性研究明确 NPA 阈值与 DCP 恢复对远期视力的量化关系,推动图像分析标准化,整合全身代谢与生物标志物构建预测模型,探索 AI 动态决策系统。未来随着超广角 OCTA 与多模态融合,OCTA 有望升级为全病程智能管理的核心引擎。

2.2 视网膜血管阻塞性疾病

2.2.1 视网膜静脉阻塞和视网膜动脉阻塞的早期诊断 视网膜静脉阻塞(retinal vein occlusion, RVO)主要由静脉血栓引起,病症包括视网膜出血、水肿和静脉迂曲。缺血核心区对应毛细血管闭锁导致的无灌注,患者常表现视力下降和视野缺损;半暗带则代表可逆性缺血,与周围组织水肿和微循环代偿相关^[17]。视网膜动脉阻塞(retinal artery occlusion, RAO)因动脉栓塞导致突发视力丧失,OCTA 显示缺血核心为动脉供血区完全无灌注(如视网膜苍白和樱桃红点),半暗带可能存在于阻塞边缘,提示可进行早期再通^[18]。

2.2.2 OCTA 在血管重塑与长期管理中的监测功能

OCTA 可无创动态监测视网膜-视网膜或视网膜-脉络膜侧支循环的形态演变。刘梦珂等^[19]发现对侧眼存在“亚临床”病变(如脉络膜血流密度降低),证实 RVO 是系统性血管疾病。慢性 RVO 中,血管重塑表现为侧支循环形成、血管迂曲和扩张,是缺血代偿反应;但异常重塑(如新生血管)可导致玻璃体出血和青光眼。RVO 患者常伴高血压、糖尿病等系统病,对侧眼亚临床病变(如微血管密度降低)提示双侧视网膜受累。OCTA 监测侧支循环密度可预测出血风险,密度>25%时,需强化抗凝治疗^[20]。然而,上述治疗建议缺乏前瞻性研究支持,其与出血风险的因果关系尚不明确,临床上需整合视网膜与脉络膜多参数构建 RVO 预后预测评分系统。

2.2.3 OCTA 在 RVO 分型与精准诊断中的定量价值

OCTA 通过多维参数(如 FAZ 形态指数、血管密度)为 RVO 的缺血型与非缺血型分型提供直接、定量标准,提升诊断精准度。An 等^[21]比较缺血型 RVO(ischemic retinal vein occlusion, I-CRVO)与非缺血型 RVO(non-ischemic rvo, NI-CRVO)的 OCTA 参数[如 foveal avascular zone-area index, FAZ-AI],发现 iCRVO 存在特征性微血管损伤,克服了 FFA 的分层局限。OCTA 的量化能力将分型从“形态描述”升级为“定量工具”,如 FAZ-AI<0.7 提示缺血型概率高。iCRVO 与静脉高压导致周细胞凋亡相关,OCTA 的

FAZ 不规则指数(acircularity index, AI)可直接量化毛细血管丢失程度,优于 FFA 的渗漏评估。Zhao 等^[22]采用超广角 SS-OCTA 和三维参数,首次报道 RVO 中脉络膜改变,提供比二维指标更丰富的结构信息,脉络膜血管指数(choroidal vascularity index, CVI)降低反映 RVO 继发的脉络膜缺血,病症包括视网膜色素上皮(retinal pigment epithelium, RPE)紊乱和光感受器损伤^[22]。指数的降低多为横断面研究,缺乏纵向随访数据验证其与疾病进展的因果关系,临床应开展前瞻性纵向队列研究,明确 OCTA 早期参数变化与远期疾病进展的量化关系,建立基于时间的风险预测模型。

2.2.4 OCTA 在治疗决策与预后评估中的整合应用

OCTA 通过缺血范围量化、血管重塑监测和分型标准,直接优化 RVO 的治疗决策(如抗 VEGF 时机选择)和长期预后评估。OCTA 界定的缺血范围指导激光或抗 VEGF 治疗,半暗带缺血范围血流密度下降大于 30%时,早期治疗可挽救可逆损伤^[23]。缺血核心区需激光光凝以防新生血管,半暗带水肿适用抗 VEGF,病症包括黄斑增厚和视力模糊。侧支循环丰富者视力改善率高,病症上表现出血吸收和水肿消退;异常重塑(如血管迂曲)提示缺血持续,需长期管理。需要指出的是,“血流密度下降大于 30%”的阈值目前仅来源于单篇文献,尚需开展前瞻性纵向研究,进一步明确半暗带血流密度下降阈值与视力预后的量化关系,以增强该指标在临床决策中的可靠性与普适性。

2.3 ARMD

2.3.1 干性 ARMD 早期诊断与进展预测 OCTA 通过检测 CC 层血流的局灶性稀疏和不均匀性^[24],能够在玻璃膜疣和早期 ARMD 阶段识别微循环异常,并预测向地图样萎缩(geographic atrophy, GA)的进展。在干性 ARMD 早期,OCTA 可发现 CC 层血流不均匀性或局灶性稀疏。CC 血流缺失范围与 GA 病灶面积和进展速度高度相关,使其成为预测 GA 进展的潜在替代终点。早期玻璃膜疣沉积导致 Bruch 膜增厚,阻碍 CC 与 RPE 的营养交换,引发 CC 局灶性萎缩。OCTA 显示的“血流稀疏”对应 CC 凋亡区域,患者常表现为中心暗点或视物变形。随着病程进展,当 OCTA 检测到 CC 血流密度降低>20%时,3 a 内 GA 进展风险增加 3 倍^[25]。

2.3.2 OCTA 在 ARMD 诊疗中的创新应用 OCTA 在 ARMD 的病理机制研究与临床管理中展现出多层次价值。研究显示,ARMD 患者浅层毛细血管丛(superficial capillary plexus, SCP)的血管密度降低,但其本质常为外层视网膜损伤的继发表现,而非疾病始动因素。这一现象可通过“后感受器功能性丧失”假说解释:ARMD 早期病症以 RPE 和光感受器损伤为主,这导致内层视网膜双极细胞等神经元突触输入减少、代谢需求下降,进而引发微血管重构性萎缩(SCP 密度降低),临床上表现为对比敏感度下降和暗适应延长。因此,SCP 密度可作疾病严重度标志,OCTA 在此场景中更适用于分期而非早期诊断^[26]。在抗 VEGF 治疗方面,OCTA 能动态监测脉络膜新生血管(choroidal neovascularization, CNV)血管闭合(预示渗出吸收)或纤维化(提示疗效有限)^[27],这些变化与视力预后直接相关。

2.3.3 OCTA 在 ARMD 全局管理中的整合应用 OCTA 通过量化 CC 血流、视网膜微血管密度及 CNV 活动性,实现了 ARMD 从早期筛查到治疗随访的全流程管理,推动精准医疗。OCTA 检测 CC 稀疏预警 GA 风险,适用于高危人群筛查,CC 密度<30%提示 GA 高风险;CNV 活动性(血流信号占比>50%)需强化治疗^[28];中期 SCP 密度降低提示内层视网膜受累,需加强随访;晚期 CNV 或 PCV 的 OCTA 分型指导疗法选择(抗 VEGF 或 PDT)。需要指出的是,不同研究中 OCTA 设备的扫描范围、分层算法及量化参数定义存在差异,导致“显著降低”的具体阈值缺乏可比性,难以直接转化为临床诊断标准。在临床应用当中应推动多中心研究,采用统一的设备设置与参数定义,制定不同人群、不同疾病阶段的正常值参考范围。

2.4 青光眼与视神经疾病

2.4.1 青光眼早期诊断与 OCTA 技术优势 青光眼的本质是视网膜神经节细胞及其轴索的进行性丢失,视神经血流供应障碍^[29],OCTA 实现了对神经血管单元“血管”部分的直接成像,能够直接成像视盘周围微循环,在视野缺损出现前即可检测放射状毛细血管(radial peripapillary capillaries, RPC)层血流密度降低,为早期诊断提供新途径^[30]。青光眼患者视盘周围血流下降与视网膜神经纤维层(retinal nerve fiber layer, RNFL)变薄在空间分布上一致,且血流异常可能早于或同步于结构改变。这种血流-结构关联使 OCTA 血流参数成为极具潜力的早期诊断指标,在 RNFL 变薄前预警青光眼进展。

2.4.2 青光眼分型与血管因素重要性 不同青光眼视盘表型存在显著的微血管密度差异,OCTA 的诊断效能高度依赖于视盘表型分类。Eren 等^[31]根据 Nicoletta-Drance 标准将青光眼视盘分为四种表型,使用 OCTA 精确测量毛细血管密度,研究证实,不同视盘表型间存在微血管差异,正常眼压性青光眼(normal tension glaucoma, NTG)与高眼压性青光眼的微血管特征存在差异^[32]。与高眼压性青光眼相比,NTG 患者的视盘周围血流密度降低更为显著,这凸显了血管因素在其发病中的关键作用。NTG 患者虽眼压正常,但微循环障碍更突出,表明其病理可能更依赖于血管性损害而非单纯的机械压力。因此,对 NTG 的治疗应侧重改善微循环,而非仅关注眼压控制。视盘表型分类虽依据 Nicoletta-Drance 标准,但其本身具有一定主观性,不同观察者间的分类一致性可能影响血管密度分析的可靠性,在临床上应引入人工智能辅助的视盘表型自动分类与微血管密度量化,减少人为判读差异,提升分型的一致性与可重复性。

2.4.3 OCTA 在青光眼管理中的临床应用价值 OCTA 通过量化微血管密度,实现了从早期诊断到鉴别诊断的全流程管理,超越传统 OCT 的局限。OCTA 引入微血管密度参数克服了传统 OCT 仅关注结构参数的局限,多参数联合分析提高鉴别诊断准确率,在视野缺损出现前检测微循环异常,实现真正早期诊断,指导正确治疗方向。

2.5 其他视网膜与脉络膜疾病

2.5.1 OCTA 在炎症性眼底疾病中的应用价值 OCTA 可无创定量评估炎症性眼底疾病活动期毛细血管闭塞范围及静息期血流恢复情况,并通过分层成像清晰显示 CNV

形态,为炎症性眼底病的鉴别诊断与疗效监测提供依据。在视网膜血管炎中^[33],OCTA 可精准显示旁中心凹毛细血管丢失与 FAZ 不规则扩大。对于葡萄膜炎继发 CNV, OCTA 能清晰呈现“缠结状”新生血管网。视网膜血管炎与葡萄膜炎的核心病理是免疫介导的血管内皮损伤,导致毛细血管闭锁、缺血缺氧及代偿性新生血管增生。活动期以炎性细胞浸润、FAZ 边界模糊为特征,慢性期则因纤维化修复引发毛细血管不可逆丢失。OCTA 显示的 FAZ 扩大与 CNV 形态,直接对应“缺血-新生血管”病理轴,FAZ 不规则提示周细胞丢失导致微循环稳定性破坏,而“缠结状”CNV 则反映 VEGF 驱动的病理性血管增生^[34]。

2.5.2 OCTA 在病理性近视微循环评估与并发症预测中的作用 OCTA 可显示后巩膜葡萄肿区域脉络膜毛细血管的进行性变薄与血流丧失,是预测病理性近视继发近视性脉络膜新生血管(myopic choroidal neovascularization, mCNV)风险的关键工具。研究表明,此类患者后极部脉络膜毛细血管血流密度显著降低,且与巩膜葡萄肿深度正相关^[35]。同样地,脉络膜毛细血管血流密度每降低 10%, mCNV 发生风险增加 3.2 倍^[36]。病理性近视本质是眼轴过度增长引起的后极部组织退行性变,OCTA 检测到的血流丧失对应毛细血管闭锁与脉络膜变薄,可作为 mCNV 的早期预警。患者常表现中心暗点或视物变形,OCTA 量化参数为临床干预时机提供了客观依据。

2.5.3 OCTA 在中心性浆液性脉络膜视网膜病变中的量化价值 OCTA 通过量化急性与慢性中心性浆液性脉络膜视网膜病变(central serous chorioretinopathy, CSC)的视网膜及脉络膜微循环差异,揭示疾病不同阶段的血流动力学特征,为早期干预提供生物标志物。Lu 等^[37]证实了急性 CSC(acute central serous chorioretinopathy, aCSC)的内层视网膜血管密度(vascular density of inner retina, VDIR)显著高于慢性 CSC(chronic central serous chorioretinopathy, cCSC),而浅层脉络膜血管密度(vascular density of superficial choroid, VDSC)低于 cCSC。VDIR 降低是 CSC 慢性化的预测指标(敏感度 89%)。急性期以脉络膜高灌注和 RPE 屏障破坏为主,导致浆液性视网膜脱离,VDIR 代偿性升高以维持氧供;慢性期因长期积液引发光感受器凋亡和脉络膜缺血,VDSC 降低标志脉络膜毛细血管衰减。OCTA 参数动态变化揭示了 CSC 从“血管渗出主导”向“缺血性损伤”转化的病理过程,VDIR 与 VDSC 差异为抗 VEGF 治疗或光凝的时机选择提供依据。

3 OCTA 技术的优势和挑战

3.1 OCTA 技术的优势 OCTA 作为一项革命性的无创成像技术,其核心优势在于无创安全,彻底避免了传统造影剂可能引发的过敏反应风险,使短期重复检查与动态监测成为可能^[38]。其凭借高分辨率与定量功能,可清晰显示微米级血管结构,精确测量血流密度、无灌注区面积等参数,为疾病分级与进展评估提供客观依据。该技术无需造影剂,避免了染料渗漏干扰,结合伪影识别算法,显著提升图像解读可靠性。它成功解决了传统造影无法兼顾“无创”与“分层定量”的困境,首次实现视网膜浅层、深层及脉络膜毛细血管层的独立可视化,可在临床可见病灶出现前检测微循环异常。大量研究证实,OCTA 可在临床可见

病灶出现前检测微循环异常,如糖尿病视网膜病变患者早期即出现脉络膜毛细血管灌注密度降低^[39],青光眼患者视野缺损前即可见视盘周围毛细血管密度下降^[40]。其分层量化能力还揭示了不同亚型的血管病理异质性,为个体化治疗提供关键依据。

3.2 OCTA 当前面临的主要挑战与局限性 在技术层面, OCTA 仍面临扫描范围与分辨率难以兼顾、算法对极慢或极快血流存在检测盲区、浅层血管投射伪影干扰深层定量分析以及自动分层算法在严重视网膜病变时准确性下降等挑战,常需人工校正^[41]。临床上, OCTA 在临床推广中存在多重挑战:不同厂商设备在光源、算法及参数定义上存在差异,导致测量结果缺乏可比性,阻碍统一诊断阈值的建立;投射伪影、分层误差及图像解读主观性影响定量分析的可靠性^[42];血流密度降低与组织损伤的因果关系尚不明确,需长期纵向队列研究澄清;海量参数与多模态信息整合易造成数据过载,缺乏标准化报告模板与临床决策路径^[43]。面临上述挑战,在未来的临床治疗当中应推进设备与算法标准化,借助人工智能实现自动化分析与决策支持,建立纵向队列明确时序关系,整合血管与结构参数构建新型评估范式,推动 OCTA 从研究工具向标准诊疗核心组成部分转化。

3.3 未来发展趋势与展望 展望未来, OCTA 技术的发展将沿三个主要方向深化。硬件升级将致力于提升扫描速度与广角成像能力,以期在更大范围内实现高分辨率、低伪影的血管评估。算法智能化是关键突破点,利用人工智能实现血管网络的自动分割、病灶的精准识别与定量,将大幅提升分析效率与一致性。多模态集成是临床应用的必然趋势,将 OCTA 与自适应光学、高清彩照等技术整合,可提供一站式的眼部综合评估。更深远的是, OCTA 的定量参数有望成为神经血管性眼病临床试验的客观生物标志物,并且,视网膜作为中枢神经系统的延伸,其微循环改变与阿尔茨海默病、脑血管病等系统性疾病的关联,使 OCTA 可能成为探索全身性疾病病理机制的无创窗口。

综上所述,尽管存在标准化与应用层面的挑战, OCTA 凭借其独特的技术优势,在持续的技术迭代与跨学科融合的推动下,正逐步成为眼科精准医疗不可或缺的核心工具,并展现出广阔的临床应用与研究前景。

利益冲突声明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 李霄彤论文选题与修改,文献检索,初稿撰写;孙瑞雪选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

[1] 江珊珊. 年龄相关性白内障术前术后黄斑区血管密度及视网膜厚度改变的 OCTA 对比性研究. 大理大学, 2022.
[2] 纪风涛. 基于扫频源光学相干断层扫描成像糖尿病脉络膜病变的研究. 安徽医科大学, 2024.
[3] Chua J, Tan BY, Wong D, et al. Optical coherence tomography angiography of the retina and choroid in systemic diseases. *Prog Retin Eye Res*, 2024,103:101292.
[4] Borrelli E, Sacconi R, Querques G, et al. Optical coherence tomography angiography in the management of diabetic retinopathy. *Indian J Ophthalmol*, 2021,69(11):3009-3014.

[5] Park MM, Young BK, Shen LL, et al. Topographic variation of retinal vascular density in normal eyes using optical coherence tomography angiography. *Transl Vis Sci Technol*, 2021,10(12):15.
[6] Antropoli A, Arrigo A, La Franca L, et al. Peripheral and central capillary non-perfusion in diabetic retinopathy: an updated overview. *Front Med*, 2023,10:1125062.
[7] Viekash VK, Jothi BJ, Lakshminarayanan V. FAZSeg: a new software for quantification of the foveal avascular zone. *Clin Ophthalmol*, 2021,15:4817-4827.
[8] 魏丽, 王平. 光学相干断层扫描血管成像在中心性浆液性脉络膜视网膜病变中的临床应用研究进展. *山东医药*, 2021,61(29):113-115.
[9] 周米露, 陈琳, 赵佐芳, 等. miR-1246 调控 METTL3 介导的 m6A 修饰对高糖诱导的视网膜微血管内皮细胞损伤的影响. *国际眼科杂志*, 2026,26(1):7-15.
[10] 薛晓波, 胡昌辰. OCT 及 OCTA 在鞍区肿瘤患者视功能评估中的应用进展. *神经疾病与精神卫生*, 2025,25(10):726-731.
[11] 张占荣, 臧冬晓, 刘华, 等. 采用 OCTA 分析非增殖期糖尿病视网膜病变患者黄斑区血流密度. *国际眼科杂志*, 2020,20(10):1780-1785.
[12] Cao D, Yang DW, Huang ZN, et al. Optical coherence tomography angiography discerns preclinical diabetic retinopathy in eyes of patients with type 2 diabetes without clinical diabetic retinopathy. *Acta Diabetol*, 2018,55(5):469-477.
[13] Wei J, Chen C, Shen YC, et al. Quantitative evaluation of ocular vascularity and correlation analysis in patients with diabetic retinopathy by SMI and OCTA. *BMC Ophthalmol*, 2024,24(1):76.
[14] Toma C, Cavallari E, Varano P, et al. Microvascular changes in eyes with non-proliferative diabetic retinopathy with or without macular microaneurysms; an OCT-angiography study. *Acta Diabetol*, 2025,62(5):753-761.
[15] Fu WN, Du Y, Gong ZY. Application of optical coherence tomography angiography in the assessment of diabetic macular edema staging and laser photocoagulation efficacy. *Photodiagn Photodyn Ther*, 2024,46:104055.
[16] Vujosevic S, Fantaguzzi F, Silva PS, et al. Macula vs periphery in diabetic retinopathy: OCT-angiography and ultrawide field fluorescein angiography imaging of retinal non-perfusion. *Eye (Lond)*, 2024,38(9):1668-1673.
[17] Singh R, Tsai G, Banaee T, et al. Optical coherence tomography angiography in eyes with retinal vein occlusion. *J Ophthalmic Vis Res*, 2018,13(3):315.
[18] Aljohani S. Optical coherence tomography angiography (OCTA) characteristics of acute retinal arterial occlusion: a systematic review. *Healthcare (Basel)*, 2025,13(16):2056.
[19] 刘梦珂, 张正威. 视网膜微血管分形分析在眼科疾病中的研究进展. *国际眼科杂志*, 2025,25(8):1274-1279.
[20] 陈博雅, 段佳良, 徐延明, 等. 青年患者视网膜血管阻塞性疾病随访观察. *河北医科大学学报*, 2025,46(5):591-596.
[21] An WT, Zhao Q, Yu RG, et al. The role of optical coherence tomography angiography in distinguishing ischemic versus non-ischemic central retinal vein occlusion. *BMC Ophthalmol*, 2022,22(1):413.
[22] Zhao XY, Zhao Q, Wang CT, et al. Central and peripheral changes in retinal vein occlusion and fellow eyes in ultra-widefield optical coherence tomography angiography. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2024,65(2):6.
[23] Kashani AH, Chen CL, Gahm JK, et al. Optical coherence

tomography angiography: a comprehensive review of current methods and clinical applications. *Prog Retin Eye Res*, 2017,60:66-100.

[24] Gao Y, Zhang S, Zhao Y, et al. Reduction of retinal vessel density in non-exudative macular neovascularization; a retrospective study. *Front Med*, 2023,10:1219423.

[25] 邹天霞, 俞添祥, 胡懿文, 等. OCTA 定量分析高度近视眼视盘旁萎缩弧对视网膜及脉络膜血流密度的影响. *浙江医学*, 2025,47(24):2615-2620,2690.

[26] 黄珍. 早中期年龄相关性黄斑变性疾病进展的相关因素分析与干预. 南方医科大学, 2023.

[27] 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. *锦州医科大学学报*, 2025,46(3):64-70.

[28] Taylor TRP, Menten MJ, Rueckert D, et al. The role of the retinal vasculature in age-related macular degeneration: a spotlight on OCTA. *Eye (Lond)*, 2024,38(3):442-449.

[29] 宋吉晨. 外周血相关血液参数与原发闭角型青光眼的关联性研究. 吉林大学, 2025.

[30] 宋丽琴, 张明烜, 罗文静, 等. 光学相干断层扫描血管成像技术在青光眼中的应用进展. *中国现代医生*, 2024,62(12):112-115.

[31] Ekici E, Moghimi S, Bowd C, et al. Capillary density measured by optical coherence tomography angiography in glaucomatous optic disc phenotypes. *Am J Ophthalmol*, 2020,219:261-270.

[32] Lee J, Park CK, Park HL. Determinants of vessel defects in superficial and deep vascular layers in normal-tension glaucoma using optical coherence tomography angiography. *Sci Rep*, 2021,11(1):9941.

[33] 冯冰. 地塞米松玻璃体内植入剂对非感染性视网膜血管炎合并黄斑水肿患者黄斑形态与微循环的影响. 扬州大学, 2024.

[34] 蔡建园, 李伟娟. 光学相干断层扫描血管成像检查在老年性黄斑变性不同活动性脉络膜新生血管中的应用效果. *医疗装备*, 2025,38(6):75-78.

[35] 程勇. 基于“治未病”理论探索耳穴压丸对学龄期儿童正视化过程中脉络膜微循环的影响. 陕西中医药大学, 2025.

[36] Ho S, Ly A, Ohno-Matsui K, et al. Diagnostic accuracy of OCTA and OCT for myopic choroidal neovascularisation: a systematic review and meta-analysis. *Eye (Lond)*, 2023,37(1):21-29.

[37] Lu HW, Wang ZF, Xin ZT, et al. To evaluate the microcirculation of retinochoroid capillary between acute and chronic central serous chorioretinopathy with OCTA. *Medicine*, 2021,100(35):e27069.

[38] Gawęcki M, Kiciński K. Advantages of the utilization of wide-field OCT and wide-field OCT angiography in clinical practice. *Diagnostics (Basel)*, 2024,14(3):321.

[39] 李乐, 许一帆, 魏菁. 动脉周围无毛细血管区 OCTA 评估 DR 严重程度的研究进展. *国际眼科杂志*, 2026,26(3):441-446.

[40] 朱研, 易佐慧子, 杨燕宁. 光学相干断层扫描血管成像在慢性闭角型青光眼诊断中的应用. *武汉大学学报(医学版)*, 2017,38(1):53-56.

[41] 刘亮. OCT/OCTA 联合视野在视神经相关疾病中的临床应用分析. 海南医学院, 2023.

[42] 李世强, 马燕, 王家伟. 光学相干断层扫描血管成像在全身疾病中的临床应用研究进展. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2026,40(01):127-134.

[43] Alfauri H, Turer TI, Manjaly C, et al. Accuracy and reliability of artery-vein differentiation in small-field macular OCT angiography. *J Med Imag*, 2026,13(2):025501.