

# 应用OCTA评价糖尿病视网膜病变患者的视网膜微循环与颈动脉狭窄的研究进展

李园平<sup>1</sup>, 杨冬妮<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>承德医学院研究生学院, 河北 承德

<sup>2</sup>秦皇岛市第一医院眼科, 河北 秦皇岛

收稿日期: 2026年2月11日; 录用日期: 2026年3月4日; 发布日期: 2026年3月17日

## 摘要

糖尿病视网膜病变(Diabetic Retinopathy, DR)是糖尿病(Diabetes Mellitus, DM)的一种威胁视力的微血管并发症, 是全球导致失明的主要原因。其发病机制与视网膜微循环障碍密切相关。颈动脉是供应大脑和眼部的主要血管, 颈动脉病理改变进而影响视网膜血流。近年来研究表明, 糖尿病视网膜病变与颈动脉狭窄(Carotid Artery Stenosis, CAS)之间存在密切关联。随着研究的深入, OCTA (Optical Coherence Tomography Angiography, OCTA)技术在评估糖尿病视网膜病变患者的视网膜微循环方面展现出巨大潜力, 为探讨其与颈动脉狭窄的关系提供了新的视角。然而, 目前仍需更多临床研究来验证OCTA在评估糖尿病视网膜病变与颈动脉狭窄关系中的应用价值, 以及深入探讨其潜在的诊断和预测作用。期望可以更全面地了解DR患者的血管病变情况, 为临床诊疗提供更精准的依据。

## 关键词

糖尿病性视网膜病变, 光学相干断层扫描血管造影(OCTA), 视网膜微循环, 颈动脉狭窄, 血管造影

# Application of OCTA in the Evaluation of Retinal Microcirculation and Carotid Artery Stenosis in Diabetic Retinopathy

Yuanping Li<sup>1</sup>, Dongni Yang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, Chengde Medical University, Chengde Hebei

<sup>2</sup>Department of Ophthalmology, First Hospital of Qinhuangdao, Qinhuangdao Hebei

Received: February 11, 2026; accepted: March 4, 2026; published: March 17, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 李园平, 杨冬妮. 应用 OCTA 评价糖尿病视网膜病变患者的视网膜微循环与颈动脉狭窄的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 2589-2597. DOI: 10.12677/acm.2026.1631059

## Abstract

Diabetic retinopathy (DR) is a microvascular complication of diabetes mellitus (DM) that threatens vision and is a leading cause of blindness worldwide. Its pathogenesis is closely associated with retinal microcirculatory disturbances. The carotid artery, the primary vessel supplying the brain and eye, exhibits pathological changes that subsequently affect retinal blood flow. Recent studies have demonstrated a significant correlation between diabetic retinopathy and carotid artery stenosis (CAS). With advancing research, OCTA (optical coherence tomography angiography) technology has shown great potential in evaluating retinal microcirculation in patients with diabetic retinopathy, providing a novel perspective for investigating its relationship with carotid artery stenosis. However, further clinical studies are still required to validate the application value of OCTA in assessing the relationship between diabetic retinopathy and carotid artery stenosis, as well as to explore its potential diagnostic and predictive roles. It is anticipated that a more comprehensive understanding of vascular pathology in DR patients will be achieved, offering more precise evidence for clinical diagnosis and treatment.

## Keywords

Diabetic Retinopathy, Optical Coherence Tomography Angiography (OCTA), Retinal Microcirculation, Carotid Artery Stenosis, Angiography

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

糖尿病视网膜病变是糖尿病最常见的微血管并发症之一, 是全球导致失明的主要原因, 约 30% 的糖尿病患者受到影响, 视力相关生活质量随着 DR 的严重程度而下降[1][2]。在我国随着糖尿病患病率的不断上升, 糖尿病视网膜病变的发病率也呈现逐年增加的趋势[3]。DR 的发病机制复杂, 涉及多种因素, 包括高血糖、血管内皮细胞功能障碍、炎症反应等。DR 的临床表现多样, 从早期无症状的微血管病变到晚期视网膜出血、渗漏、新生血管形成等, 最终导致患者丧失视力[4]。早期发现和及时干预对预防进展和降低视力丧失和全身级联并发症的风险至关重要[5]。

视网膜微循环的改变可以反映 DR 的进展程度[6]。颈动脉狭窄直接影响眼部血液供应, 可能引起眼缺血综合征[7]。Lawrence 等人发现, 闭塞大于 50% 的 CAS 病例中, 眼部症状的发生率显著增加[8]。因此, 研究视网膜微循环和颈动脉狭窄对 DR 的诊断和治疗具有重要意义。

近年来, OCTA 技术的出现为研究视网膜微循环提供了新的手段。OCTA 是一种快速、非侵入性, 非接触式的技术, 通过追踪红细胞运动, 实现视网膜血管系统的可视化[9][10]。目前关于 OCTA 评价糖尿病视网膜病变患者的视网膜微循环与颈动脉狭窄之间关系的研究仍较为有限。因此探讨 OCTA 在评估糖尿病视网膜病变患者视网膜微循环与颈动脉狭窄关系中的应用价值, 为 DR 的早期诊断、治疗和预后评估提供了新的思路。本文将就这一领域的研究进展进行综述, 为未来的研究方向提供参考。

## 2. OCTA 技术原理及其在糖尿病视网膜病变中的应用

### 2.1. OCTA 技术原理

OCTA 技术的基本原理是在同一视网膜位置连续捕获扫描, 通过检测视网膜血管内红细胞运动产生

的信号变化, 实现对视网膜各层血管系统的无创、深度分辨成像[11][12]。其优势在于无需注射造影剂, 可提供高对比度和分辨率的血管图像, 快速安全地评估视网膜微血管系统[13]-[16]。

## 2.2. OCTA 在糖尿病视网膜病变中的应用

DR 的病理生理过程可大致概括为: 外周和中央视网膜的视网膜毛细血管网络缺失、血管通透性增加、炎症发作以及慢性高血糖引起的神经退行性变。这些导致视网膜内出现可观察到的临床表现, 例如微动脉瘤、斑点和斑点出血、静脉串珠, 并最终在视网膜和视盘内形成新血管[10]。DR 分类的金标准历来是糖尿病视网膜病变早期治疗研究(Early Treatment of Diabetic Retinopathy Study, ETDRS)。更实用的方法是国际临床糖尿病视网膜病变和糖尿病黄斑水肿严重程度量表[17]。该量表将视网膜病变分为五种疾病类别, 并将水肿分为两类, 从而减轻了对详细分级的需求, 并提高了实践中的诊断效果。

OCTA 技术在糖尿病视网膜病变的诊断和评估中发挥着重要作用。近来研究表明 OCTA 作为 DR 诊断工具的未来是有希望的, 它为疾病提供了宝贵的见解, 有助于预防视力丧失[18]。同时有科学研究结果表明, 使用 OCTA 和眼底图像研究糖尿病视网膜病变的多模态数据能够识别非增殖性糖尿病视网膜病变(Nonproliferative Diabetic Retinopathy, NPDR)的不同阶段, 支持了 OCTA 在糖尿病视网膜病变的诊断方面是有意义的观点[19]。Qi 等人[15]研究发现, OCTA 能够对 DR 患者的视网膜和脉络膜血管进行大规模无创性筛查和随访, 为 T2DM 患者 DR 的预防和监测提供了新策略。OCTA 可以准确呈现视网膜、脉络膜毛细血管、黄斑和视盘微循环的各个层次, 这对 DR 的诊断和预后评估具有重要意义[20]。Cui 等人[21]的研究表明, OCTA 参数如管腔面积、脉络膜血管指数、无血管区圆形度指数和脉络膜毛细血管流量面积百分比在 DR 患者中均有所降低, 这反映了 DR 患者黄斑区视网膜和脉络膜微循环的受损情况。Dan 等人[22]发现, 特定的 OCTA 成像生物标志物, 如无血管区周长、面积和圆形度、整体中央凹厚度降低以及浅层毛细血管丛血管密度降低, 可以在 DR 临床诊断之前预测年轻 T1DM 患者的毛细血管灌注不足。这些研究结果表明, OCTA 在 DR 早期诊断、病情评估和预后预测方面具有重要价值, 为临床实践提供了新的诊断和监测工具。

## 3. OCTA 评估糖尿病视网膜病变患者视网膜微循环的研究进展

### 3.1. 视网膜微循环改变特征

视网膜微循环是视网膜正常功能的关键, 由毛细血管、动脉和静脉组成。毛细血管是血液与视网膜组织之间进行物质交换的主要场所, 动脉负责将富含氧气和营养物质的血液输送到视网膜, 而静脉则负责将代谢产物从视网膜运走[23][24]。视网膜微循环的正常运作对于维持视网膜的正常功能至关重要, 任何微循环障碍都可能导致视网膜功能受损, 甚至导致视力下降[23]。

糖尿病视网膜病变是糖尿病的一种常见并发症, 其病理生理机制复杂, 涉及血管内皮细胞损伤、血管通透性增加、血流动力学改变等。视网膜微循环作为视网膜组织的血液供应系统, 在 DR 的发生发展中起着至关重要的作用。早期 DR 阶段, 视网膜微循环的改变主要表现为微血管扩张、血流速度减慢、血管通透性增加。N. Körber 等学者[23]多项研究中发现, 早期 DR 患者的视网膜血管通透性明显增加, 导致视网膜水肿和渗出。中期 DR 阶段, 视网膜微循环的改变更加明显, 表现为微血管闭塞、血管瘤形成、硬性渗出物沉积。由于中期 DR 患者的视网膜微血管闭塞率明显升高, 导致视网膜缺血和视力下降。晚期 DR 阶段, 视网膜微循环的改变最为严重, 表现为视网膜新生血管形成、玻璃体积血、视网膜脱离等。这些改变会导致严重的视力损害, 甚至失明。

OCTA 技术能够无创地评估糖尿病视网膜病变患者的视网膜微循环改变。有研究表明在 OCTA 评估下, 视网膜血管密度(Vessel Density, VD)和血管骨架密度(Skeleton Density, SD)降低与糖尿病患病率高和

空腹血糖浓度升高有关。高血压和高脂血症是动脉粥样硬化性心血管疾病和糖尿病发生的重要危险因素,但对视网膜微血管异常没有显著影响。这些数据还表明, OCTA 可以监测视网膜微血管系统的早期亚临床变化,定期进行 OCTA 筛查有利于慢性全身性疾病的诊断、分类和干预[25]。Qi 等人[15]研究发现,与对照组相比,无临床可见 DR 的糖尿病患者中层大脉络膜血管密度显著降低,而轻度非增殖性 DR 患者的浅层和深层毛细血管丛血管密度明显减少。Wang 等人[26]指出,即使在 DR 临床症状出现前, I 型糖尿病患者的神经视网膜已出现变薄和微循环减少。Dan 等[22]研究表明,年轻 1 型糖尿病患者在出现临床 DR 症状前,已可检测到黄斑中心凹无血管区面积增大、圆形度下降以及浅层毛细血管丛血管密度降低等改变。此外, Ucgul Atilgan 等人[27]发现微量白蛋白尿可能与 2 型糖尿病患者早期视网膜微血管改变相关,表现为浅层和深层血管密度降低。这些研究结果表明, OCTA 能够检测到 DR 早期阶段的微循环改变,为早期诊断和干预提供了新的影像学指标。

### 3.2. 微循环改变与疾病进展的关系

多项研究验证了 OCTA 指标与 DR 严重程度具有相关性。例如, T. Hwang 等人[28]发现, 投影解析 OCTA 能够清晰地显示出三层不同的视网膜血管丛, 并发现 DR 患者的深层血管丛中存在血管密度和口径的改变, 以及无灌注区的出现。该研究还发现, OCTA 能够以更高的准确率区分 DR 患者和健康对照组, 以及严重 DR 患者和轻度 DR 患者。Miao Zhang 等人[29]的研究表明, 利用 OCTA 技术对 OCTA 图像进行分层分析, 能够准确地识别出轻度非增殖性 DR 患者的无灌注区, 并发现该指标与 DR 的严重程度呈正相关[29]。Durbin MK 等人[30]的研究中发现 OCTA 的定量测量可能在管理糖尿病视网膜病变方面具有价值, 结果表明通过 OCTA 测量的血管密度提供了毛细血管闭合的定量分析, 该指标与 DR 的严重程度相关。Jesse J. Jung 等人[31]的研究中评估在 EDTRS 内换子场 OCTA 指标中使用象限不对称进行眼内比较的准确性, 以预测 DR 的严重程度, 发现比较象限内效应对 DR 严重程度的回归分析表明, 所有 OCTA 指标的上象限影响最大。DR 严重程度在早期治疗糖尿病视网膜病变象限中对血管长度密度(Vascular Length Density, VLD)和 PD 的影响更不对称, 随着 DR 水平的每个恶化水平, 象限不对称呈线性增加。J Santos 等人[32]也发现通过 OCTA 量化的视网膜毛细血管闭合可以识别 NPDR 严重程度的进展。在 NPDR 的初始阶段, 它主要位于中央凹周围视网膜毛细血管循环中, 而在中度至重度 NPDR 中, 视网膜中周主要受到影响。另外还有研究表明, 糖尿病患者即使在没有临床可检测到的 DR 时, 视网膜微循环也存在改变, 例如深层毛细血管丛中旁中央凹毛细血管的密度、血管密度、周长值发生改变[33]。这些改变可能预示着 DR 的早期发生。Qi *et al.* [15]发现在 DR 发生之前就已出现脉络膜结构和血流的变化, 这些变化先于视网膜微循环的改变。研究表明, 中大脉络膜血管密度是临床检测 DR 的一个更敏感的影像生物标志物。随着 DR 的进展, 视网膜微循环也发生显著变化。有研究表明通过 OCTA 指标分析指出在具有更严重 DR 的眼睛中, DR 严重程度水平之间的 SCP、VD 和 VLD 存在显著差异[34]。Cui 等人[21]观察到, 与健康对照组相比, DR 患者的表层毛细血管丛(SCP)和深层毛细血管丛(DCP)血管密度显著降低。此外, Dan *et al.* [22]在研究中发现, 即使在 DR 临床诊断之前, 年轻 1 型糖尿病患者的无血管区(FAZ)面积增大、FAZ 圆度下降以及 SCP 血管密度降低等特定影像生物标志物就已经出现。

这些研究结果表明, OCTA 指标可以在 DR 各期阶段检测到视网膜和脉络膜微循环的改变, 通过 OCTA 评估微循环改变了解 DR 程度, 有助于及时干预和管理该疾病进展。

## 4. 颈动脉狭窄与糖尿病视网膜病变的关系研究

### 4.1. 颈动脉狭窄对视网膜微循环的影响

颈动脉狭窄通常指由于动脉粥样硬化等原因导致的颈动脉管腔狭窄。根据狭窄程度可分为轻度

(<50%)、中度(50%~69%)和重度( $\geq 70\%$ ) [35]。颈动脉改变对视网膜微循环的影响主要体现在血流动力学改变和血管内皮功能障碍两个方面。颈动脉硬化会导致血管壁增厚, 管腔狭窄, 从而降低血流速度, 增加血流阻力, 导致视网膜微循环灌注不足。同时, 颈动脉硬化还会导致血管内皮功能障碍, 影响血管舒张功能, 进一步加重视网膜微循环障碍。因此早期识别颈动脉狭窄相关的视网膜体征, 以及理解视网膜变化背后的病理生理学, 可能有助于预测中风的风险[36], 有研究表明颈内动脉狭窄大于 70%时, 中央黄斑厚度(Central Macular Thickness, CMT)显著升高, 中央凹下脉络膜厚度(Subfoveal Choroid Thickness, SCT), 且在出现眼缺血综合征临床表现之前。视网膜微血管变化是颈内动脉疾病的一个突出结果, 即使是轻微的狭窄也会导致视网膜微血管床的改变, 这可以通过 OCTA 检测到。通过早期发现该患者视网膜微血管变化, 我们可以推测整体血管状况[7]。N. Körber [23]认为, 视网膜微循环是评估全身血管疾病的重要指标, 颈动脉硬化会导致视网膜微循环障碍, 并可通过视频荧光血管造影技术进行评估。颈动脉狭窄会减少供应视网膜的血流量, 造成视网膜缺血缺氧, 刺激血管内皮生长因子(VEGF)的分泌增加。Antonetti 等[37]指出, 颈动脉狭窄引起的血流动力学改变可能会破坏视网膜内血-视网膜屏障的完整性, 增加视网膜水肿和渗出的风险。科学研究发现与对侧眼相比, 同侧眼的浅血管复合体密度(Shallow Vascular Complex Density, SVCD)和 DVC 密度较低。同侧眼的视网膜微血管密度较低可以解释为颈动脉狭窄导致眼动脉血流量减少导致视网膜中央动脉血流量减少[38]。与对侧眼相比, 同侧眼的视网膜微血管密度降低[39]。颈动脉狭窄解除后短期内, 同侧眼的 SVCD 和脉络膜血管体积(Choroidal Vessel Volume, CVV)快速且显著增加。CAS 患者的视网膜微血管变化, 并确定狭窄程度对视网膜微循环的影响程度。据报道, 即使是轻度 CAS 也与眼缺血综合征和脑卒中密切相关[40]。通过早期发现该患者视网膜的微血管变化, 我们可以推测患者的整体血管状况, 并及时采取措施防止进一步的损伤, 甚至在视力受到影响之前。Liu J 等人[39]发现中度或重度 ICA 狭窄患者浅血管层的视网膜微灌注变化与大脑血流动力学改变相关, 表明视网膜灌注可能有助于了解脑灌注。颈内动脉狭窄会导致流向绒毛毛细血管和视网膜中央动脉的血流量减少, 从而导致视网膜神经节细胞、视锥细胞和视杆细胞凋亡。鉴于血管功能不全会影响视觉功能, OCTA 可能是检测视网膜早期微血管变化的宝贵工具。视网膜的微血管变化也可作为心血管疾病的指标[41]。

#### 4.2. 颈动脉狭窄与糖尿病视网膜病变的相关性

流行病学研究表明, 糖尿病视网膜病变与颈动脉狭窄存在显著相关性。在颈内动脉狭窄进展的自然病程研究中指出高龄、糖尿病和血管炎病史患者与狭窄进展有关[42]。Yau 等的[43]研究发现, 全球约有 9300 万糖尿病视网膜病变患者, 其中 1700 万为增殖性糖尿病视网膜病变。这些患者往往伴有颈动脉狭窄等大血管并发症。Gulshan 等[44]指出, 糖尿病视网膜病变是工作年龄人群致盲的首要原因。长期糖尿病病程、血糖控制不佳以及高血压是糖尿病视网膜病变的主要危险因素[45], 这些因素同样与颈动脉狭窄的发生发展密切相关。因此, 对糖尿病患者进行早期筛查和干预, 不仅可以预防视网膜病变, 还可能降低颈动脉狭窄的风险。

糖尿病视网膜病变与颈动脉狭窄之间存在密切的病理生理学联系。两者都与慢性炎症和血管内皮功能障碍有关。Tang *et al.* 等人[46]认为, 低度炎症在糖尿病视网膜病变的发生发展中起关键作用, 多种炎症因子如白细胞介素- $1\beta$ 、单核细胞趋化蛋白-1 和肿瘤坏死因子- $\alpha$  在糖尿病视网膜病变患者的玻璃体和视网膜中升高。这些炎症因子与血管内皮生长因子等生长因子共同导致血-视网膜屏障破坏、血管损伤和神经炎症, 进而引发病理性血管新生。同时, 糖尿病视网膜病变与颈动脉狭窄都涉及微血管和大血管的病变。Antonetti *et al.* [37]指出, 神经血管单元和视网膜血管内血-视网膜屏障的形成是糖尿病视网膜病变重要的干预点。微血管病变可能是连接两种疾病的关键环节。长期高血糖导致的氧化应激和糖基化终产物积累, 不仅损害视网膜微血管, 也可能加速颈动脉粥样硬化进程。此外, 两种疾病可能存在共同的

危险因素。Gulshan *et al.* [44]发现, 糖尿病病程、血糖控制水平和血压水平与糖尿病视网膜病变的发生发展密切相关。这些因素同样也是颈动脉狭窄的重要危险因素。因此, 控制这些共同的危险因素可能对两种疾病的预防和治疗都具有重要意义。

颈动脉狭窄与糖尿病视网膜病变的严重程度存在一定的相关性。研究表明, 糖尿病患者中颈动脉狭窄的发生率较高, 且与糖尿病视网膜病变的进展密切相关。Dehghan 等[45]认为, 颈动脉狭窄可能导致视网膜血流灌注不足, 进而加剧糖尿病视网膜病变的发展。Ting 等[47]发现, 颈动脉狭窄患者的视网膜微血管可能出现扩张、迂曲等异常改变, 这些改变与糖尿病视网膜病变的早期表现相似。因此, 颈动脉狭窄可能通过多种机制影响糖尿病患者的视网膜微循环, 加速糖尿病视网膜病变的发生发展。Tang 等[46]认为, 颈动脉狭窄可能导致视网膜血流灌注不足, 进而加剧视网膜缺血和微血管损伤。这种血流灌注不足可能会促进视网膜新生血管的形成, 加速糖尿病视网膜病变的进展。研究表明, 颈动脉狭窄可能通过影响视网膜血流灌注, 加剧糖尿病视网膜病变的发展。Zhihao Qi 等[15]发现, 糖尿病患者在视网膜病变出现前, 脉络膜结构和血流就已发生改变, 这提示颈动脉狭窄可能是糖尿病视网膜病变的早期预警指标。Yan-kun Cui 等[21]的研究进一步证实, 糖尿病视网膜病变患者的脉络膜血管指数和毛细血管流量百分比显著降低, 表明颈动脉狭窄可能通过影响脉络膜血流而加速视网膜病变的进展。此外, Dan 等人[22]发现, 即使在无临床症状的 1 型糖尿病患者中, 也可观察到视网膜微循环的早期改变, 这可能与颈动脉狭窄导致的血流灌注不足有关。这表明颈动脉狭窄可能通过影响眼部血供, 导致脉络膜微循环异常, 进而加速视网膜病变的进展。这些发现提示, 颈动脉狭窄可能在糖尿病视网膜病变的早期阶段就开始影响视网膜微循环, 强调了早期筛查和干预的重要性。

## 5. OCTA 在评估糖尿病视网膜病变与颈动脉狭窄关系中的应用

### 5.1. OCTA 评估视网膜微循环与颈动脉狭窄的相关性

OCTA 作为一种新兴的无创影像技术, 能够精确呈现视网膜和脉络膜的微循环结构[21]。近年来, 研究者们开始探索 OCTA 在评估糖尿病视网膜病变(DR)患者视网膜微循环与颈动脉狭窄之间关系中的应用价值。Zhihao Qi 等[15]发现, DR 患者的脉络膜血管密度显著降低, 特别是在中大型脉络膜血管层。这一发现提示, 脉络膜微循环改变可能是 DR 早期的重要指标。同时, Yan-kun Cui 等[21]观察到 DR 患者的脉络膜血管指数和毛细血管流动面积百分比均低于健康对照组。这些 OCTA 参数的变化反映了 DR 患者视网膜和脉络膜微循环的受损程度, 可能与颈动脉狭窄等全身血管病变存在潜在关联。值得注意的是, CAS 引起的眼部血流灌注减少可能促使侧支循环的建立, 这可能会在 OCTA 上表现为特定区域的血管密度或形态改变, 从而与原发 DR 的微血管病变模式有所不同。区分这两种病因(即 DR 自身血管病变与 CAS 导致的灌注压降低后继发改变)是 OCTA 应用中的一个关键挑战, 可能需要结合 OCTA 参数的定量分析模式、双侧眼对比以及结合颈动脉影像学结果进行综合判断。然而, 目前关于 OCTA 参数与颈动脉狭窄程度的直接相关性研究仍然有限, 需要进一步的临床研究来阐明二者之间的具体关系。

### 5.2. OCTA 在预测和评估颈动脉狭窄风险中的应用

OCTA 在预测和评估颈动脉狭窄风险中的应用前景广阔。Zhihao Qi 等[15]研究发现, OCTA 能够对糖尿病视网膜病变患者的视网膜和脉络膜血管进行大规模无创筛查和随访, 为预防和监测糖尿病视网膜病变提供了新策略。这种技术可能同样适用于评估颈动脉狭窄风险。Jinyan Zhang 等[20]强调, OCTA 能够准确呈现视网膜、脉络膜毛细血管层、黄斑和视盘微循环的各个层次。这种多层次的血流评估可能有助于全面评估颈动脉狭窄对眼部血流的影响。然而, Jinyan Zhang 等[20]也指出, OCTA 在应用中存在一些局限性, 如易受运动伪影和分割错误的影响。由于我们患者组中的大多数患者由轻度狭窄患者组成,

因此我们可以得出结论, OCTA 可用于识别轻度疾病。OCTA 可以用作监测与颈动脉狭窄相关的微血管变化的工具, 并提供有关患者整体血管状况的见解, 因为 OCTA 提供了有关血管密度和流量的主观数据[7]。因此, 未来需要进一步完善 OCTA 技术, 以提高其在评估颈动脉狭窄风险中的准确性和可靠性。

## 6. OCTA 在临床应用中的挑战与展望

光相干断层扫描血管成像技术在评估糖尿病视网膜病变患者视网膜微循环与颈动脉狭窄关系方面展现出重要价值。Sun 等[40]认为 OCTA 在量化微血管损伤程度和识别由糖尿病性黄斑缺血导致视力下降的眼睛方面具有广阔前景。这一技术能够在糖尿病患者出现明显视网膜病变之前检测到黄斑区微血管的异常改变, 如无血管区面积扩大、毛细血管无灌注区形成等[48]。然而, 该领域的研究仍面临一些挑战和局限性。首先, 多数现有研究为横断面设计, 缺乏纵向随访数据, 难以确定 OCTA 检测到的微循环改变与颈动脉狭窄进展或 DR 恶化的因果关系。其次, OCTA 指标的解读可能受到多种混杂因素的影响, 例如患者正在使用的全身性药物治疗(如抗血小板药物、降脂药、降压药等)可能直接或间接影响视网膜血流和血管形态, 从而干扰 OCTA 评估的特异性。此外, 技术本身的局限性, 如运动伪影、图像分割错误以及对图像质量和患者配合度要求较高, 仍制约其在大规模筛查或标准化评估中的应用。未来研究应进一步探索 OCTA 在评估糖尿病视网膜病变与颈动脉狭窄关系中的应用。重点可包括: 1) 建立 OCTA 参数与颈动脉狭窄程度的定量关系模型; 2) 研究 OCTA 检测的早期视网膜微循环改变对预测颈动脉狭窄进展的价值; 3) 探讨 OCTA 在指导糖尿病视网膜病变和颈动脉狭窄联合防治策略中的作用。这些研究将为临床实践提供更全面的评估工具, 有助于改善糖尿病患者的眼部和心脑血管健康管理。

## 参考文献

- [1] Kour, V., Swain, J., Singh, J., Singh, H. and Kour, H. (2024) A Review on Diabetic Retinopathy. *Current Diabetes Reviews*, **20**, e201023222418. <https://doi.org/10.2174/011573399825367223101161400>
- [2] Zhang, Z., Deng, C. and Paulus, Y.M. (2024) Advances in Structural and Functional Retinal Imaging and Biomarkers for Early Detection of Diabetic Retinopathy. *Biomedicines*, **12**, Article 1405. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12071405>
- [3] Song, P., Yu, J., Chan, K.Y., Theodoratou, E. and Rudan, I. (2018) Prevalence, Risk Factors and Burden of Diabetic Retinopathy in China: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Global Health*, **8**, Article ID: 010803. <https://doi.org/10.7189/jogh.08.010803>
- [4] 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学组. 我国糖尿病视网膜病变临床诊疗指南(2022年)基于循证医学修订[J]. 中华眼底病杂志, 2023, 39(2): 99-124.
- [5] Safi, H., Safi, S., Hafezi-Moghadam, A. and Ahmadi, H. (2018) Early Detection of Diabetic Retinopathy. *Survey of Ophthalmology*, **63**, 601-608. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2018.04.003>
- [6] Balaratnasingam, C., An, D., Hein, M., Yu, P. and Yu, D. (2023) Studies of the Retinal Microcirculation Using Human Donor Eyes and High-Resolution Clinical Imaging: Insights Gained to Guide Future Research in Diabetic Retinopathy. *Progress in Retinal and Eye Research*, **94**, Article ID: 101134. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2022.101134>
- [7] Batu Oto, B., Kılıçarslan, O., Kayadibi, Y., Yılmaz Çebi, A., Adaletli, İ. and Yıldırım, S.R. (2023) Retinal Microvascular Changes in Internal Carotid Artery Stenosis. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 6014. <https://doi.org/10.3390/jcm12186014>
- [8] Lawrence, P.F. and Oderich, G.S. (2002) Ophthalmologic Findings as Predictors of Carotid Artery Disease. *Vascular and Endovascular Surgery*, **36**, 415-424. <https://doi.org/10.1177/153857440203600602>
- [9] Nouri, H., Abtahi, S., Mazloumi, M., Samadikhadem, S., Arevalo, J.F. and Ahmadi, H. (2024) Optical Coherence Tomography Angiography in Diabetic Retinopathy: A Major Review. *Survey of Ophthalmology*, **69**, 558-574. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2024.03.004>
- [10] Cheung, C.M.G., Fawzi, A., Teo, K.Y., Fukuyama, H., Sen, S., Tsai, W., et al. (2022) Diabetic Macular Ischaemia- A New Therapeutic Target? *Progress in Retinal and Eye Research*, **89**, Article ID: 101033. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2021.101033>
- [11] Chua, J., Sim, R., Tan, B., Wong, D., Yao, X., Liu, X., et al. (2020) Optical Coherence Tomography Angiography in

- Diabetes and Diabetic Retinopathy. *Journal of Clinical Medicine*, **9**, Article 1723. <https://doi.org/10.3390/jcm9061723>
- [12] Chen, C. and Wang, R.K. (2017) Optical Coherence Tomography Based Angiography [Invited]. *Biomedical Optics Express*, **8**, 1056-1082. <https://doi.org/10.1364/boe.8.001056>
- [13] Chan, G., Balaratnasingam, C., Yu, P.K., Morgan, W.H., McAllister, I.L., Cringle, S.J., *et al.* (2012) Quantitative Morphometry of Perifoveal Capillary Networks in the Human Retina. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **53**, 5502-5514. <https://doi.org/10.1167/iops.12-10265>
- [14] Campbell, J.P., Zhang, M., Hwang, T.S., Bailey, S.T., Wilson, D.J., Jia, Y., *et al.* (2017) Detailed Vascular Anatomy of the Human Retina by Projection-Resolved Optical Coherence Tomography Angiography. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 42201. <https://doi.org/10.1038/srep42201>
- [15] Qi, Z.H., Si, Y.Y., Feng, F., *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://www.semanticscholar.org/paper/5b32de846daea7274bb8be79c857ead6ffaf668>
- [16] Chen, Y.Y., Qi, Z.H., Hou, X., *et al.* (2023) Optical Coherence Tomography Angiography for Assessment of Changes of the Retina and Choroid in Different Stages of Diabetic Retinopathy and Their Relationship with Diabetic Nephropathy. *Endokrynologia Polska*, **74**, 135-139. <https://www.semanticscholar.org/paper/128fdfcc5b7ece2c835877b09e74ca48c59c42dd>
- [17] Wilkinson, C.P., Ferris, F.L., Klein, R.E., Lee, P.P., Agardh, C.D., Davis, M., *et al.* (2003) Proposed International Clinical Diabetic Retinopathy and Diabetic Macular Edema Disease Severity Scales. *Ophthalmology*, **110**, 1677-1682. [https://doi.org/10.1016/s0161-6420\(03\)00475-5](https://doi.org/10.1016/s0161-6420(03)00475-5)
- [18] Wijesingha, N., Tsai, W., Keskin, A.M., Holmes, C., Kazantzis, D., Chandak, S., *et al.* (2024) Optical Coherence Tomography Angiography as a Diagnostic Tool for Diabetic Retinopathy. *Diagnostics*, **14**, Article 326. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14030326>
- [19] Bidwai, P., Gite, S., Gupta, A., Pahuja, K. and Kotecha, K. (2024) Multimodal Dataset Using OCTA and Fundus Images for the Study of Diabetic Retinopathy. *Data in Brief*, **52**, Article ID: 110033. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110033>
- [20] Zhang, J., Huo, Q., Xia, D., Wang, M. and Li, X. (2023) Advances in Application of Swept-Source Optical Coherence Tomography Angiography in Diagnosis and Treatment of Diabetic Retinopathy. *Frontiers in Ophthalmology*, **3**, Article 1116391. <https://doi.org/10.3389/fopht.2023.1116391>
- [21] Cui, Y., Feng, D., Wu, C., Wang, P., Cui, R., Wang, X., *et al.* (2024) Quantitative Assessment of OCT and OCTA Parameters in Diabetic Retinopathy with and without Macular Edema: Single-Center Cross-Sectional Analysis. *Frontiers in Endocrinology*, **14**, Article 1275200. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1275200>
- [22] Dan, A.O., Ștefănescu-Dima, A., Bălășoiu, A.T., Puiu, I., Mocanu, C.L., Ionescu, M., *et al.* (2023) Early Retinal Microvascular Alterations in Young Type 1 Diabetic Patients without Clinical Retinopathy. *Diagnostics*, **13**, Article 1648. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13091648>
- [23] Körber, N. (1986) Measurement of Retinal Blood Flow in Various Pathological Conditions by Video Fluorescence Angiography. *Klinische Wochenschrift*, **64**, 950-953.
- [24] Ma, J., Gelie, N., Zhu, M., Ma, X. and Han, C. (2024) Quantifying Ocular Microcirculation in Hypertension Patients with Carotid Artery Stenosis. *Frontiers in Neuroscience*, **18**, Article 1361413. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1361413>
- [25] Yao, Y., Wang, Q., Yang, J., Yan, Y. and Wei, W. (2024) Associations of Retinal Microvascular Alterations with Diabetes Mellitus: An Octa-Based Cross-Sectional Study. *BMC Ophthalmology*, **24**, Article No. 245. <https://doi.org/10.1186/s12886-024-03492-9>
- [26] Wang, T., Zhang, T., Dong, N., Tan, Y., Li, X., Xie, Y., *et al.* (2024) The Association of Islet Autoantibodies with the Neural Retinal Thickness and Microcirculation in Type 1 Diabetes Mellitus with No Clinical Evidence of Diabetic Retinopathy. *Acta Diabetologica*, **61**, 897-907. <https://doi.org/10.1007/s00592-024-02255-8>
- [27] Ucgul Atilgan, C., Atilgan, K.G., Kosekahya, P., Goker, Y.S., Karatepe, M.S., Caglayan, M., *et al.* (2021) Retinal Microcirculation Alterations in Microalbuminuric Diabetic Patients with and without Retinopathy. *Seminars in Ophthalmology*, **36**, 406-412. <https://doi.org/10.1080/08820538.2021.1896745>
- [28] Hwang, T.S., Zhang, M., Bhavsar, K., Zhang, X., Campbell, J.P., Lin, P., *et al.* (2016) Visualization of 3 Distinct Retinal Plexuses by Projection-Resolved Optical Coherence Tomography Angiography in Diabetic Retinopathy. *JAMA Ophthalmology*, **134**, 1411-1419. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2016.4272>
- [29] Zhang, M., Hwang, T.S., Dongye, C., Wilson, D.J., Huang, D. and Jia, Y. (2016) Automated Quantification of Nonperfusion in Three Retinal Plexuses Using Projection-Resolved Optical Coherence Tomography Angiography in Diabetic Retinopathy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **57**, 5101-5106. <https://doi.org/10.1167/iops.16-19776>
- [30] Durbin, M.K., An, L., Shemonski, N.D., Soares, M., Santos, T., Lopes, M., *et al.* (2017) Quantification of Retinal Microvascular Density in Optical Coherence Tomographic Angiography Images in Diabetic Retinopathy. *JAMA*

- Ophthalmology*, **135**, 370-376. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2017.0080>
- [31] Jung, J.J., Lim, S.Y., Chan, X., Satta, S.R. and Hoang, Q.V. (2022) Correlation of Diabetic Disease Severity to Degree of Quadrant Asymmetry in En Face OCTA Metrics. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **63**, Article 12. <https://doi.org/10.1167/iovs.63.9.12>
- [32] Santos, T., Warren, L.H., Santos, A.R., Marques, I.P., Kubach, S., Mendes, L.G., *et al.* (2020) Swept-Source OCTA Quantification of Capillary Closure Predicts ETDRS Severity Staging of NPDR. *British Journal of Ophthalmology*, **106**, 712-718. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2020-317890>
- [33] Inanc, M., Tekin, K., Kiziltoprak, H., Ozalkak, S., Doguizi, S. and Aycan, Z. (2019) Changes in Retinal Microcirculation Precede the Clinical Onset of Diabetic Retinopathy in Children with Type 1 Diabetes Mellitus. *American Journal of Ophthalmology*, **207**, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2019.04.011>
- [34] Ashraf, M., Sampani, K., Clermont, A., Abu-Qamar, O., Rhee, J., Silva, P.S., *et al.* (2020) Vascular Density of Deep, Intermediate and Superficial Vascular Plexuses Are Differentially Affected by Diabetic Retinopathy Severity. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **61**, Article 53. <https://doi.org/10.1167/iovs.61.10.53>
- [35] Dossabhoy, S. and Arya, S. (2021) Epidemiology of Atherosclerotic Carotid Artery Disease. *Seminars in Vascular Surgery*, **34**, 3-9. <https://doi.org/10.1053/j.semvascsurg.2021.02.013>
- [36] Monferrer-Adsuara, C., Remolí-Sargues, L., Navarro-Palop, C., Cervera-Taulet, E., Montero-Hernández, J., Medina-Bessó, P., *et al.* (2024) Swept-Source Optical Coherence Tomography Early Findings in Patients with Carotid Artery Disease. *European Journal of Ophthalmology*, **35**, 324-334. <https://doi.org/10.1177/11206721241265388>
- [37] Antonetti, D.A., Silva, P.S. and Stitt, A.W. (2021) Current Understanding of the Molecular and Cellular Pathology of Diabetic Retinopathy. *Nature Reviews Endocrinology*, **17**, 195-206. <https://doi.org/10.1038/s41574-020-00451-4>
- [38] Cao, L., Wu, J., Wang, H., Kwapong, W.R., Yan, Y., Wan, J., *et al.* (2024) Influence of Carotid Artery Stenting on the Retina and Choroid. *Translational Vision Science & Technology*, **13**, Article 5. <https://doi.org/10.1167/tvst.13.8.5>
- [39] Liu, J., Wan, J., Kwapong, W.R., Tao, W., Ye, C., Liu, M., *et al.* (2022) Retinal Microvasculature and Cerebral Hemodynamics in Patients with Internal Carotid Artery Stenosis. *BMC Neurology*, **22**, Article No. 386. <https://doi.org/10.1186/s12883-022-02908-7>
- [40] Sun, Z., Yang, D., Tang, Z., Ng, D.S. and Cheung, C.Y. (2020) Optical Coherence Tomography Angiography in Diabetic Retinopathy: An Updated Review. *Eye*, **35**, 149-161. <https://doi.org/10.1038/s41433-020-01233-y>
- [41] Arnould, L., Guenancia, C., Azemar, A., Alan, G., Pitois, S., Bichat, F., *et al.* (2018) The EYE-MI Pilot Study: A Prospective Acute Coronary Syndrome Cohort Evaluated with Retinal Optical Coherence Tomography Angiography. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **59**, Article 4299. <https://doi.org/10.1167/iovs.18-24090>
- [42] Harish, K.B., Speranza, G., Rockman, C.B., Sadek, M., Jacobowitz, G.R., Garg, K., *et al.* (2024) Natural History of Internal Carotid Artery Stenosis Progression. *Journal of Vascular Surgery*, **79**, 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2023.10.059>
- [43] Yau, J.W.Y., Rogers, S.L., Kawasaki, R., Lamoureux, E.L., Kowalski, J.W., Bek, T., *et al.* (2012) Global Prevalence and Major Risk Factors of Diabetic Retinopathy. *Diabetes Care*, **35**, 556-564. <https://doi.org/10.2337/dc11-1909>
- [44] Gulshan, V., Peng, L., Coram, M., Stumpe, M.C., Wu, D., Narayanaswamy, A., *et al.* (2016) Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic Retinopathy in Retinal Fundus Photographs. *JAMA*, **316**, 2402-2410. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.17216>
- [45] Dehghan, M.H., Katibeh, M., Ahmadi, H., Nourinia, R. and Yaseri, M. (2014) Prevalence and Risk Factors for Diabetic Retinopathy in the 40 to 80 Year-Old Population in Yazd, Iran: The Yazd Eye Study. *Journal of Diabetes*, **7**, 139-141. <https://doi.org/10.1111/1753-0407.12205>
- [46] Xu, G., Zhang, J. and Tang, L. (2023) Inflammation in Diabetic Retinopathy: Possible Roles in Pathogenesis and Potential Implications for Therapy. *Neural Regeneration Research*, **18**, 976-982. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.355743>
- [47] Ting, D., Cheung, C., Lim, G., *et al.* (2017) Development and Validation of a Deep Learning System for Diabetic Retinopathy and Related Eye Diseases Using Retinal Images from Multiethnic Populations with Diabetes. *JAMA*, **318**, 2211-2223.
- [48] 王健, 陈松, 何广辉, 等. 无明显糖尿病视网膜膜病变的2型糖尿病患者黄斑区微血管改变的光相干断层扫描血管成像观察[J]. 中华眼底病杂志, 2017, 33(1): 15-18.