·文献综述·

OCTA 在眼底疾病诊疗与随访中的应用与展望

孙 涛[1],刁启航[2],高荣玉[3],付梦军[3],孙先勇[3]

引用:孙涛,刁启航,高荣玉,等. OCTA 在眼底疾病诊疗与随访中的应用与展望. 国际眼科杂志, 2026,26(12):2130-2135.

基金项目:潍坊市科技发展计划项目(No. 2024RKX096, 2025ZJ1121)

作者单位:[1](261000)中国山东省潍坊市,山东第二医科大学临床医学院;[2](264100)中国山东省烟台市,山东医药大学第二临床医学院;[3](261000)中国山东省潍坊市,潍坊眼科医院 正大光明眼科集团
作者简介:孙涛,在读硕士研究生,研究方向:眼底病。
通讯作者:付梦军,博士,主任医师,硕士研究生导师,研究方向:眼视光学. doctmengjunfu@163.com;孙先勇,硕士,主任医师,硕士研究生导师,研究方向:眼底病学.xianyongs1968@aliyun.com

收稿日期: 2026-04-06 修回日期: 2026-10-13

摘要

近年来,光学相干断层扫描血管成像(OCTA)得到了广泛的临床应用,它的基本原理是通过分析光学相干断层扫描(OCT)信号的时间变异度来构建视网膜血管系统的灌注图像,生成类似传统血管造影眼底图像的视觉效果。传统的造影技术,如眼底荧光素血管造影(FFA)和吲哚菁绿血管造影(ICGA)对诊断眼底血管性疾病有重要的意义。但 FFA 和 ICGA 需要依赖造影剂,属于有创检查,耗时较长,还存在过敏等风险,且仅能生成二维正面图像,深度分辨率也有限,难以实现不同层级的血管分割。OCTA 的优势在于无需任何血管内注射染料,即可形成眼部不同层次的视网膜和脉络膜血管系统的三维成像信息,不仅能够精确定位病变的深度位置,还能提供特定时间点的血流信息,且 OCTA 的量化指标还可以有效地评估眼部血管系统的结构特征,所以 OCTA 在糖尿病视网膜病变(DR)、视网膜静脉阻塞(RVO)、年龄相关性黄斑变性(ARMD)、青光眼等疾病的诊断、治疗和随访中得到了广泛临床应用。当然 OCTA 成像技术也存在自身局限性,如无法评估血管渗漏、伪影干扰显著、扫描视野有限等。文章旨在系统梳理 OCTA 的技术发展、临床应用证据,并对其未来的临床应用进行展望。

关键词:眼底疾病;光学相干断层扫描血管成像(OCTA);糖尿病视网膜病变;年龄相关性黄斑变性;视网膜静脉阻塞
DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.12.10

Application and prospects of OCTA in the diagnosis, treatment and follow-up of ocular fundus diseases

Sun Tao[1], Diao Qihang[2], Gao Rongyu[3], Fu Mengjun[3], Sun Xianyong[3]

Foundation items: Weifang Science and Technology Development Plan Project (No.2024RKX096, 2025ZJ1121)

[1]School of Clinical Medicine, Shandong Second Medical University, Weifang 261000, Shandong Province, China; [2]The Second School of Clinical Medicine, Shandong Medical and Pharmaceutical University, Yantai 264100, Shandong Province, China; [3]Weifang Eye Hospital; Zhengda Guangming Eye Group, Weifang 261000, Shandong Province, China
Correspondence to: Fu Mengjun. Weifang Eye Hospital; Zhengda Guangming Eye Group, Weifang 261000, Shandong Province, China. doctmengjunfu@163.com; Sun Xianyong. Weifang Eye Hospital; Zhengda Guangming Eye Group, Weifang 261000, Shandong Province, China. xianyongs1968@aliyun.com

Received:2026-04-06 Accepted:2026-10-13

Abstract

• In recent years, optical coherence tomography angiography (OCTA) has been extensively adopted in clinical practice. Its core principle is to reconstruct perfusion maps of the retinal vasculature by analyzing temporal fluctuations in optical coherence tomography (OCT) signals, producing visual outcomes comparable to those obtained from conventional fundus angiography. Traditional angiographic modalities including fluorescein angiography (FFA) and indocyanine green angiography (ICGA) play a vital role in diagnosing retinal vascular disorders. Nevertheless, FFA and ICGA rely on intravascular contrast media, which renders them invasive and time-consuming examinations. They also carry potential risks such as hypersensitivity reactions and merely produce two-dimensional en face images withlimited depth resolution, restricting layered vascular segmentation. By contrast, OCTA can acquire three-dimensional imaging data of retinal and choroidal vasculature across distinct ocular layers without intravascular dye injection. It enables accurate depth localization of lesions and captures instantaneous blood flow signals. Furthermore, quantitative metrics extracted from OCTA can reliably characterize the morphological features of intraocular vasculature. Accordingly, OCTA has been broadly utilized for the diagnosis, therapeutic monitoring and follow-up of multiple ocular disorders, including diabetic retinopathy (DR), retinal vein occlusion (RVO), age-related macular degeneration (ARMD) and glaucoma. Nevertheless, OCTA imaging still has inherent drawbacks, such as inability to assess vascular leakage, prominent artifact interference, and limited scanning field of view. This paper systematically reviews the technical evolution and clinical research evidence of OCTA, and explores its potential clinical applications in the future.

• KEYWORDS: fundus diseases; optical coherence tomography angiography (OCTA); diabetic retinopathy; age-related macular degeneration; retinal vein occlusion

Citation: Sun T, Diao QH, Gao RY, et al. Application and prospects of OCTA in the diagnosis, treatment and follow-up of ocular fundus diseases. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26(12):2130-2135.

0 引言

光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)作为一种非侵入性成像技术,给眼科诊疗带来了巨大帮助[1-2]。当OCT扫描生物组织时,高灵敏度光电探测器捕获样本光与参考光叠加形成的干涉图样,并将其转换为电信号。模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)是OCT的关键技术,可以把模拟信号转化为可供处理的数字数据,最终通过数字化信号处理,重建展现组织微观结构的高分辨率断层图像。在过去的近30 a里,OCT在成像质量、成像速度方面不断改进,经历了从时域OCT(time-domain optical coherence tomography, TD-OCT)到光谱域OCT(spectral domain optical coherence tomography, SD-OCT)再到扫频源OCT(swept source optical coherence tomography, SS-OCT)的技术发展过程[3]。与SD-OCT相比,SS-OCT具有灵敏度更高、成像深度更大、成像范围更广、检测效率更优及可实现双平衡检测等优势,在脉络膜、玻璃体及视网膜的成像研究中发挥重要作用[4]。OCT系统仅能对视网膜同一位置进行静态、连续B扫描,尚不能完成对血流灌注区域的散斑的动态观察。

近年来,光学相干断层扫描血管成像(optical coherence tomography angiography, OCTA)在临床上也得到广泛的应用,它的基本原理是通过分析OCT信号的时间变异度来构建视网膜血管系统的灌注图像,最终将这些二维图像合成为三维数据体,同步呈现视网膜结构与血流信息,生成类似传统血管造影眼底图像的视觉效果[5]。视网膜血管网络在轴向上分为4个独立的毛细血管丛,从视网膜前界至后极方向依次为神经纤维层血管丛(nerve fiber layer vascular plexus, NFLVP)、浅层毛细血管丛(superficial capillary plexus, SCP)、中层毛细血管丛(intermediate capillary plexus, ICP)、深层毛细血管丛(deep capillary plexus, DCP),准确区分视网膜血管丛对视网膜血管疾病的精准诊断与随访至关重要。传统的造影技术,如眼底荧光素血管造影(fundus fluorescein angiography, FFA)和吲哚菁绿血管造影(indocyanine green angiography, ICGA)对诊断眼底血管性疾病有重要的意义[6-7]。但FFA和ICGA需要依赖造影剂,需要有创性操作,耗时长,还存在过敏的风险,且仅能生成二维正面图像,深度分辨率也有限,难以实现不同层级的血管分割[8]。OCTA的优势在于无需任何血管内注射染料,即可形成眼部不同层次的视网膜和脉络膜血管系统的三维成像信息,不仅能够精确定位病变的深度位置,还能提供特定时间点的血流信息[4,9]。OCTA的量化指标还可以有效地评估眼部血管系统的结构特征,如血管/灌注密度、血管面积密度、血管长度指数等。这些参数在糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)、视网膜静脉阻塞(retinal vein occlusion, RVO)、年龄相关性黄斑变性(age-related macular degeneration, ARMD)、青光眼等疾病的诊断中有重要价值。此外,OCTA还可以推导其他定量参数,包括特定区域的血管面积与形态测量,如中心凹无血管区(foveal avascular zone, FAZ)及分割后的新生血管病灶、表征血管分支形态及网络结构特征的参数等。这些测量参数可以有效捕捉眼底血管形态与空间排列的病理学改变,为眼底血管性疾病的诊断和随访提供重要的依据[5]。本文旨在系统梳理OCTA的技术发展、OCTA在常见眼底病中的应用(图1),并对其未来的临床应用进行展望。

1 OCTA在常见眼病中的应用

1.1 OCTA在DR中应用 DR是糖尿病常见并发症,病情重者可致失明。DR按病情进展过程分为非增殖性糖尿病视网膜病变(non-proliferative diabetic retinopathy, NPDR)和增殖性糖尿病视网膜病变(proliferative diabetic retinopathy, PDR),还可出现糖尿病性黄斑水肿(diabetic macular edema, DME)。随着糖尿病发病率的升高,DR的发病率也呈上升趋势,有研究显示约70%的糖尿病患者发病10 a后出现DR[10-11]。DR出现视力下降前,通常没有明显的临床症状,因此早期就诊率低,只有不到50%的糖尿病患者进行过早期的眼底筛查[10]。临床工作中,眼底镜、眼底照相和FFA是DR传统的检查方法,但其操作

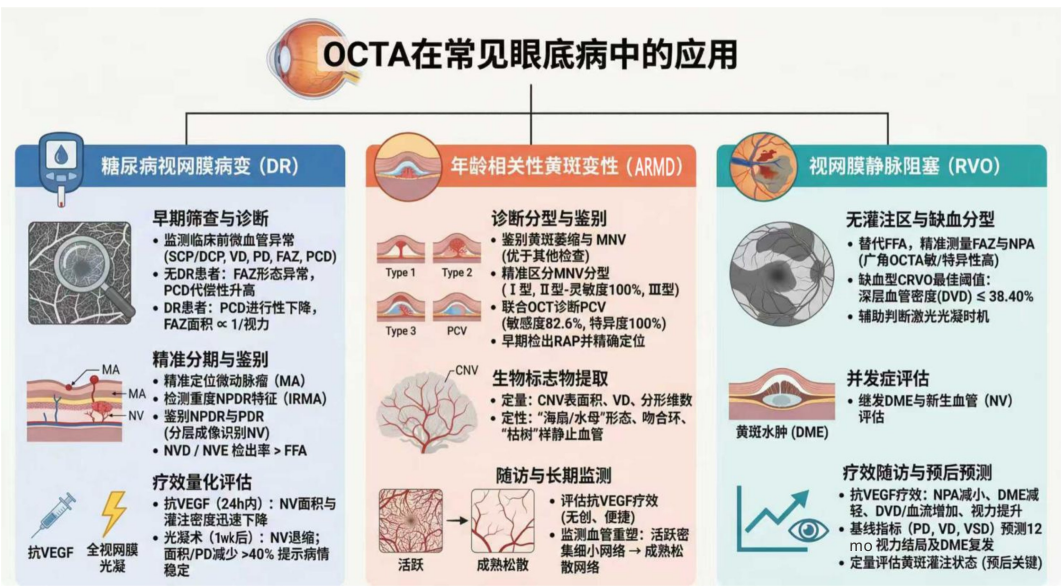


图1 OCTA在常见眼底病中的应用示意图。

复杂、有创性、药物致敏性等不足难以用于广泛普查[12]。目前,OCTA 检查发现视网膜微血管可能在糖尿病患者出现 DR 临床表现前就已经发生了异常,可用于早期 DR 的筛查和诊断,OCTA 的参数还可能成为 DR 诊断的潜在生物标志物,且具有随访价值[13-14]。

研究显示,在糖尿病患者中,不论是否已发生 DR,OCTA 的相关参数均可以作为监测视网膜微血管病变早期变化的潜在生物标志物,SCP、DCP 及视盘周围血管密度等[15]。此外,DR 患者的黄斑区血管密度、视盘周围血管密度(vessel density,VD)、中心凹周围灌注密度(perfusion density,PD)、FAZ 面积等指标同样为 DR 早期筛查潜在标志物[12]。在对 FAZ 的研究中发现,未发生 DR 的糖尿病患者与健康人群对比,虽然 FAZ 总面积可能无明显改变,但 FAZ 形态已发生明显差异,这有助于 DR 的早期诊断,且 FAZ 面积与视力呈负相关[14-16]。另有研究使用 OCTA 对灌注毛细血管密度(perfused capillary density,PCD)进行了研究,发现未出现 DR 的糖尿病患者,其 PCD 值高于健康人群;而已出现 DR 的糖尿病患者,其 PCD 进行性下降。这种 PCD 先升高后下降的过程,代表了血流灌注在 DR 病情进展中的代偿反应,因此 PCD 的下降可能具有生物标志物价值,且能提示视力损伤的风险[14]。以上这些 OCTA 参数的改变能比传统检查方法更早识别 DR 发生前的视网膜微循环改变,实现早期诊断,随着技术的不断改进,OCTA 有望在 DR 的准确诊断、病情评估及监测中发挥更大作用[12,16]。

NPDR 分为三期,Ⅰ期为轻度非增殖期,病理改变表现为毛细血管瘤样膨出,即微动脉瘤(microaneurysm,MA),OCTA 可以检测到传统检查无法发现的 MA,且分层成像技术可以对 MA 进行精准定位,在 DR 早期筛查中能发挥重要作用[9]。Ⅱ期为中度非增殖期,合并视网膜硬性渗出(hard exudates,HEs)、出血或棉絮斑(cotton wool spots,CWSs),介于轻度和重度阶段之间[17]。Ⅲ期 NPDR 为重度非增殖期,视网膜微血管异常(intraretinal microvascular abnormality,IRMA)是该期的特征性病变,IRMA 是视网膜内毛细血管异常分支或扩张形成的分流血管,可代偿无血管区的缺血状态[9,17]。研究显示,OCTA 检测 IRMA 的敏感性与 FFA 相当,但 OCTA 有分层成像优势,能精确定位 IRMA 的视网膜层次,有助于其与新生血管(neovascularization,NV)进行鉴别[16,18],进一步区分 NPDR 与 PDR,从而更准确评估 DR 的病情。DR 进展到 PDR 阶段的特征是出现 NV,若不及时治疗,NV 可能导致视网膜出血或牵拉性视网膜脱离等并发症,因此 NV 的早期诊断非常重要[9,17]。OCTA 对视盘新生血管(neovascularization of the optic disc,NVD)和视网膜其他部位新生血管(neovascularization elsewhere,NVE)的检出率也高于传统的 FFA,且已经形成了针对 NVD 的 OCTA 分型[16,18]。

OCTA 还可以评估 DR 抗血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor,VEGF)治疗后的病情变化。有学者应用 OCTA 观察玻璃体抗 VEGF 药物注射后 DR 患者视网膜新生血管面积、灌注密度和血管长度密度等参数,结果显示上述参数在抗 VEGF 药物注射后 24 h 即可出现降低,NVD 的消退可维持 1 mo 以上,之后可能出现血管再生[13]。

视网膜激光光凝术是 DR 所引发 DME 的常用手术方法,该治疗可损伤高耗氧的外层视网膜,封闭毛细血管渗漏,并通过热效应减少 NV 的生成[19]。使用 OCTA 观察全视网膜光凝治疗 PDR 后视网膜 NV 变化发现,NV 在术后 1 wk 即可出现退缩,可以维持 3 mo 以上[20]。OCTA 还显示 NV 面积或灌注密度减少 40% 以上,提示新生血管达到一种稳定状态,无需再行额外干预[13]。OCTA 通过量化该过程中 NV 的变化,起到评估治疗效果的作用。

1.2 OCTA 在 ARMD 中的应用 ARMD 约占全球失明总人数的 9%,是 50 岁以上人群视力丧失的主要原因,目前确切发病机制仍不明确[21-22]。根据病程,ARMD 可分为早期和晚期病变,晚期 ARMD 又可分为萎缩性和新生血管性年龄相关性黄斑变性(neovascular age-related macular degeneration,nARMD)两种[23-24]。萎缩性 ARMD 约占全部晚期病例的 80%-90%,nARMD 则以黄斑区脉络膜异常血管增生为特征,约占所有 ARMD 确诊患者的 15%[23,25]。在欧洲 60 岁以上人群中,早期、晚期 ARMD 的患病率分别为 25.3% 和 2.4%,亚洲人群 ARMD 的患病率与欧洲人群相近,但息肉样脉络膜血管病变(polypoidal choroidal vasculopathy,PCV)的发病率较高[23]。随着人口老龄化加重,据预测未来该病的患病率可能超过 20%,因此优化该病有效地筛查和诊断方法非常重要[24]。

ARMD 根据黄斑新生血管(macular neovascularization,MNV)的来源可分为三型:Ⅰ型 MNV 起源于脉络膜毛细血管,不突破视网膜色素上皮层,是 ARMD 中最常见的类型;Ⅱ型 MNV 指血管在视网膜色素上皮和神经上皮层间生长;Ⅲ型 MNV 又称视网膜血管瘤样增生(retinal angiomatous proliferation,RAP),血管起源于神经上皮层并向深层生长,与脉络膜形成吻合[26]。此外,nARMD 还包括 PCV 这一较特殊类型,特征为视网膜下息肉状血管病灶伴视网膜色素上皮浆液性脱离[23]。以往 FFA 或 ICGA 是 MNV 诊断和分类的金标准,近年来,有学者指出 FFA 联合 OCT 对 MNV 的诊断和评估比单独 FFA 效果更好,是诊断 nARMD 的新金标准,在丹麦 OCTA 与结构 OCT 已成为 nARMD 的主要诊断方法[21,27-28]。还有学者认为,OCTA 在鉴别黄斑萎缩眼的 MNV 时,效果优于其他检查,建议将 OCTA 作为多模态成像评估萎缩眼的一部分[29]。多项研究结果表明,OCTA 检测 nARMD 的灵敏度约为 70%-80%,但在不同 MNV 亚型间存在差异,其中对 2 型 MNV 的检查灵敏度达 100%,1 型和 3 型分别为 73.5% 和 88.9%[27]。OCTA 已识别出“水母型”与“海扇型”两种不同的 1 型 MNV 形态,“水母型”的血管呈全方向分支,“海扇型”的血管主要从病灶单侧呈辐射状分支,且两种 MNV 的形态均以细小分支血管、吻合结构及血管环为特征[30]。另有研究显示 OCTA 可早期检测视网膜内的 RAP 病灶,且能在不同视网膜层面精确定位新生血管的层次,对病情严重程度进行有效评估,而 OCT、FFA 的早期诊断效果欠佳,在鉴别 PCV 时,采用 OCTA 联合 OCT 的诊断效果最好,其敏感度为 82.6%,特异度达 100%[31]。

目前多项研究聚焦在 OCTA 成像中一系列定量特征及形态学特征,形成具有 ARMD 诊断价值的定量标志物及定性标志物[32]。定量标志物如 CNV 表面积、血管密度、血管总长度、血管交汇点密度、分形维数和空隙率,定性标志物如与新生血管病变相关的“海扇”或“水母”状结构、吻合环、外周拱形结构以及病灶周围的低信号晕,与非活动性 CNV 相关类似“枯树”样外观的丝状线性血管和成熟的大血管[30,33]。然而,当前用上述定性和定量 OCTA 生物标志物诊断及评估病情仍处于起步阶段,尚不能发挥关键作用,但未来发展前景广阔[24,28]。

随着预期寿命的增加,ARMD 的患病率逐年上升[28]。

近 10 a 来,玻璃体内注射抗 VEGF 药物已成为 nARMD 的标准治疗方法[33]。研究表明 OCTA 可用于观察评估玻璃体内抗 VEGF 注射的疗效,治疗前活跃期的 CNV 为密集网络,包含许多小分支血管和毛细血管,经治疗后血管结构重塑、血管树分支减少,残余血管出现更多动脉生成迹象,治疗后为血管形态为血管较大、分支较少的松散网络,即使在 CNV 总面积有所增大的情况下,这种治疗后更成熟的血管改变仍能观察到[26,34]。OCTA 操作便捷,更适合用于 ARMD 针对性和个性化的随访监测[33]。

1.3 OCTA 在 RVO 中的应用 RVO 是仅次于 DR 的第二大常见视网膜血管疾病,据统计,在 30-89 岁人群中的全球患病率为 0.77%[35-37]。RVO 的发病机制为视网膜静脉系统血栓形成和阻塞。根据阻塞部位不同,RVO 可分为视网膜中央静脉阻塞(central retinal vein occlusion,CRVO)和视网膜分支静脉阻塞(branch retinal vein occlusion,BRVO),BRVO 的发病率约为 CRVO 的 5 倍[38]。RVO 可造成毛细血管损伤,从而引发 DME、NV 形成、视网膜出血等并发症,最终导致严重的视力丧失[39-40]。传统上,FFA 一直是诊断和分级 RVO 的金标准,用于评估中心凹无血管区范围、视网膜中央及周边缺血程度、检测 DME 并评估视网膜非灌注区(non-perfusion area,NPA)[41-42]。近年来 OCTA 因其独特优势,成为重要的诊断工具,它能对各层面血管结构分层成像,同时获取形态学与灌注状态的重要信息,实现对视网膜血管疾病的精确诊断与随访监测[36,43]。

研究显示约 23%的缺血型 RVO 患者会在 15 mo 内会发生新生血管性青光眼,但该并发症极少发生在非缺血型 RVO 病例中,因此早期诊断缺血型 RVO 并及时干预非常重要[44]。OCTA 能量化浅层与深层毛细血管丛的血管密度,并测量 FAZ 面积,在定性检测无灌注区方面与超广角荧光素血管造影效果相当,两种检查对无灌注区的定量检测结果高度一致,在评估 CRVO 缺血分型中有重要作用[38]。研究显示,OCTA 参数如 FAZ 测量参数和周边灌注指数,可作为区分缺血性与非缺血性 CRVO 的指标,能提升诊断准确性并辅助制定治疗方案[45]。广角 OCTA 在检测 RVO 无灌注区方面的敏感性和特异性均极高,预测广角 OCTA 有可能替代 FFA 成为评估 RVO 无灌注状态的首选方法[46]。视网膜深层血管密度(deep vascular density,DVD)≤ 38.40%可作为判断缺血型 CRVO 的最佳阈值,因此对于新诊断的 CRVO 患者可在治疗期间采用 OCTA 随访,当 DVD ≤ 38.40%时再进行超广角 FFA 检查明确视网膜无灌注区范围,决定是否需要行视网膜激光光凝以预防新生血管生成[44]。在随访过程中,OCTA 的使用减少了有创检查的次数,辅助判断了视网膜激光的治疗时机。

RVO 引发的 DME 或 NV 并发症可能导致视力丧失,抗 VEGF 治疗目前是 RVO 继发 DME 的一线治疗方法[47]。有研究使用 OCTA 检测 RVO 患者抗 VEGF 治疗后视网膜无灌注区的改善情况,发现注射频率越高,缺血区域减少越显著,旁中心凹血管密度值显著增加[35]。RVO 患者经抗 VEGF 治疗后,其 OCTA 无灌注区面积减小,DME 减轻,视网膜浅层血管密度显著下降,深层血管密度和脉络膜毛细血管层血流面积增加,视力提高[48]。黄斑灌注状态是影响患者视力预后及抗 VEGF 治疗反应的关键因素之一,通过 OCTA 图像定量测量,能比 FFA 更好地判定黄斑灌注状态,研究表明 OCTA 获取的灌注密度或血管密度指标对 BRVO 患眼的功能预后及 DME 复发风险具有预测价值[49]。有研究评估基线期使用广角 OCTA 微血管指标对 RVO 患者进行 12 mo 随访期间所需抗 VEGF 注射次数及视力结局的预测价值,结果显示 VD 与血管骨架密度(vascular skeleton density,VSD)的降低与所有随访时间点所需抗 VEGF 注射次数的增加及影像采集后 12 mo 视力下降均相关,所以基线期广角 OCTA 的 VD 与 VSD 微血管指标可预测 RVO 患眼 12 mo 的视力结局以及所需的抗 VEGF 注射次数[50]。本研究体现出了 OCTA 在 RVO 患者抗 VEGF 治疗临床随访中的重要价值。

2 OCTA 的优势

OCTA 成像技术具有多项优势:(1)与结构 OCT 图像相比,OCTA 图像具有更高的对比度,而对比度是临床影像中诊断病变的最重要参数之一,在临床成像中可以明显发现这两种成像技术间的对比度差异[4]。(2)在临床应用中,OCTA 检查可在数分钟内以非侵入方式完成,且可多次检查,而 FFA 和 ICGA 因需注射荧光染料,每位患者耗时较长[51]。此外,FFA 可能发生如恶心、呕吐、荨麻疹、晕厥,甚至呼吸困难、心功能紊乱、死亡等不同程度的药物不良反应[8]。(3)OCTA 能够分别清晰呈现视网膜及脉络膜的结构与各层血流信息,尤其可清晰显示 FFA 无法观测的视网膜 DCP,其对血管病变的评估与定位精细程度远超 FFA 和 ICGA,而 FFA 仅能提供眼底的二维图像,且所提供的视网膜血管图像仅局限于 SCP[5,8,52-53]。(4)FFA 中因染料渗漏导致的细节遮蔽是一个难以解决的技术难题,但它本身也是诊断视网膜血管病理状态的标志;OCTA 因为不存在这种细节遮蔽问题,在某些情况下更有利于对病变的评估[38]。(5)OCTA 能够实时计算重要的微血管数字图像参数,即生物标志物,这些生物标志物与某些疾病的定性和定量检测有关,有助于疾病的筛查、辅助诊断、病情评估和随访[11,14,54]。

3 OCTA 的局限性

OCTA 成像技术存在以下局限性:(1)无法评估血管渗漏,因其仅能检测红细胞运动,对低速血流不敏感,难以显示血-视网膜屏障的破坏及低流速新生血管[6,53];(2)投影伪影是一个不容忽视的干扰,即浅层微血管在深层组织上的投射现象,如视网膜血管在脉络膜血管层形成假阳性信号、玻璃体漂浮物、眼底出血、分割误差等都会影响对血管密度和无灌注区的准确评估[55]。OCTA 的另一局限是视野范围受限,与超广角荧光素血管造影相比难以充分显示周边无灌注区,且扩大视野会降低分辨率,但自动拼接技术的开发有望改善这一局限[38,56-57]。另外,头部或眼球的移动、固视不良等运动也会在 OCTA 中产生畸变和虚假信号,干扰运动信号分析,在 OCTA 图像中形成矩形缺损区[5-6,58]。

4 OCTA 与 FFA 和 ICGA 及结构 OCT 联合应用

OCTA 数据与结构 OCT 具有共定位特性,能准确建立血流与解剖结构的空间关联,使血管病变的定位精细程度远超 FFA 和 ICGA[53]。同时,OCTA 与 FFA/ICGA 具有互补性:OCTA 无创安全,适合需要频繁随访复查的患者,而 FFA 和 ICGA 则是确认血管渗漏及评估眼底周边病变的必要工具[4,51]。因此,OCTA 与 FFA/ICGA/OCT 并非取代关系,而是互补关系,临床实践中需联合运用多种影像技术以更准确地获取病情信息[53]。

5 小结与展望

目前 OCTA 技术在设备标准化、图像伪影及扫描范围等方面仍面临诸多挑战,不同仪器间的算法差异导致数据难以直接比较,未来亟需推进数据标准化建设,同时提高

采集速度、扩大视野、实现血流速度评估及消除投影伪影已成为技术发展的重要方向[55,59]。人工智能(artificial intelligence,AI)的引入为克服这些局限提供了新路径,AI 降噪系统在检测视网膜新生血管方面已达传统方法 99%的有效性;深度学习算法在处理 OCTA 大数据方面展现出强大优势,已在多种重大眼病的辅助诊断中取得突破,未来有望在辅助治疗决策、预测视力预后及个体化医疗中发挥关键作用。随着 AI 技术的进步和跨平台兼容性的提高,OCTA 在诊断、疾病监测和个性化治疗策略中的应用前景可期[60]。

此外,多模态成像技术的综合应用显著提升了对 DME 等疾病的诊断与评估水平,为个体化治疗奠定基础[61]。从更广阔的视角看,OCTA 正被用于探索阿尔茨海默病(alzheimer's disease,AD)等神经系统疾病的早期标志物,目前已有超过 100 项临床试验正在拓展其应用范围[62-64]。基于 AI 的精准诊断将变得愈发重要,尤其是在为经验较少的眼科医生提供治疗决策支持方面[65]。尽管 OCTA 的全面推广仍需跨平台标准化支持,但随着设备性能持续提升,该技术有望在未来十年内发展成为一线影像学检查手段[66]。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。
作者贡献声明:孙涛论文选题与修改,初稿撰写;刁启航、高荣玉文献检索,数据分析;付梦军、孙先勇选题指导,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] Tsang SH, Sharma T. Optical Coherence Tomography. Atlas of Inherited Retinal Diseases. Cham: Springer, 2025: 13-15.
[2] Laíns I, Wang JC, Cui Y, et al. Retinal applications of swept source optical coherence tomography (OCT) and optical coherence tomography angiography (OCTA). Prog Retin Eye Res, 2021, 84: 100951.
[3] Zeppieri M, Marsili S, Enaholo ES, et al. Optical coherence tomography (OCT): a brief look at the uses and technological evolution of ophthalmology. Medicina (Kaunas), 2023,59(12):2114.
[4] Koutsiaris AG, Batis V, Liakopoulou G, et al. Optical Coherence Tomography Angiography (OCTA) of the eye: a review on basic principles, advantages, disadvantages and device specifications. Clin Hemorheol Microcirc, 2023,83(3):247-271.
[5] Rocholz R, Corvi F, Weichsel J. OCT Angiography (OCTA) in Retinal Diagnostics. High Resolution Imaging in Microscopy and Ophthalmology. Cham: Springer, 2019:135-160.
[6] Javed A, Khanna A, Palmer E, et al. Optical coherence tomography angiography: a review of the current literature. J Int Med Res, 2023, 51(7):03000605231187933.
[7] 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.
[8] Savastano MC, Rispoli M, Lumbroso B, et al. Fluorescein angiography versus optical coherence tomography angiography: FA vs OCTA Italian Study. Eur J Ophthalmol, 2021,31(2):514-520.
[9] Sun ZH, Yang DW, Tang ZQ, et al. Optical coherence tomography angiography in diabetic retinopathy: an updated review. Eye, 2021, 35(1):149-161.
[10] Chong DD, Das N, Singh RP. Diabetic retinopathy: Screening, prevention, and treatment. Clevel Clinic J Med, 2024,91(8):503-510.
[11] Kour V,Swain J, Singh J, et al. A review on diabetic retinopathy. Curr Diabetes Rev, 2024,20(6):e201023222418.
[12] Le P, Zehden J, Zhang AY. Role of optical coherence tomography angiography imaging in patients with diabetes. Curr Diabetes Rep, 2021, 21(10):42.
[13] Nouri H, Abtahi SH, Mazloumi M, et al. Optical coherence tomography angiography in diabetic retinopathy: a major review. Surv Ophthalmol, 2024,69(4):558-574.
[14] Suciu CI, Suciu VI, Nicoara SD. Optical coherence tomography (angiography) biomarkers in the assessment and monitoring of diabetic macular edema. J Diabetes Res, 2020,2020:6655021.
[15] Yang F, Zou WJ, Li ZW, et al. Optical coherence tomography angiography for detection of microvascular changes in early diabetes: a systematic review and meta-analysis. Diabetes Metab Res Rev, 2024, 40(4):e3812.
[16] Waheed NK, Rosen RB, Jia YL, et al. Optical coherence tomography angiography in diabetic retinopathy. Prog Retin Eye Res, 2023,97:101206.
[17] Huang Y, Kong X, Zhou L, et al. Values of optical coherence tomography angiography for diagnosing diabetic retinopathy and evaluating treatment outcomes. J Français D'ophtalmologie, 2023, 46(1):25-32.
[18] Borrelli E, Battista M, Sacconi R, et al. Optical coherence tomography angiography in diabetes. Asia Pac J Ophthalmol, 2021, 10(1):20-25.
[19] 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.
[20] Feng HE, Weihong YU, Dong FT. Observation of retinal neovascularization using optical coherence tomography angiography after panretinal photocoagulation for proliferative diabetic retinopathy. BMC Ophthalmol, 2021,21(1):252.
[21] Taha AA, Lazar D, Julin C, et al. Use of optical coherence tomography angiography for the diagnosis of age-related macular degeneration. Dan Med J,2023,70(10):A12220780.
[22] Brinkmann M, Müller T, Köster M, et al. Optical coherence tomography angiography flow signal in non-treatment-Naïve patients with neovascular age-related macular degeneration treated with faricimab. Medicina (Kaunas), 2025,61(2):260.
[23] di Pippo M, Santia C, Rullo D, et al. The choroidal vascularity index versus optical coherence tomography angiography in the evaluation of the choroid with a focus on age-related macular degeneration. Tomography, 2023,9(4):1456-1470.
[24] Tillmann A, Turgut F, Munk MR. Optical coherence tomography angiography in neovascular age-related macular degeneration: comprehensive review of advancements and future perspective. Eye (Lond), 2025,39(5):835-844.
[25] Maesa JM, Baños-Álvarez E, Rosario-Lozano MP, et al. Diagnostic accuracy of optical coherence tomography angiography in the detection of neovasculature in age-related macular degeneration: a meta-analysis. Acta Ophthalmol, 2022,100(2):e368-e376.
[26] Barayev E, Meshi A, Gershoni A, et al. Optical coherence tomography angiography patterns of type 1 macular neovascularization in age-related macular degeneration patients. Eur J Ophthalmol, 2023, 33(4):1697-1705.
[27] Chen CX, Liu ML, Cao K, et al. Diagnostic value of optical coherence tomography angiography for choroidal neovascularization in age-related macular degeneration: a systematic review and meta-analysis. Ophthalmic Res, 2021,64(5):704-712.
[28] Faatz H, Rothaus K, Ziegler M, et al. Correlation of retinal alterations with vascular structure of macular neovascularisation in swept-source optical coherence tomography angiography in age-related macular degeneration. Int Ophthalmol, 2022,42(5):1553-1562.
[29] Corvi F, Cozzi M, Invernizzi A, et al. Optical coherence tomography angiography for detection of macular neovascularization associated with atrophy in age-related macular degeneration. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2021,259(2):291-299.
[30] Serra R, Coscas F, Pinna A, et al. Quantitative optical coherence tomography angiography features of inactive macular neovascularization in

age-related macular degeneration. Retina, 2021,41(1):93-102.
[31] Valler D, Feucht N, Lohmann CP, et al. Diagnostische Kriterien: OCT-Angiographie Bei retinalen angiomatösen Proliferationen (RAP-Läsionen, Typ-3-Neovaskularisationen). Der Ophthalmol, 2020, 117(6):529-537.
[32] Yang WZ, Song CY, Gao M, et al. Effects of smoking on the retina of patients with dry age-related macular degeneration by optical coherence tomography angiography. BMC Ophthalmol, 2022,22(1):315.
[33] Cho HJ, Kim J, Nah SK, et al. Nonexudative morphologic changes of neovascularization on optical coherence tomographyangiography as predictive factors for exudative recurrence in age-related macular degeneration. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2022, 260(3): 839-848.
[34] Ozdemir Zeydanli E, Gurelik G. Optical coherence tomography angiography markers associated with treatment response in neovascular age-related macular degeneration. Eur J Ophthalmol, 2021, 31(3): 1192-1200.
[35] Tripathy S, Le HG, Cicinelli MV, et al. Longitudinal changes on optical coherence tomography angiography in retinal vein occlusion. J Clin Med, 2021,10(7):1423.
[36] Wei LX, Zhao Q, Chen YX. Detection of retinal and choriocapillaris microvascular changes in retinal vein occlusion and fellow eyes by optical coherence tomography angiography: a systematic review and meta-analysis. Ophthalmol Ther, 2025,14(2):391-411.
[37] Aptikadir S, Sivkova N. Optical coherence tomography angiography analysis of microvascular network in retinal vein occlusion: superficial *vs*. deep capillary plexus. Folia Med, 2025,67(2):e146108.
[38] Tan TE, Ibrahim F, Chandrasekaran PR, et al. Clinical utility of ultra-widefield fluorescein angiography and optical coherence tomography angiography for retinal vein occlusions. Front Med, 2023,10:1110166.
[39] 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.
[40] Mejía ME, Ríos HA, Rosenstiehl S, et al. Optical coherence tomography angiography as predictor of visual outcomes in retinal vein occlusion treated with antiangiogenic therapy. Eur J Ophthalmol, 2023, 33(1):434-440.
[41] Cavalleri M, Sacconi R, Parravano M, et al. Optical coherence tomography angiography in central retinal vein occlusion: macular changes and their correlation with peripheral nonperfusion at ultra-widefield fluorescein angiography. Ophthalmologica, 2022, 245(3): 275-284.
[42] Werner JU, Dreyhaupt J, Enders C. Evaluation of automated measurement of macular ischemic changes in retinal vein occlusion with optical coherence tomography angiography. Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina, 2023,54(8):462-469.
[43] Fan LL, Zhu YZ, Liao RF. Evaluation of macular microvasculature and foveal avascular zone in patients with retinal vein occlusion using optical coherence tomography angiography. Int Ophthalmol, 2022, 42(1):211-218.
[44] 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.
[45] Elhabiby IAM, Mandour SS, Abdel Megeed Nage S. Evaluation of optical coherence tomography angiography role in differentiating ischemic and non-ischemic central retinal vein occlusion. Int Ophthalmol, 2025, 45(1):374.
[46] Nissen AHK, Vergmann AS. Clinical utilisation of wide-field optical coherence tomography and angiography: a narrative review. Ophthalmol Ther, 2024,13(4):903-915.
[47] Tang L, Sun GL, Zhao Y, et al. Optical coherence tomography angiography for macular microvessels in ischemic branch retinal vein occlusion treated with conbercept: predictive factors for the prognosis. Int J Ophthalmol, 2023,16(12):2049-2055.
[48] Śpiewak D, Witek K, Drzyzga Ł, et al. An analysis of optical coherence tomography angiography (OCT-A) perfusion density maps in patients treated for retinal vein occlusion with intravitreal aflibercept. Diagnostics (Basel), 2023,13(19):3100.
[49] Yeung L, Lee YC, Lin YT, et al. Macular ischemia quantification using deep-learning denoised optical coherence tomography angiography in branch retinal vein occlusion. Transl Vis Sci Technol, 2021,10(7): 23.
[50] Finn MJ, Baldwin G, Lains I, et al. Widefield, swept-source optical coherence tomography angiography metrics as predictors of anti-VEGF treatment in retinal vein occlusions. Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina, 2024,55(7):374-382.
[51] Shen XQ, Zhou TY, Sun ZH, et al. Trends in application of fundus fluorescein angiography in fundus diseases during a recent ten-year period. Photodiagn Photodyn Ther, 2024,46:104029.
[52] Zhang WN, Kaser-Eichberger A, Fan WL, et al. The structure and function of the human choroid. Ann Anat Anat Anz, 2024, 254:152239.
[53] Invernizzi A, Carreño E, Pichi F, et al. Experts opinion: OCTA *vs*. FFA/ICG in uveitis-which will survive Ocul Immunol Inflamm, 2023,31(8):1561-1568.
[54] Yang YY, Li FJ, Liu TT, et al. Comparison of widefield swept-source optical coherence tomographic angiography and fluorescein fundus angiography for detection of retinal neovascularization with diabetic retinopathy. BMC Ophthalmol, 2023,23(1):315.
[55] Protsyk O, Gallego-Pinazo R, Dolz-Marco R. Current limitations and future of optical coherence tomography angiography. Arch De La Soc Española De Oftalmol Engl Ed, 2022,97(8):421-423.
[56] Kadomoto S, Muraoka Y, Uji A, et al. Nonperfusion area quantification in branch retinal vein occlusion: a Widefield Optical Coherence Tomography Angiography Study. Retina, 2021, 41(6): 1210-1218.
[57] Arya M, Rashad R, Sorour O, et al. Optical coherence tomography angiography (OCTA) flow speed mapping technology for retinal diseases. Expert Rev Med Devices, 2018,15(12):875-882.
[58] Raevis J, Etheridge T, Cleland S, et al. Autoimmune retinopathy: findings and limitations from optical coherence tomography angiography. Int J Retina Vitreous, 2020,6(1):64.
[59] Salas M, Augustin M, Ginner L, et al. Visualization of micro-capillariesusing optical coherence tomography angiography with and without adaptive optics. Biomed Opt Express, 2017,8(1):207-222.
[60] Tseng YH, Wu PL, Kang EY, et al. Advancements in ocular blood flow imaging: Clinical applications of laser speckle flowgraphy andoptical coherence tomography angiography in retinal and choroidal vascular diseases. Surv Ophthalmol, 2026,71(2):627-646.
[61] Parravano M, Cennamo G, di Antonio L, et al. Multimodal imaging in diabetic retinopathy and macular edema: an update about biomarkers. Surv Ophthalmol, 2024,69(6):893-904.
[62] Kusuhara S. The heyday of optical coherence tomography angiography is just around the corner. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2023,261(2):337-338.
[63] Pellegrini M, Vagge A, Ferro Desideri LF, et al. Optical coherence tomography angiography in neurodegenerative disorders. J Clin Med, 2020,9(6):1706.
[64] Pujari A, Bhaskaran K, Sharma P, et al. Optical coherence tomography angiography in neuro-ophthalmology: Current clinical role and future perspectives. Surv Ophthalmol, 2021,66(3):471-481.
[65] Yang ZY, Zhang WF, Gu XW, et al. Polypoidal choroidal vasculopathy: in-depth insights and promising future directions. Prog Retin Eye Res, 2026,110:101414.
[66] Foulsham W, Chien J, Lenis TL, et al. Optical coherence tomography angiography: clinical utility and future directions. J Vitreoretin Dis, 2022,6(3):229-242.