

# OCTA评价抗VEGF治疗DME的研究进展

冯晶晶<sup>1</sup>, 刘万蓉<sup>2</sup>, 唐爱东<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>赣南医科大学第一临床医学院, 江西 赣州

<sup>2</sup>赣南医科大学第一附属医院眼科, 江西 赣州

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月19日

## 摘要

糖尿病性黄斑水肿(DME)是导致糖尿病视网膜病变(DR)患者视力下降甚至失明的主要原因。它的发生涉及多个因素, 比如血-视网膜屏障受损、血管内皮生长因子(VEGF)过度表达、炎症反应以及神经退行性变等。目前, 抗VEGF治疗是DME的一线疗法, 但不同患者的疗效差异很大, 临床上亟需能够准确评估疗效和预测预后的生物标志物。光学相干断层扫描血管成像(OCTA)是一种无创、快速、高分辨率的眼底血流成像技术, 可以三维量化黄斑区的微循环参数, 对DME的早期诊断、治疗和预后评估均有重要帮助。本综述系统梳理了DME的病理机制、抗VEGF治疗的现状, 以及OCTA的关键量化参数——包括黄斑中心凹无血管区(FAZ)、血流密度(VD)、视网膜深层毛细血管丛(DCP)、视网膜高反射点(HRF)以及FAZ周边300 μm血流密度(FD-300)——在抗VEGF治疗中的应用价值。这些参数与患者的视功能和眼底解剖学预后显著相关。随着技术进步, OCTA在疗效预测和个性化治疗指导方面展现出巨大潜力。特别是基于OCTA构建的深度学习模型, 有望实现DME的精准诊断和个体化治疗, 为糖尿病眼病的临床管理带来革命性变化。

## 关键词

糖尿病性黄斑水肿, 光学相干断层扫描血管成像, 抗VEGF治疗, 黄斑微循环, 血流密度, 生物标志物

# Research Progress on OCTA in Evaluating Anti-VEGF Therapy for Diabetic Macular Edema

Jingjing Feng<sup>1</sup>, Wanrong Liu<sup>2</sup>, Aidong Tang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of the First Clinical Medical College, Gannan Medical University, Ganzhou Jiangxi

<sup>2</sup>Department of Ophthalmology, The First Affiliated Hospital of Gannan Medical University, Ganzhou Jiangxi

Received: February 16, 2026; accepted: March 9, 2026; published: March 19, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 冯晶晶, 刘万蓉, 唐爱东. OCTA 评价抗 VEGF 治疗 DME 的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 3433-3441. DOI: 10.12677/acm.2026.1631149

## Abstract

**Objective:** Diabetic macular edema (DME) is a leading cause of visual impairment and blindness in patients with diabetic retinopathy (DR). Its pathogenesis is associated with multiple factors, including disruption of the blood-retinal barrier, overexpression of vascular endothelial growth factor (VEGF), inflammatory responses, and neurodegenerative changes. Currently, anti-VEGF therapy is the first-line treatment for DME; however, there is considerable inter-individual variability in treatment response, highlighting an urgent clinical need for biomarkers that can accurately assess therapeutic efficacy and predict prognosis. Optical coherence tomography angiography (OCTA) is a non-invasive, rapid, and high-resolution imaging technique for retinal microvasculature that enables three-dimensional quantification of microcirculation parameters in the macular region, offering significant value for the early diagnosis, treatment, and prognostic evaluation of DME. This review systematically examines the pathological mechanisms of DME, the current status of anti-VEGF therapy, and the application value of key OCTA quantitative parameters—including foveal avascular zone (FAZ), vessel density (VD), deep capillary plexus (DCP), hyperreflective foci (HRF), and FAZ perimeter vessel density at 300  $\mu\text{m}$  (FD-300)—in the context of anti-VEGF treatment for DME. These parameters have demonstrated significant correlations with both functional visual outcomes and anatomical prognosis. With ongoing technological advancements, OCTA has shown considerable potential in treatment response prediction and guidance of personalized therapy. In particular, deep learning models based on OCTA hold promise for achieving precise diagnosis and individualized treatment of DME, potentially leading to transformative changes in the clinical management of diabetic eye disease.

## Keywords

Diabetic Macular Edema, Optical Coherence Tomography Angiography, Anti-VEGF Therapy, Macular Microcirculation, Vessel Density, Biomarkers

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

糖尿病性黄斑水肿(DME)是糖尿病视网膜病变(DR)发展过程中的严重并发症,是导致世界范围工作年龄人群视力损害的主要原因之一[1]。相关数据显示,大约 10.2%的糖尿病患者患有 DR,其中有 6.81%的患者会发展为 DME,对患者的视功能和生活质量造成严重影响[2]。流行病学研究数据显示,约 7%的糖尿病患者受到 DME 的影响。随着糖尿病患病率的升高,DME 带来的疾病负担也在持续加重[3]。

DME 的发病机制极为复杂,涉及血管、炎症、神经退行性变等多重病理过程的交互作用,其中血管内皮生长因子(VEGF)驱动的血管渗漏被认为是核心环节[4]。随着抗 VEGF 药物的出现,DME 的治疗方式发生了巨大改变。大量临床试验和真实世界研究证实,抗 VEGF 治疗能有效减轻黄斑水肿并提高患者视力[5] [6]。但临床上显著个体差异提示,单纯依赖形态学指标(如 OCT 测量的中心视网膜厚度)和功能学指标(如最佳矫正视力)已不足以全面评估 DME 以及指导精准治疗。

光学相干断层扫描血管成像(OCTA)是一种无创、快速、高分辨率的眼底血流成像技术,无需注射造影剂即可实现视网膜和脉络膜血管网络的三维重建。该技术不仅能够清晰显示不同层次(如浅层毛细血管

丛、深层毛细血管丛、外层视网膜及脉络膜毛细血管层)的血管形态结构,还可以对血流密度、无灌注区面积以及中心凹无血管区的形态等指标进行定量分析[7]。这些量化参数有助于进一步阐明 DME 的病理生理机制,为客观评估治疗反应、早期预测视力预后提供了新的研究切入点。

本文系统综述 OCTA 在评价抗 VEGF 治疗 DME 中的研究进展,重点阐述关键量化参数的变化规律及其与临床预后的关联,并探讨其在实现 DME 个性化精准医疗中的应用前景。

## 2. DME 的病理机制

### 2.1. 血-视网膜屏障破坏与 VEGF 过度表达

视网膜内、外血-视网膜屏障(BRB)的结构完整性,是维持黄斑正常生理功能的基础。内层 BRB 主要由视网膜毛细血管内皮细胞间的紧密连接、周细胞及基底膜共同构成,而外层 BRB 则由视网膜色素上皮细胞(RPE)及其间的闭合小带组成[8]。慢性高血糖状态下,多元醇通路激活、晚期糖基化终末产物堆积以及氧化应激等多途径,会逐步引发周细胞凋亡、内皮细胞紧密连接破坏及基底膜增厚,最终导致 BRB 功能失代偿[9]。

血管内皮生长因子(VEGF)是 DME 发病机制中的核心分子,具有强大的血管通透性诱导作用和促血管生成活性。在糖尿病状态下,视网膜组织的慢性缺血缺氧状态,可诱导 Müller 细胞、RPE 细胞及血管内皮细胞大量分泌 VEGF,导致 VEGF 的过度表达和释放,其中 VEGF-A 是主要致病亚型。VEGF 通过与其受体 VEGFR-2 结合,不仅促进内皮细胞增殖和新生血管形成,还通过诱导内皮细胞一氧化氮合成增加和紧密连接蛋白磷酸化,显著增加血管通透性,当血浆成分渗漏至细胞外间隙并在黄斑区 Henle 纤维层和内外丛状层积聚时即形成黄斑水肿[10]。

### 2.2. 炎症及其他介质的参与

尽管 VEGF 是 DME 的关键因子,但单纯抗 VEGF 治疗并不能完全解决所有类型的渗漏问题,临床上有约 30%~40%的患者存在初始或继发性反应不佳[11]。有研究指出,部分抗 VEGF 治疗无效的 DME 患者,虽然眼内 VEGF 水平被有效抑制,但房水中的炎症因子(如 IL-6、IL-8、MCP-1 等)仍维持在高表达水平,这也说明炎症机制在 DME 的持续进展中发挥着重要作用[12]。高血糖可直接激活蛋白激酶 C (PKC)和核因子- $\kappa$ B (NF- $\kappa$ B)等炎症信号通路,促使肿瘤坏死因子- $\alpha$  (TNF- $\alpha$ )、IL-6、IL-8 等炎症因子释放,这些因子可单独或与 VEGF 共同作用,破坏 BRB 的完整性[8]。此外,胎盘生长因子(PlGF)、血小板衍生生长因子、血管黏附因子、干扰素诱导蛋白-10 (IP-10)及促红细胞生成素等多种细胞因子在 DME 患者房水中表达水平也出现升高,这些因子共同构成了调控 DME 进展的复杂分子网络[13]。

## 3. 抗 VEGF 治疗现状

### 3.1. 主要抗 VEGF 药物及其特点

抗 VEGF 药物是 DME 治疗史上的里程碑,目前临床常用的抗 VEGF 药物主要分为单克隆抗体类、融合蛋白类及新型双特异性抗体类。

单克隆抗体类:贝伐珠单抗(Bevacizumab)是全长的抗 VEGF 人源化单克隆抗体,可与所有 VEGF-A 亚型结合,虽为肿瘤适应症,但因其成本效益显著,在全球范围内被广泛应用。雷珠单抗(Ranibizumab)是贝伐珠单抗的抗体片段,分子量小(48 kDa),专为眼科设计,可更好穿透视网膜层,多项 III 期临床试验证实其可有效改善 DME 患者视力,奠定了抗 VEGF 在 DME 治疗中的一线地位[10]。布洛赛珠单抗(Brolucizumab)为新型单链抗体片段,分子量仅 26 kDa,药物浓度可达雷珠单抗的 11 倍,旨在实现更持久的疗效,HAWK 和 HARRIER 研究证实其与阿柏西普疗效相当且具有更长的作用持续时间[14]。

融合蛋白类：阿柏西普(Aflibercept)是一种 VEGF 受体-Fc 融合蛋白，与 VEGF-A、VEGF-B 及 PlGF 均有较高亲和力，作用时间更长，研究证实其每 2 个月给药方案(3 次负荷剂量后)不劣于雷珠单抗每月给药，显著降低治疗负担[15][16]。康柏西普(Conbercept)是我国自主研发的融合蛋白，作用机制与阿柏西普类似。临床研究已证实其治疗 DME 的有效性和安全性，现已成为国内 DME 治疗的重要选择之一。

双特异性抗体：法瑞西单抗(Faricimab)可同时靶向 VEGF-A 和血管生成素-2 (Ang-2)。Ang-2 在病理状态下会导致血管稳定性下降，加重血管渗漏和炎症反应，并与 VEGF 协同促进 DME 的进展[17]。Faricimab 通过双重抑制这两个靶点，既有助于阻断渗漏，又能促进血管稳定性的恢复。TENAYA 和 LUCERNE 两项试验显示，法瑞西单抗每 4 个月给药方案在疗效上不劣于阿柏西普每 2 个月给药，延长了给药间隔[18]。

### 3.2. 临床疗效与治疗策略

大量随机对照试验已证实抗 VEGF 药物治疗 DME 的有效性和安全性。以阿柏西普为例，VIVID 和 VISTA 研究显示，每月或每 2 月注射阿柏西普可显著提高 DME 患者的最佳矫正视力，并降低中央视网膜厚度[15]。在基线视力较差的患者中，阿柏西普显示出更优的解剖学疗效[15]。

目前国内外指南均建议，抗 VEGF 药物应作为累及黄斑中心凹的 DME 患者的一线治疗方案。在实际临床操作中，通常先连续给药 3~6 次作为负荷剂量，之后根据患者视力和 OCT 检查结果调整给药间隔。对于难治性 DME 病例，可考虑换用不同作用机制的抗 VEGF 药物，使用糖皮质激素类药物(如地塞米松玻璃体内植入剂)也是常用治疗策略[19]。

## 4. OCTA 核心参数及其在 DME 评估中的意义

### 4.1. 黄斑中心凹无血管区(FAZ)

黄斑中心凹无血管区(FAZ)其形态和面积是反映黄斑区微循环状态最直观的参数之一。在 DR 病程中，长期高血糖导致的毛细血管闭塞和无灌注首先在 FAZ 周围显现，表现为 FAZ 边界的破坏和面积的扩大[20]。

大量研究证实，DME 患者 FAZ 面积显著大于无 DME 的 DR 患者及健康对照组，且 FAZ 扩大程度与 DR 严重程度呈正相关[21]。Di 等的研究表明，即使在无明显 DR 的糖尿病患者中，FAZ 面积已开始出现扩大趋势，提示 FAZ 变化可作为 DR 早期微血管损伤的敏感指标[22]。

### 4.2. 血流密度(VD)

血流密度(VD)是指单位面积内毛细血管所占的百分比，是量化视网膜血流灌注最常用的参数。OCTA 可将视网膜血管分为浅层毛细血管丛(SCP)和深层毛细血管丛(DCP)分别测量 VD，从而探讨不同层面微循环损伤。

王怡璇等对 46 例非增生型 DME 患者的研究显示，DME 组治疗前整体、中心凹及旁中心凹的 SCP-VD 和 DCP-VD 均显著低于无 DME 的 NPDR 对照组，表明 DME 患者存在更广泛的微循环灌注损伤[23]。生侠等的研究进一步证实，经过 3 次抗 VEGF 治疗后，DME 患者 SCP-VD、DCP-VD、深浅层血流比(DSFR)均较治疗前显著上升，提示治疗可部分改善黄斑区血流灌注状态[24]。

VD 与视功能的相关性是研究的重点。Tang 等的研究发现，DCP-VD 的降低与患者视力下降程度独立相关，提示 DCP 灌注状态可能反映了光感受器层的营养供应状况[25]。Moon 等在为期 12 个月的随访研究中发现，基线 DCP-VD 较高的患者，在黄斑水肿消退后光感受器内外节连接(EZ)和外界膜(ELM)的恢复程度更好，视力改善也更显著，这为 DCP-VD 作为长期视力预后预测指标提供了有力证据[26]。

### 4.3. 视网膜深层毛细血管丛(DCP)

DCP 位于内核层与外丛状层之间,是目前研究 DME 病理变化中关注度较高的血管层面。周婕等的综述提到,DCP 的微血管损害在 DR 病程中往往早于 SCP 出现,且与 DME 的发生发展关联更密切[27]。从解剖位置来看,DCP 与 Müller 细胞突起及双极细胞突触共同构成神经血管单元,这一结构若受损,会直接影响液体的正常清除和光信号的传导功能[28]。

Hasegawa 等观察到,在 DME 患者黄斑水肿区域,DCP 层面的微动脉瘤密度明显高于 SCP 层面,且水肿体积与 DCP 上微动脉瘤密度呈正相关[29]。Lee 等根据抗 VEGF 治疗反应将 DME 患者分为有效组和疗效欠佳组,结果发现疗效欠佳组治疗前 DCP 的血流密度(DCP-VD)更低,DCP 区域的微动脉瘤数量也更多,而两组 SCP 参数并无明显差异,提示 DCP 的完整性可能直接决定了患者的治疗应答水平[30]。王怡璇等的研究也得到了类似结果,有效组患者治疗前黄斑中心凹区域的 DCP-VD 显著高于疗效欠佳组,且 DCP-VD 与治疗后 CRT 下降值、BCVA 提高值均呈正相关[23]。

关于 DCP 损伤导致治疗反应不佳的机制,现有观点认为可能涉及以下几个方面:一是 DCP 结构破坏会影响 Müller 细胞介导的液体清除功能,导致液体积聚不易消退;二是 DCP 所在的视网膜中层是光信号从光感受器传递至双极细胞的关键区域,其缺血会直接影响神经功能恢复;三是 DCP 的无灌注可能代表了更广泛且不可逆的微血管损伤状态,从而限制了整体治疗效果[31]。

### 4.4. 视网膜高反射点(HRF)

视网膜高反射点(HRF)在 OCT 图像上通常表现为直径约 20~40  $\mu\text{m}$ 、反射强度与 RPE 相近的点状结构,可分布在视网膜的不同层次。目前研究认为,HRF 可能与视网膜局部炎症状态有关,其形成机制可能涉及活化的小胶质细胞、渗出的脂质成分或退变细胞的碎片[32]。临床上,HRF 的数量及分布特点可以在一定程度上反映 DME 的炎症活动状态,也与患者抗 VEGF 治疗的反应有一定关联。

Uji 等的研究发现,外层视网膜 HRF 的存在与 ELM 和 EZ 的破坏显著相关,且 HRF 数量多的患者基线视力更差[33]。生侠等在研究中通过 ROC 曲线分析发现,基线 HRF 数量预测抗 VEGF 治疗反应不佳的曲线下面积(AUC)高达 0.947,灵敏度 86.67%,特异度 93.33%,表现出不错的预测效能[24]。然而,该研究中 HRF 数量在治疗前后无显著变化,提示 HRF 可能反映的是相对稳定的炎症状态而非短期治疗反应。

### 4.5. FAZ 周边 300 $\mu\text{m}$ 血流密度(FD-300)

FD-300 是指以 FAZ 为中心、宽度 300  $\mu\text{m}$  的环形区域内血管密度,是近年来引入的新参数。该区域包含黄斑中心凹旁最密集的毛细血管网,因此对视功能维持至关重要。FD-300 测量不受 FAZ 边界界定误差的影响,可能比单独 FAZ 面积更稳定可靠[34]。

邱煦等的研究显示,抗 VEGF 治疗后 DME 患者 FD-300 无明显变化,可能与观察期较短、血管结构性修复尚未显现有关[35]。生侠等的研究发现基线 FD-300 预测治疗反应不佳的 AUC 达 0.927,表明其具有良好的预测效能[24]。王怡璇等虽未将 FD-300 纳入多因素分析,但其对 FAZ 及 VD 的综合分析也间接支持 FAZ 周边区域灌注的重要性[23]。

## 5. OCTA 在抗 VEGF 治疗疗效评估中的应用

### 5.1. 监测短期疗效

抗 VEGF 治疗后,黄斑水肿的消退较早反映在解剖学指标上。邱煦等[35]在临床观察中发现,首次注射后 24 小时,患者中心凹视网膜厚度(CMT)即出现明显下降,而视力的改善则相对滞后,多在治疗后 7~30

天内逐步显现。相比之下, OCTA 相关参数的变化表现出不同的时间规律: FAZ 在治疗后 1 天出现一过性扩大, 随后在 7~30 天内逐渐恢复; 而 VD 在 30 天内未见明显变化。这一现象提示, OCTA 参数可能反映的是微循环的结构性改变, 其显著改善可能需要更长的随访周期。

王怡璇等开展的 3 个月随访研究同样发现, 尽管患者 CMT 显著下降、BCVA 明显提升, 但 FAZ 面积、VD 等 OCTA 指标在治疗后 1 个月和 3 个月未出现统计学意义上的显著变化[23]。综合来看, OCTA 参数更适合作为中期(6~12 个月)疗效评估的参考指标, 而非用于判断早期治疗应答。

## 5.2. 预测长期预后

OCTA 参数的临床价值, 更多体现在对患者远期预后的预测能力上。Moon 等的研究具有重要参考意义: 他们对 67 例黄斑水肿已成功消退的 DME 患者进行了为期 12 个月的随访, 结果发现, 治疗前的 DCP-VD 和 DCP-FAZ 面积是影响光感受器(EZ 和 ELM)恢复情况以及远期视力的独立预测因素。具体而言, 基线 DCP-VD 越高、DCP-FAZ 越小, 患者随访至 12 个月时的视力恢复程度往往越好[26]。

王怡璇等进一步分析了治疗前参数与治疗后 3 个月疗效的相关性, 结果显示, 中心凹 DCP-VD 与治疗后 CRT 下降幅度呈正相关; 而整体及旁中心凹区域的 DCP-VD 则与 BCVA 提高值呈正相关[23]。生侠等通过多因素回归分析也发现, 基线 SCP-VD、DCP-VD、FD300-VD 以及深层血流比(DSFR)数值越高, 同时基线 CMT 越低, 患者抗 VEGF 治疗应答越好[24]。这些研究结果均表明 DCP-VD 在 DME 疗效预测中可作为一个有参考价值的核心指标。

## 5.3. 预测抗 VEGF 治疗反应不佳

识别对抗 VEGF 治疗反应不佳的患者, 对于及时调整治疗策略、避免无效注射和减轻患者负担至关重要。生侠等采用 ROC 曲线分析了多个 OCTA 参数预测治疗反应不佳的效能, 结果显示各参数的诊断价值优异, 其中基线 HRF 数量预测治疗反应不佳的 AUC 达 0.947 (灵敏度 86.67%、特异度 93.33%), 临界值为  $\geq 15$  个; DCP-VD 预测的 AUC 达 0.918 (灵敏度 83.33%、特异度 90.00%), 临界值为  $\leq 25.6\%$ ; FD300-VD 预测的 AUC 达 0.927 (灵敏度 80.00%、特异度 93.33%), 临界值为  $\leq 28.3\%$ ; 同时中心视网膜厚度(CMT)预测的 AUC 达 0.934 (灵敏度 86.67%、特异度 86.67%), 临界值为  $\geq 462 \mu\text{m}$  [24]。Lee 等的研究则发现, 抗 VEGF 治疗反应差的患者 DCP 微动脉瘤数量显著多于有效组, 临界值为  $\geq 8$  个/ $3 \times 3 \text{ mm}$  扫描区域[30]。

但上述研究均基于单中心、小样本的观察性研究, 阈值仅可作为临床参考, 后续需开展多中心、大样本、前瞻性的外部验证研究, 进一步优化参数阈值并验证预测模型的临床适用性, 方可将其纳入临床诊疗规范。

## 6. 局限性与展望

### 6.1. 局限性

尽管 OCTA 在 DME 的治疗中展现出巨大潜力, 但目前仍面临许多挑战。在技术层面, 首先是投射伪影问题, 浅表毛细血管丛(SCP)的血流信号会投射到深层区域, 干扰深层毛细血管丛(DCP)参数的准确测量, 目前投影分辨算法的发展正在逐步解决这一问题[36]。其次, 严重 DME 时视网膜结构扭曲, OCTA 的自动分层算法常出现错误, 需要手动校正, 增加了操作难度和观察者间的变异。第三, 患者固视不良或眼球微动会导致图像质量下降, 产生运动伪影。最后, 目前商用 OCTA 设备的扫描范围多局限于  $3 \times 3 \text{ mm}$  或  $6 \times 6 \text{ mm}$ , 无法全面评估周边无灌注区。

从临床应用的角度来看, OCTA 技术目前仍面临几个需要关注的问题。首先是参数标准化问题, 不

同品牌、不同型号的设备采用的算法不尽相同, 所测得的血流密度(VD)等参数尚无法直接横向比, 未来需要建立能够跨平台通用的正常值参考范围。其次, 目前多数研究仍属于观察性设计, 基于 OCTA 指标来调整治疗策略是否能真正改善患者的长期预后, 仍有待前瞻性随机对照试验进一步验证。第三, OCTA 检查的费用相对传统 OCT 检查偏高, 在医疗资源有限的情况下, 还需要综合评估其相较于常规检查所带来的实际诊断价值。

## 6.2. 未来展望

首先是人工智能方面, 深度学习算法可自动识别分层错误、去除投射伪影、量化病灶负荷, 提高 OCTA 分析的准确性和效率[37]。第二是新技术, 超广角 OCTA 可一次扫描覆盖超过 100° 的视网膜范围, 实现周边无灌注区的量化评估, 为全面评估 DR/DME 提供可能[38]。第三是多种影像的融合, 将 OCTA 与 OCT 结构像、自适应光学、微视野计等功能学检查相结合, 构建多维度评估体系。第四是新型生物标志物, 除 VD、FAZ 等宏观参数外, 血管形态学特征(如血管弯曲度、分支模式、微动脉瘤形态)的量化分析可能提供更多预后信息[39]。

## 7. 结论

OCTA 是眼底影像技术的重要进步, 对 DME 的诊疗水平有明显提升作用。该技术的核心量化指标, 如 FAZ 面积、SCP-VD、DCP-VD、HRF 及 FD-300, 从多方面反映 DME 的微循环损害与炎症情况, 与抗 VEGF 治疗后的解剖学和功能学预后存在显著关联。其中 DCP-VD 与光感受器结构完整性及远期视力高度相关, 是评估 DME 治疗效果的重要预测指标。HRF 可作为炎症相关标志物, 有助于区分以炎症为主要特征的 DME 类型, 指导临床激素治疗。

随着人工智能进一步应用以及更多的前瞻性研究, OCTA 将逐步成为指导 DME 精准治疗的临床工具, 帮助眼科医生患者制定个体化治疗方案以实现更优的临床治疗效果。

## 参考文献

- [1] Teo, Z.L., Tham, Y., Yu, M., Chee, M.L., Rim, T.H., Cheung, N., *et al.* (2021) Global Prevalence of Diabetic Retinopathy and Projection of Burden through 2045: Systematic Review and Meta-Analysis. *Ophthalmology*, **128**, 1580-1591. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2021.04.027>
- [2] Lee, R., Wong, T.Y. and Sabanayagam, C. (2015) Epidemiology of Diabetic Retinopathy, Diabetic Macular Edema and Related Vision Loss. *Eye and Vision*, **2**, Article No. 17. <https://doi.org/10.1186/s40662-015-0026-2>
- [3] Ting, D.S.W., Cheung, G.C.M. and Wong, T.Y. (2016) Diabetic Retinopathy: Global Prevalence, Major Risk Factors, Screening Practices and Public Health Challenges: A Review. *Clinical & Experimental Ophthalmology*, **44**, 260-277. <https://doi.org/10.1111/ceo.12696>
- [4] Daruich, A., Matet, A., Moulin, A., Kowalczyk, L., Nicolas, M., Sellam, A., *et al.* (2018) Mechanisms of Macular Edema: Beyond the Surface. *Progress in Retinal and Eye Research*, **63**, 20-68. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2017.10.006>
- [5] Li, F., Zhang, L., Wang, Y., Xu, W., Jiao, W., Ma, A., *et al.* (2017) One-Year Outcome of Conbercept Therapy for Diabetic Macular Edema. *Current Eye Research*, **43**, 218-223. <https://doi.org/10.1080/02713683.2017.1379542>
- [6] Wells, J.A., Glassman, A.R., Ayala, A.R., Jampol, L.M., Bressler, N.M., Bressler, S.B., *et al.* (2016) Aflibercept, Bevacizumab, or Ranibizumab for Diabetic Macular Edema: Two-Year Results from a Comparative Effectiveness Randomized Clinical Trial. *Ophthalmology*, **123**, 1351-1359. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.02.022>
- [7] de Carlo, T.E., Romano, A., Waheed, N.K. and Duker, J.S. (2015) A Review of Optical Coherence Tomography Angiography (OCTA). *International Journal of Retina and Vitreous*, **1**, Article No. 5. <https://doi.org/10.1186/s40942-015-0005-8>
- [8] 曾国强, 钟键波, 张怡, 等. 眼内液细胞因子检测在糖尿病黄斑水肿中临床意义的研究进展[J]. 中华眼底病杂志, 2024, 40(8): 651-655.
- [9] Sakini, A.S.A., Hamid, A.K., Alkhuzaie, Z.A., Al-Aish, S.T., Al-Zubaidi, S., Tayem, A.A., *et al.* (2024) Diabetic Macular Edema (DME): Dissecting Pathogenesis, Prognostication, Diagnostic Modalities along with Current and Futuristic

- Therapeutic Insights. *International Journal of Retina and Vitreous*, **10**, Article No. 83. <https://doi.org/10.1186/s40942-024-00603-y>
- [10] Tan, G.S., Cheung, N., Simó, R., Cheung, G.C.M. and Wong, T.Y. (2017) Diabetic macular oedema. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, **5**, 143-155. [https://doi.org/10.1016/s2213-8587\(16\)30052-3](https://doi.org/10.1016/s2213-8587(16)30052-3)
- [11] Romero-Aroca, P., Baget-Bernaldiz, M., Pareja-Rios, A., Lopez-Galvez, M., Navarro-Gil, R. and Verges, R. (2016) Diabetic Macular Edema Pathophysiology: Vasogenic versus Inflammatory. *Journal of Diabetes Research*, **2016**, Article ID: 2156273. <https://doi.org/10.1155/2016/2156273>
- [12] Lee, C., Kim, M., Kumar, A., Lee, H., Yang, Y. and Kim, Y. (2025) Vascular Endothelial Growth Factor Signaling in Health and Disease: From Molecular Mechanisms to Therapeutic Perspectives. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, **10**, Article No. 170. <https://doi.org/10.1038/s41392-025-02249-0>
- [13] Zhang, J., Zhang, J., Zhang, C., Zhang, J., Gu, L., Luo, D., *et al.* (2022) Diabetic Macular Edema: Current Understanding, Molecular Mechanisms and Therapeutic Implications. *Cells*, **11**, Article No. 3362. <https://doi.org/10.3390/cells11213362>
- [14] Dugel, P.U., Koh, A., Ogura, Y., Jaffe, G.J., Schmidt-Erfurth, U., Brown, D.M., *et al.* (2020) HAWK and HARRIER: Phase 3, Multicenter, Randomized, Double-Masked Trials of Brolucizumab for Neovascular Age-Related Macular Degeneration. *Ophthalmology*, **127**, 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2019.04.017>
- [15] Heier, J.S., Korobelnik, J., Brown, D.M., Schmidt-Erfurth, U., Do, D.V., Midena, E., *et al.* (2016) Intravitreal Aflibercept for Diabetic Macular Edema: 148-Week Results from the VISTA and VIVID Studies. *Ophthalmology*, **123**, 2376-2385. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.07.032>
- [16] Le Du, J. and Ronco, C. (2025) Therapeutic Strategies Targeting Ocular Vasculopathies: Current Advances and Emerging Challenges. *Drug Discovery Today*, **30**, Article ID: 104496. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2025.104496>
- [17] Sahni, J., Patel, S.S., Dugel, P.U., Khanani, A.M., Jhaveri, C.D., Wykoff, C.C., *et al.* (2019) Simultaneous Inhibition of Angiopoietin-2 and Vascular Endothelial Growth Factor-A with Faricimab in Diabetic Macular Edema: BOULEVARD Phase 2 Randomized Trial. *Ophthalmology*, **126**, 1155-1170. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2019.03.023>
- [18] Heier, J.S., Khanani, A.M., Quezada Ruiz, C., Basu, K., Ferrone, P.J., Brittain, C., *et al.* (2022) Efficacy, Durability, and Safety of Intravitreal Faricimab up to Every 16 Weeks for Neovascular Age-Related Macular Degeneration (TENAYA and LUCERNE): Two Randomised, Double-Masked, Phase 3, Non-Inferiority Trials. *The Lancet*, **399**, 729-740. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(22\)00010-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(22)00010-1)
- [19] Jain, R. and Daigavane, S. (2024) Intravitreal OZURDEX vs. Intravitreal Bevacizumab for Diabetic Macular Edema: A Comprehensive Review. *Cureus*, **16**, e56796. <https://doi.org/10.7759/cureus.56796>
- [20] Freiberg, F.J., Pfau, M., Wons, J., Wirth, M.A., Becker, M.D. and Michels, S. (2015) Optical Coherence Tomography Angiography of the Foveal Avascular Zone in Diabetic Retinopathy. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **254**, 1051-1058. <https://doi.org/10.1007/s00417-015-3148-2>
- [21] Takase, N., Nozaki, M., Kato, A., Ozeki, H., Yoshida, M. and Ogura, Y. (2015) Enlargement of Foveal Avascular Zone in Diabetic Eyes Evaluated by En Face Optical Coherence Tomography Angiography. *Retina*, **35**, 2377-2383. <https://doi.org/10.1097/iae.0000000000000849>
- [22] Di, G., Weihong, Y., Xiao, Z., Zhikun, Y., Xuan, Z., Yi, Q., *et al.* (2015) A Morphological Study of the Foveal Avascular Zone in Patients with Diabetes Mellitus Using Optical Coherence Tomography Angiography. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **254**, 873-879. <https://doi.org/10.1007/s00417-015-3143-7>
- [23] 王怡璇, 曹永亮, 高萌, 等. 视网膜深层血流密度对康柏西普治疗糖尿病性黄斑水肿预后的影响: 基于 OCTA 的评价[J]. 眼科新进展, 2022, 42(4): 299-303.
- [24] 生侠, 周梦文, 贺靖凯, 等. 深浅层血管密度变化和视网膜高反射点评估糖网黄斑水肿治疗反应的效果[J]. 实用医学杂志, 2025, 41(4): 575-579.
- [25] Tang, F.Y., Chan, E.O., Sun, Z., Wong, R., Lok, J., Szeto, S., *et al.* (2020) Clinically Relevant Factors Associated with Quantitative Optical Coherence Tomography Angiography Metrics in Deep Capillary Plexus in Patients with Diabetes. *Eye and Vision*, **7**, Article No. 7. <https://doi.org/10.1186/s40662-019-0173-y>
- [26] Moon, B.G., Um, T., Lee, J. and Yoon, Y.H. (2018) Correlation between Deep Capillary Plexus Perfusion and Long-Term Photoreceptor Recovery after Diabetic Macular Edema Treatment. *Ophthalmology Retina*, **2**, 235-243. <https://doi.org/10.1016/j.oret.2017.07.003>
- [27] 周婕, 张学东. 黄斑区视网膜深层微血管变化对糖尿病性黄斑水肿的影响[J]. 眼科新进展, 2021, 41(5): 479-483.
- [28] Spaide, R.F. (2016) Retinal Vascular Cystoid Macular Edema: Review and New Theory. *Retina*, **36**, 1823-1842. <https://doi.org/10.1097/iae.0000000000001158>
- [29] Hasegawa, N., Nozaki, M., Takase, N., Yoshida, M. and Ogura, Y. (2016) New Insights into Microaneurysms in the Deep Capillary Plexus Detected by Optical Coherence Tomography Angiography in Diabetic Macular Edema. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **57**, Oct348-Oct355. <https://doi.org/10.1167/iovs.15-18782>

- [30] Lee, J., Moon, B.G., Cho, A.R. and Yoon, Y.H. (2016) Optical Coherence Tomography Angiography of DME and Its Association with Anti-VEGF Treatment Response. *Ophthalmology*, **123**, 2368-2375. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.07.010>
- [31] Scarinci, F., Nesper, P.L. and Fawzi, A.A. (2016) Deep Retinal Capillary Nonperfusion Is Associated with Photoreceptor Disruption in Diabetic Macular Ischemia. *American Journal of Ophthalmology*, **168**, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2016.05.002>
- [32] Vujosevic, S., Bini, S., Torresin, T., Berton, M., Midena, G., Parrozzani, R., *et al.* (2017) HYPERREFLECTIVE RETINAL SPOTS in NORMAL and DIABETIC Eyes: B-Scan and En Face Spectral Domain Optical Coherence Tomography Evaluation. *Retina*, **37**, 1092-1103. <https://doi.org/10.1097/iae.0000000000001304>
- [33] Uji, A., Murakami, T., Nishijima, K., Akagi, T., Horii, T., Arakawa, N., *et al.* (2012) Association between Hyperreflective Foci in the Outer Retina, Status of Photoreceptor Layer, and Visual Acuity in Diabetic Macular Edema. *American Journal of Ophthalmology*, **153**, 710-717.e1. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2011.08.041>
- [34] Busch, C., Zur, D., Fraser-Bell, S., Láins, I., Santos, A.R., Lupidi, M., *et al.* (2018) Shall We Stay, or Shall We Switch? Continued Anti-VEGF Therapy versus Early Switch to Dexamethasone Implant in Refractory Diabetic Macular Edema. *Acta Diabetologica*, **55**, 789-796. <https://doi.org/10.1007/s00592-018-1151-x>
- [35] 邱煦, 窦宏亮, 陈凤华. 玻璃体腔内注射抗 VEGF 药物治疗 DME 对黄斑区微循环的短期影响[J]. 国际眼科杂志, 2021, 21(8): 1473-1478.
- [36] Ghasemi Falavarjani, K., Habibi, A., Anvari, P., Ghasemizadeh, S., Ashraf Khorasani, M., Shenazandi, H., *et al.* (2019) Effect of Segmentation Error Correction on Optical Coherence Tomography Angiography Measurements in Healthy Subjects and Diabetic Macular Oedema. *British Journal of Ophthalmology*, **104**, 162-166. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2019-314018>
- [37] Sawada, O., Ichiyama, Y., Obata, S., Ito, Y., Kakinoki, M., Sawada, T., *et al.* (2018) Comparison between Wide-Angle OCT Angiography and Ultra-Wide Field Fluorescein Angiography for Detecting Non-Perfusion Areas and Retinal Neovascularization in Eyes with Diabetic Retinopathy. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **256**, 1275-1280. <https://doi.org/10.1007/s00417-018-3992-y>
- [38] Borrelli, E., Sacconi, R., Brambati, M., Bandello, F. and Querques, G. (2019) *In Vivo* Rotational Three-Dimensional OCTA Analysis of Microaneurysms in the Human Diabetic Retina. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 16789. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53357-1>
- [39] 何健华. OCTA 检查对不同分期糖尿病患者视网膜病变的诊断价值[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(20): 160-162.