

OCTA 参数和血清半胱氨酸蛋白酶-1 评估糖尿病视网膜病变严重程度的价值

陶道典¹, 周代英², 胡益飞³

引用:陶道典,周代英,胡益飞. OCTA 参数和血清半胱氨酸蛋白酶-1 评估糖尿病视网膜病变严重程度的价值. 国际眼科杂志, 2026,26(11):2004-2009.

作者单位:(321000)中国浙江省金华市,浙江大学医学院附属金华医院¹眼科;³检验科;²(635000)中国四川省达州市第一人民医院眼科

作者简介:陶道典,硕士,主治医师,研究方向:眼眶病、眼底病、屈光。

通讯作者:陶道典. taodaodian2014@163.com

收稿日期:2026-06-06 修回日期:2026-09-15

摘要

目的:探讨光学相干断层扫描血管成像(OCTA)参数和血清半胱氨酸蛋白酶-1(caspase-1)评估糖尿病视网膜病变(DR)严重程度的临床价值。

方法:回顾性纳入2024年6月至2025年12月于我院诊断DR患者,根据眼底荧光血管造影(FFA)结果分为早期非增生型DR(NPDR)和晚期增生型DR(PDR);另选择糖尿病非DR患者为对照组。OCTA参数包括黄斑区血流密度、黄斑中心凹无血管区(FAZ)周长和面积、平均视网膜厚度、视网膜高反射点(HRF)以及内界膜异常。血生化包括空腹血糖、糖化血红蛋白(HbA1c)、系统性免疫炎症指数(SII)、三酰甘油/高密度脂蛋白(TG/HDL)、尿微量白蛋白/尿肌酐(UACR)以及caspase-1。

结果:本研究纳入DR患者128例151眼,其中NPDR组75例90眼(男40例,女35例,年龄74.3±5.6岁),PDR组53例61眼(男27例,女26例,年龄75.9±5.8岁)。对照组60例120眼(男33例,女27例,年龄72.6±5.4岁)。对照组、NPDR组和PDR组黄斑区血流密度逐渐降低,而FAZ周长和面积以及平均视网膜厚度逐渐增加,HRF和内界膜异常发生率逐渐升高(均 $P<0.001$);SII、UACR和caspase-1水平逐渐增加(均 $P<0.001$)。NPDR组和PDR组糖尿病病程比对照组延长(均 $P<0.001$)。多因素Logistic回归分析显示,糖尿病病程、HRF和caspase-1是DR发生的危险因素,黄斑区血流密度是其保护因素(均 $P<0.001$);caspase-1是DR进展至PDR的危险因素,黄斑区血流密度是其保护因素(均 $P<0.001$)。受试者工作特征(ROC)曲线显示,caspase-1联合黄斑区血流密度预测DR发生和PDR的曲线下面积(AUC)分别为0.864和0.890,均高于单一指标(均 $P<0.05$)。

结论:OCTA参数黄斑区血流密度联合血清caspase-1对评估DR严重程度具有重要的临床应用价值。

关键词:光学相干断层扫描血管成像(OCTA);半胱氨酸蛋白酶-1;糖尿病视网膜病变;血流密度;视网膜高反射点

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.11.23

Value of OCTA parameters and serum caspase-1 in assessing the severity of diabetic retinopathy

Tao Daodian¹, Zhou Daiying², Hu Yifei³

¹Department of Ophthalmology; ³Department of Clinical Laboratory, Affiliated Jinhua Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Jinhua 321000, Zhejiang Province, China; ²Department of Ophthalmology, Dazhou First People's Hospital, Dazhou 635000, Sichuan Province, China

Correspondence to: Tao Daodian. Department of Ophthalmology, Affiliated Jinhua Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Jinhua 321000, Zhejiang Province, China. taodaodian2014@163.com

Received:2026-06-06 Accepted:2026-09-15

Abstract

• **AIM:** To investigate the value of optical coherence tomography angiography (OCTA) parameters and serum caspase-1 for assessing the severity of diabetic retinopathy (DR).

• **METHODS:** Patients diagnosed with DR in our hospital from June 2024 to December 2025 were retrospectively enrolled and were divided into early non-proliferative DR (NPDR) and advanced proliferative DR (PDR) groups according to fundus fluorescein angiography (FFA) findings. Patients with diabetes mellitus but without DR were selected as the control group. OCTA parameters included macular vascular density, the perimeter and area of the foveal avascular zone (FAZ), mean retinal thickness, hyperreflective foci (HRF), and internal limiting membrane abnormalities. Blood biochemical indicators contained fasting blood glucose, glycated hemoglobin (HbA1c), systemic immune-inflammation index (SII), triglyceride/high-density lipoprotein (TG/HDL) ratio, urinary albumin/creatinine ratio (UACR), and caspase-1.

• **RESULTS:** Totally 128 DR patients (151 eyes) were enrolled in this study, including 75 patients (90 eyes) in the NPDR group (40 males and 35 females, mean age: 74.3±5.6 y) and 53 patients (61 eyes) in the PDR group (27 males and 26 females, mean age: 75.9±5.8 y). Meanwhile, 60 diabetic patients (120 eyes) without DR were recruited as the control group (33 males and 27 females, mean age: 72.6±5.4 y). The macular vascular density gradually decreased in the control, NPDR and PDR groups, while perimeter and area of FAZ, and mean

retinal thickness gradually increased, and the incidence of HRF and internal limiting membrane abnormalities gradually increased (all $P<0.001$). The levels of SII, UACR and caspase-1 gradually increased (all $P<0.001$). The duration of diabetes mellitus was longer in the NPDR and PDR groups than in the control group (all $P<0.001$). Multivariate logistic regression analysis demonstrated that diabetic duration, HRF, and caspase-1 were risk factors for the occurrence of DR, while macular vascular density served as a protective factor (all $P<0.001$). Moreover, caspase-1 was identified as a risk factor for the progression of DR to PDR, and macular vascular density was a protective factor against DR progression (all $P<0.001$). Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis showed that the area under the curve (AUC) of caspase-1 combined with macular vascular density for predicting DR occurrence and PDR was 0.864 and 0.890, respectively, both higher than those of single indicators (all $P<0.05$).

- **CONCLUSION:** The combination of macular vascular density from OCTA parameters and serum caspase-1 has important clinical value in assessing severity of DR.
- **KEYWORDS:** optical coherence tomography angiography (OCTA); caspase-1; diabetic retinopathy; vascular density; retinal hyperreflective foci

Citation: Tao DD, Zhou DY, Hu YF. Value of OCTA parameters and serum caspase-1 in assessing the severity of diabetic retinopathy. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26 (11): 2004–2009.

0 引言

糖尿病视网膜病变 (diabetic retinopathy, DR) 是一种全球性的致盲性眼病,其高患病率对公共卫生构成了严峻挑战。中国拥有庞大的糖尿病群体,成人糖尿病患者中 DR 患病率约为 16.3%,而威胁视力的 DR 患病率约为 3.2%^[1]。DR 是长期高血糖通过氧化应激、炎症等多种通路损伤视网膜神经血管单元的复杂过程。随着病情进展,持续的微血管损伤导致视网膜缺血、缺氧,进而刺激血管内皮生长因子 (vascular endothelial growth factor, VEGF) 等大量产生,诱发异常的新生血管形成,这是增生型 DR (proliferative DR, PDR) 的病理基础^[2]。DR 可分为早期非增生型 DR (non-proliferative DR, NPDR) 和晚期 PDR,其预后差异较大。临床分型主要依赖眼底荧光血管造影 (fundus fluorescein angiography, FFA),具有一定的创伤性,重复性差,不易推广。随着光学相干断层扫描血管成像 (optical coherence tomography angiography, OCTA) 的应用及普及,其具有无创性、可重复检查、分辨率高、准确性好的优点,可提供眼底血管及视网膜结构的微小改变,在眼科疾病诊断、治疗及随访中应用广泛^[3]。尽管利用 OCTA 诊断 DR 以及判断 DR 进程的相关研究已经很多,但是尚未建立 OCTA 评估 DR 严重程度的统一标准,还需要进一步探索。此外,新近研究发现半胱氨酸蛋白酶-1 (caspase-1) 可能与糖尿病及 DR 的发生、发展密切相关^[4]。OCTA 参数和血清 caspase-1 是否可作为评估 DR 严重程度的有力指标还缺乏直接证据。基于此,本研究利用我中心数据探讨 OCTA 参数和血清 caspase-1 评估 DR

严重程度的临床价值,为 DR 诊疗工作提供实践依据。

1 对象和方法

1.1 对象 本研究为单中心、回顾性病例分析,连续选择 2024 年 6 月至 2025 年 12 月于我院诊断 DR 患者。纳入标准:(1) 年龄 40–80 岁;(2) 符合糖尿病和 DR 的诊断标准^[5];(3) 有完整的眼科检查资料。排除标准:(1) 已经接受临床治疗,如激光光凝术等;(2) 合并其他类型眼疾病,如青光眼等;(3) 合并其他严重疾病,如重症感染等。另选择糖尿病非 DR 患者 60 例为对照组,纳入标准为符合糖尿病诊断,但不符合 DR 诊断。本研究取得医学伦理委员会审查批准[批准号:(2024) 伦审第(255) 号],所有参与者均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 研究方法 DR 患者根据 FFA 结果分为早期 NPDR (NPDR 组) 和晚期 PDR (PDR 组)。FFA 检查:0.5% 复方托吡卡胺滴眼液充分散瞳,采用 FFA 检测仪拍摄眼底彩色照片,经肘静脉注入 3 mL 10% 荧光素钠注射液,10 s 后对双眼进行连续交替拍照;静脉充盈后改为间断拍照,单眼照片数量至少 15 张,造影观察时间维持 15 min。照片上传至计算机软件进行分析,由 2 名经验丰富的眼科医师双盲阅片,结果不一致时由第 3 名副主任及以上级别的医师进行阅片,直到达到意见统一。出现新生血管、玻璃体积血或视网膜出血任一表现可确诊为 PDR^[6]。

对所有入组患者进行 OCTA 检查,主要流程为充分散瞳后采用 OCTA 扫描仪进行检查。患者取端坐位,固定头部和下颌,以黄斑中心凹作为中心,在 6 mm×6 mm 视网膜直径范围内观察全层黄斑区血流、视网膜厚度及形态。扫描仪参数设置为 512×125,扫描深度 2.0 mm,横向分辨率 20 μm,轴向分辨率 5 μm。每个患者扫描 3 次,结果取平均值,见图 1。

1.2.2 观察指标

1.2.2.1 一般资料 包括性别、年龄、糖尿病病程、单/双眼患病、高血压。

1.2.2.2 OCTA 参数 包括全层黄斑区血流密度、黄斑中心凹无血管区 (foveal avascular zone, FAZ) 周长和面积、平均视网膜厚度、视网膜高反射点 (hyperreflective spots, HRF) 以及内界膜异常。平均视网膜厚度计算全图区、中心凹、旁中心凹以及近中心凹处视网膜厚度的平均值。HRF 定义为在视网膜存在散状分布边界清晰、直径小于 30 μm 反射强度与神经纤维层相近的点状病灶,通常无尾影^[7]。内界膜异常指 OCT 图像上内界膜形态、结构或连续性出现偏离正常的情况,如分离、皱褶、不连续等^[7]。

1.2.2.3 血生化指标 包括空腹血糖、糖化血红蛋白 (HbA1c)、系统性免疫炎症指数 (systemic immune-inflammation index, SII)、三酰甘油/高密度脂蛋白 (triglyceride/high-density lipoprotein, TG/HDL)、尿微量白蛋白/尿肌酐 (urinary albumin-to-creatinine ratio, UACR) 以及 caspase-1。其中 SII=血小板计数×中性粒细胞计数/淋巴细胞计数。ELISA 法检测 caspase-1,取患者清晨肘静脉血 20 mL 分装于两个抗凝管,一管用于 caspase-1 检测,一管用于其他指标检测,严格按照说明书步骤进行。

统计学分析:采用 SPSS23.0 统计软件对数据进行正态性检验,计量资料以均数±标准差表示,多组间比较采用方差分析和 LSD-*t* 检验;计数资料以例 (%) 表达,比较

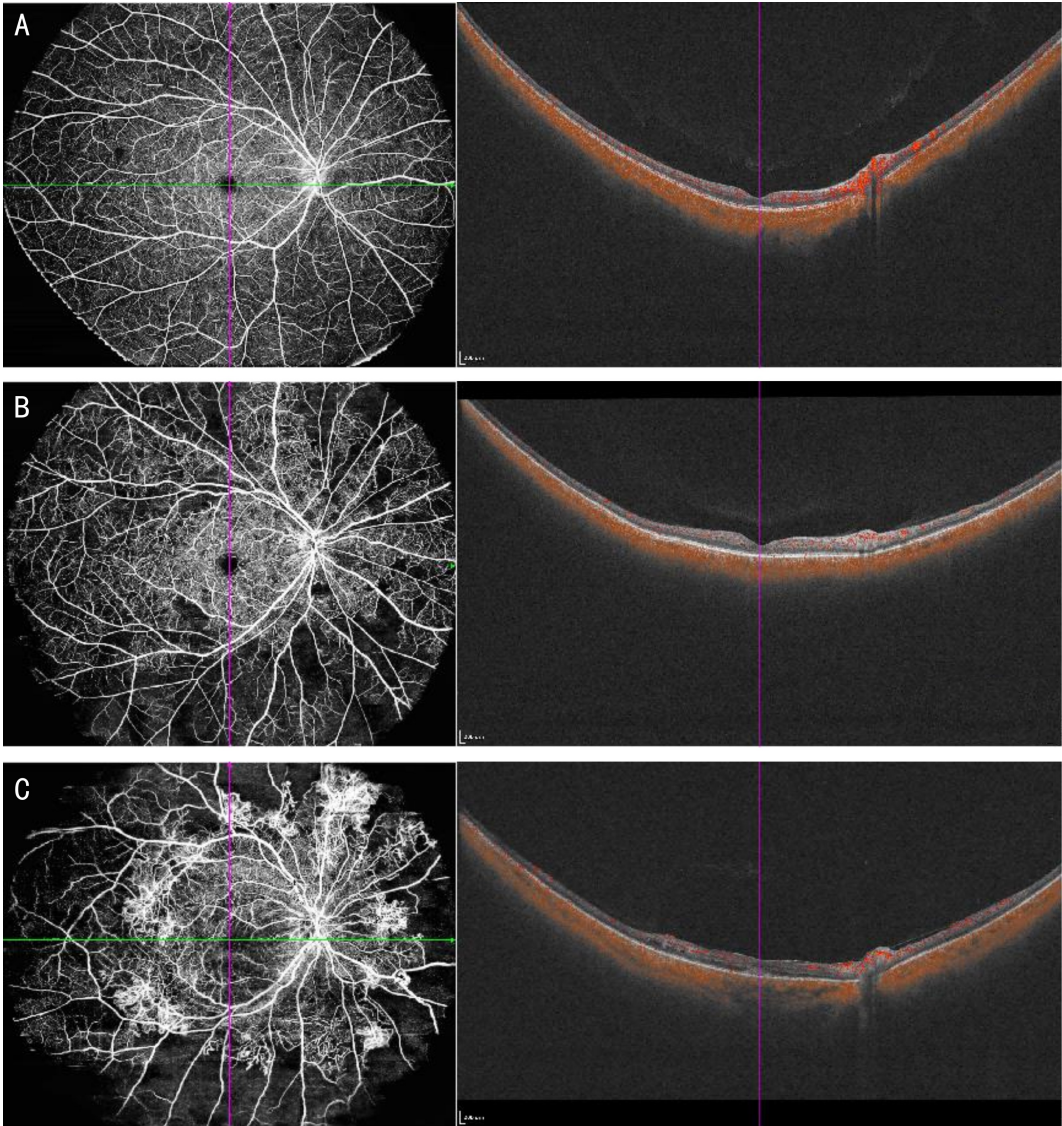


图1 视网膜和黄斑区的OCTA图 A:对照组,黄斑区无水肿;B:NPDR组,黄斑区微量水肿;C:PDR组,黄斑区广泛水肿。

用 χ^2 检验;多因素 Logistic 回归筛选危险因素,采用逐步后退法(纳入标准为 0.10,剔除标准为 0.05),并采用多重共线性检验评估各因素间的相关性;受试者工作特征(receiver operating characteristic,ROC)曲线计算曲线下面积(area under curve,AUC),获取最佳临界值、敏感度和特异度,AUC 比较采用 Z 检验。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料比较 本研究纳入 DR 患者 128 例 151 眼,其中 NPDR 组 75 例 90 眼,PDR 组 53 例 61 眼。对照组 60 例 120 眼。NPDR 组和 PDR 组糖尿病病程比对照组长(均 $P<0.05$),其他指标比较差异无统计学意义(均 $P>0.05$),见表 1。

2.2 OCTA 参数比较 对照组、NPDR 组和 PDR 组黄斑区血流密度逐渐降低,而 FAZ 周长和面积以及平均视网膜厚度逐渐增加,HRF 和内界膜异常发生率逐渐升高,差异有统计学意义(均 $P<0.001$),见表 2。

2.3 血生化指标比较 对照组、NPDR 组和 PDR 组 SII、UACR 和 caspase-1 水平逐渐增加,差异有统计学意义(均 $P<0.001$),见表 3。

2.4 DR 和 PDR 的危险因素分析 将上述比较 $P<0.05$ 的

指标作为自变量,是否发生 DR(对照组为 0,NPDR 组和 PDR 组均为 1)作为因变量,纳入多因素 Logistic 回归。分析显示,糖尿病病程、HRF 和 caspase-1 是 DR 发生的危险因素,黄斑区血流密度是其保护因素(均 $P<0.001$)。是否进展至 PDR(NPDR 组 = 0,PDR 组 = 1)作为因变量,纳入多因素 Logistic 回归。分析显示 caspase-1 是 DR 进展至 PDR 的危险因素,黄斑区血流密度是其保护因素(均 $P<0.001$),见表 4。

2.5 共线性分析 经多重共线性分析发现,SII 和 UACR 与糖尿病病程、HRF、caspase-1 和黄斑区血流密度之间不存在显著的相关性(SII: F 值分别为 1.032、0.965、0.452、0.163,均 $P>0.05$;UACR: F 值分别为 1.526、1.001、0.658、0.325,均 $P>0.05$),糖尿病病程与 HRF、caspase-1 和黄斑区血流密度之间也不存在显著的相关性(F 值分别为 0.754、0.523、0.423,均 $P>0.05$)。

2.6 caspase-1 和黄斑区血流密度预测 DR 和 PDR 的性能 分别以 caspase-1、黄斑区血流密度、caspase-1 联合黄斑区血流密度作为诊断指标,是否发生 DR(对照组为 0,NPDR 组和 PDR 组均为 1)作为诊断结果,纳入 ROC 模型。曲线显示,caspase-1 联合黄斑区血流密度预测 DR 发生的 AUC 为 0.864,均高于单一指标($Z=4.659、3.125$,

表 1 三组一般资料比较

组别	例数(眼数)	男/女(例)	年龄($\bar{x}\pm s$,岁)	糖尿病病程($\bar{x}\pm s$,a)	单/双眼患病(眼)	高血压(例,%)
对照组	60(120)	33/27	72.6±5.4	6.8±2.3	0/0	12(20.0)
NPDR 组	75(90)	40/35	74.3±5.6	9.5±3.7 ^a	60/30	19(25.3)
PDR 组	53(61)	27/26	75.9±5.8	10.3±3.9 ^a	45/16	11(20.8)
F/χ^2		0.187	1.032	13.526	0.507	0.653
P		0.911	0.526	<0.001	0.476	0.721

注:对照组为糖尿病非 DR 患者。^a $P<0.05$ vs 对照组。

表 2 三组 OCTA 参数比较

组别	例数(眼数)	黄斑区血流密度 ($\bar{x}\pm s$,%)	FAZ 周长 ($\bar{x}\pm s$,mm)	FAZ 面积 ($\bar{x}\pm s$,mm ²)	平均视网膜厚度 ($\bar{x}\pm s$,μm)	HRF (眼,%)	内界膜异常 (眼,%)
对照组	60(120)	51.2±3.6	0.30±0.03	2.16±0.24	282.5±25.6	6(5.0)	4(3.3)
NPDR 组	75(90)	45.8±3.2 ^a	0.37±0.05 ^a	2.28±0.29 ^a	305.6±28.8 ^a	26(28.9) ^a	18(20.0) ^a
PDR 组	53(61)	40.2±2.8 ^{a,c}	0.44±0.07 ^{a,c}	2.43±0.37 ^{a,c}	325.7±26.4 ^{a,c}	30(49.2) ^{a,c}	23(37.7) ^{a,c}
F/χ^2		6.324	6.021	6.653	5.528	47.499	35.624
P		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注:对照组为糖尿病非 DR 患者。^a $P<0.05$ vs 对照组;^c $P<0.05$ vs NPDR 组。

表 3 三组血生化指标比较

组别	例数(眼数)	空腹血糖(mmol/L)	HbA1c(%)	SII	TG/HDL	UACR(mg/g)	caspase-1(ng/mL)
对照组	60(120)	7.5±1.2	7.3±0.5	345.6±42.3	1.31±0.13	28.6±4.5	5.6±0.8
NPDR 组	75(90)	7.7±1.3	7.4±0.6	389.5±48.7 ^a	1.33±0.15	58.9±10.2 ^a	9.8±0.9 ^a
PDR 组	53(61)	7.8±1.4	7.5±0.7	423.3±55.6 ^{a,c}	1.35±0.18	74.6±13.5 ^{a,c}	13.5±1.1 ^{a,c}
F		0.856	0.565	4.032	0.759	9.635	5.426
P		0.421	0.342	<0.001	0.365	<0.001	<0.001

注:对照组为糖尿病非 DR 患者。^a $P<0.05$ vs 对照组;^c $P<0.05$ vs NPDR 组。

表 4 DR 和 PDR 的危险因素分析

因变量	自变量	β	Wald χ^2	P	OR	95%CI
DR	糖尿病病程	0.146	4.658	<0.001	1.157	1.032-1.425
	HRF	0.640	7.412	<0.001	1.896	1.458-2.326
	caspase-1	0.710	8.526	<0.001	2.034	1.657-2.458
	黄斑区血流密度	-0.849	11.254	<0.001	0.428	0.256-0.657
PDR	caspase-1	0.504	7.542	<0.001	1.655	1.322-1.987
	黄斑区血流密度	-0.393	9.245	<0.001	0.675	0.326-0.945

均 $P<0.05$)。是否进展至 PDR(NPDR 组 = 0,PDR 组 = 1)作为诊断结果,纳入 ROC 模型。曲线显示,caspase-1 联合黄斑区血流密度预测 PDR 的 AUC 为 0.890,均高于单一指标($Z=5.526$ 、 3.968 ,均 $P<0.05$),见表 5 和图 2。

3 讨论

本研究的创新性在于将影像学指标 OCTA 与血清学指标 caspase-1 相结合用于 DR 发生以及严重程度评估,提升了诊断的准确性,具有较大的临床实践价值。DR 早期诊断以及病情进展的准确评估对制定恰当的临床治疗决策具有重要的意义。OCTA 的核心优势在于实现了无创、高分辨率的眼底血流三维可视化,显著提升了诊疗安全性与精准度。OCTA 通过捕捉血流信号,无需注射造影剂即可清晰呈现眼底微血管网络,已广泛应用于多种疾病的诊断、治疗指导和预后评估。

本研究显示,对照组、NPDR 组和 PDR 组黄斑区血流密度逐渐降低,而 FAZ 周长和面积以及平均视网膜厚度

逐渐增加,HRF 和内界膜异常逐渐增多。提示 OCTA 可呈现多种视网膜结构和血流变化用于反映 DR 的进展。OCTA 能够比 FFA 更早地发现微血管瘤、无灌注区等微小病变,实现了超早期筛查^[8]。同时,通过对 FAZ 面积、血管密度等参数的量化分析,可辅助疾病分期、预测增殖风险、评估抗 VEGF 的治疗反应等^[9]。崔迎欣等^[10]研究同样指出,OCTA 可较好地评估 DR 患者眼底多个部位的血流密度,随着 DR 病情进展血流密度也可显著改变。本研究的优势在于不仅分析了黄斑区血流密度,还探讨了其他 OCTA 参数如黄斑中心凹 FAZ 周长和面积、平均视网膜厚度、HRF 以及内界膜异常等。杨雄一等^[11]还优化了 OCTA 检测 DR 患者血流密度的窗口参数,提高了图像的诊断性能。本研究在 OCTA 检测中应用了杨雄一的方法,保证了研究结果的准确性。Yang 等^[12]研究也证实,随着 DR 严重程度的增加,脉络膜毛细血管缺血增加,黄斑区面积增大,总视网膜灌注密度降低。本研究的优势不仅探讨了黄

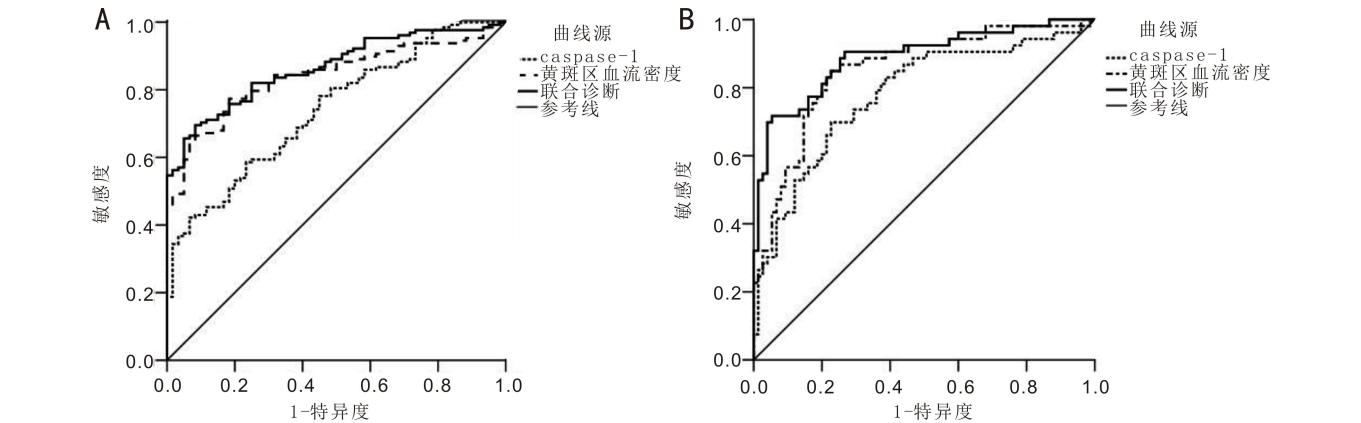


图2 caspase-1和黄斑区血流密度预测 DR 和 PDR 的 ROC 曲线 A:预测 DR;B:预测 PDR。

表 5 caspase-1 和黄斑区血流密度预测 DR 和和 PDR 的性能

诊断结果	诊断指标	AUC	95%CI	P	临界值	敏感度	特异度
DR	caspase-1	0.739	0.699-0.801	<0.001	7.7 ng/mL	0.78	0.80
	黄斑区血流密度	0.840	0.803-0.889	<0.001	48.3%	0.77	0.61
	caspase-1 联合黄斑区血流密度	0.864	0.825-0.932	<0.001		0.83	0.79
PDR	caspase-1	0.780	0.711-0.845	<0.001	11.2 ng/mL	0.76	0.82
	黄斑区血流密度	0.852	0.812-0.903	<0.001	43.4%	0.77	0.64
	caspase-1 联合黄斑区血流密度	0.890	0.835-0.956	<0.001		0.85	0.76

斑区血流密度的变化,还发现重要血清学指标 caspase-1 的变化。在 DR 进展为 PDR 之前,深层和大血管可能在早期已经发生变化。更多的缺血和血管扭曲与更差的视力和更高的 HbA1c 水平相关。OCTA 可用于检测 DR 患者视网膜和脉络膜中的大小血管变化。陶道典等^[13]研究还发现,利用 OCTA 可检测糖尿病患者 HRF 对反映疾病进展也有重要意义。但是本研究却发现,HRF 对评估 DR 进展无显著意义,考虑原因与纳入样本量、患者病情程度等因素有关。黄斑区的血流变化是 DR 发生与进展的核心环节,两者关系紧密,相互作用,形成了一个动态的病理生理过程^[14]。虽然本研究采用的是全层黄斑区血流变化,未能进一步分层分析,但是仍然可以证明 OCTA 的定量参数是观察这一过程的重要窗口。

本研究还发现,对照组、NPDR 组和 PDR 组 SII、UACR 和 caspase-1 水平逐渐增加,NPDR 组和 PDR 组糖尿病病程比对照组延长。同时也观察到三组间空腹血糖和 HbA1c 无统计学差异(均 $P>0.05$),我们推测尽管入组时 HbA1c 无差异,但长期累积高血糖暴露(病程)可能已造成不可逆的微血管基底膜损伤,这为 caspase-1 的激活提供了微环境基础。当然,我们检测的空腹血糖和 HbA1c 仅为入院后单一时刻的数据,可能存在偏倚性。caspase-1 通过驱动细胞焦亡,在 DR 的慢性炎症和微血管损伤中扮演核心角色^[15]。它不仅是疾病进展的关键生物标志物,也是极具潜力的药物干预靶点。Ouyang 等^[16]指出,中药提取物原花青素 B2 通过抑制 caspase-1/GSDMD 介导的细胞焦亡来减轻 DR 中的微血管功能障碍。本研究的优势在于通过临床研究同样表明,DR 患者血清 caspase-1 变化与病情进展有关。高血糖环境通过多种途径启动炎症小体(如 NLRP3)的组装,炎症小体的形成直接激活 caspase-1。激活后的 caspase-1 一方面切割

Gasdermin D 蛋白,导致细胞渗透压改变,最终裂解死亡;另一方面 caspase-1 切割并活化下游的强效炎症因子白介素-1 β 和白介素-18。上述过程最终导致细胞膜破裂并释放大量炎症因子,引发级联放大的炎症反应,加剧视网膜的神经血管单元损伤^[17]。目前关于 caspase-1 在 DR 发生中的病理生理机制研究还不多,本研究结果为 caspase-1 在 DR 疾病诊断中的应用提供了一定临床基础。

本研究显示,糖尿病病程、HRF 和 caspase-1 是 DR 发生的危险因素,黄斑区血流密度是其保护因素;caspase-1 是 DR 进展至 PDR 的危险因素,黄斑区血流密度是其保护因素。提示 caspase-1 和黄斑区血流密度与 DR 的发生及进展密切相关。尽管 SII 和 UACR 在单因素分析中存在显著差异,但多因素分析尚不能确定 SII 和 UACR 是 DR 发生或者 DR 进展至 PDR 的危险因素,我们推测 SII 和 UACR 变化更多为 DR 发生、进展的伴随结果,而不是始动因素。此外,我们在多重共线性检验中也并未观察到 SII 和 UACR 与其他因素之间存在显著相关性。OCTA 能够无创、分层、定量地评估黄斑区的微血管,揭示微观变化与 DR 的临床分期密切相关。OCTA 将视网膜微血管分为浅层毛细血管丛(SCP)和深层毛细血管丛(DCP)。DCP 的血流变化往往早于 SCP,对 DR 的早期损伤更为敏感^[18]。随着 DR 进展,黄斑区浅层与深层血管密度均会显著下降,这与疾病的严重程度呈正相关^[19]。DR 晚期视网膜周边区域同样会出现血管密度降低。OCTA 能比传统 FFA 更早地捕捉上述变化过程^[20]。

最后,本研究显示 caspase-1 联合黄斑区血流密度预测 DR 发生和 PDR 的性能最佳,为临床早期评估 DR 进程提供了较好的诊断工具。同时我们观察到单独黄斑区血流密度的诊断价值有限,考虑原因是黄斑区血流密度仅仅是 OCTA 检查的一个客观数据,OCTA 诊断 DR 往往是综

合评估,单一黄斑区血流密度更多作为局部血流信号异常的依据,在诊断全局上价值稍显不足。但是,联合 caspase-1 后诊断价值大幅提升,说明本研究将影像学指标与生化指标相结合能够更加全面、准确评估 DR 严重程度。联合诊断的临床增益尽管不大,但是敏感度和特异度却明显提升,而且 caspase-1 和黄斑区血流密度均是较易获得的指标,因此我们认为临床实践的价值仍然较大,值得推广应用。既往研究可能更多倾向于单一途径诊断疾病,如影像学方法或者血清学方法,不能全面、客观反映疾病进展程度。本研究通过临床实践证实了 OCTA 定量参数与血清学指标 caspase-1 能够从不同侧面反映 DR 的进展,对指导临床准确评估 DR 病情严重程度具有客观意义。

综上所述, OCTA 参数黄斑区血流密度联合血清 caspase-1 对评估 DR 严重程度具有重要的临床应用价值。当然,本研究还有一定不足:比如本研究采用仅为单中心数据,可能存在偏倚性,总体样本量还有限,需要更大样本的前瞻性病例对照试验进行验证。此外, OCTA 变化与血清 caspase-1 变化的内在机制还有待进一步探索。

利益冲突声明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 陶道典论文选题与修改,初稿撰写;周代英、胡益飞文献检索,数据分析。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

[1] 李筱荣, 刘巨平. 我国糖尿病视网膜病变社区筛查现状与未来展望. 中华眼底病杂志, 2026,42(1):8-11.

[2] 代明丽, 王嘉鹏, 高英, 等. 靶向视网膜小胶质细胞的糖尿病视网膜病变治疗新策略研究进展. 眼科新进展, 2026,46(1):60-63.

[3] Xing XD, Wei J, Shen YC, et al. Correlation between renal function and OCTA parameters of the retina and choroid in early-stage diabetic patients. J Transl Med, 2025,23(1):1368-1374.

[4] Garber D, Zhu S. Implications of caspase 1/interleukin-1 beta (IL-1 β) signaling and hypoxia-inducible factor 1-alpha (HIF-1 α) on diabetic retinopathy pathology. Cureus, 2023,15(7):42479-42485.

[5] 高昕媛, 徐倩, 匡洪宇.《糖尿病相关眼病防治多学科中国专家共识》(2021 年版)解读. 临床内科杂志, 2022,39(5):306-309.

[6] Chong DD, Das N, Singh RP. Diabetic retinopathy: Screening, prevention, and treatment. Cleve Clin J Med, 2024,91(8):503-510.

[7] 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. 实用医学杂志, 2025, 41(4):575-579.

[8] 刘昕舒, 史灿灿, 于晴, 等. 基于 UWF-SS-OCTA 构建糖尿病视网膜病变的临床预测模型. 国际眼科杂志, 2025,25(6):999-1004.

[9] Wang XN, Li ST, Cai X, et al. Imaging artifacts and quality evaluation with ultrawide-field swept-source OCTA in diabetic retinopathy. Curr Eye Res, 2024,49(4):410-416.

[10] 崔迎欣, 韩月圣, 张乘瑞, 等. 基于 OCTA 技术观察不同严重程度 DR 患者的临床特征. 中南医学科学杂志, 2025, 53(5):867-870,882.

[11] 杨雄一, 易果果, 陈艳霞, 等. 应用 OCTA 观察糖尿病视网膜病变的微血管变化. 国际眼科杂志, 2025,25(2):179-190.

[12] Yang QH, Teo KYC, Hong YH, et al. Flow and ischemic changes in retina and choroid across diabetic retinopathy spectrum: a SS-OCTA study. Eye, 2025,39(8):1631-1640.

[13] 陶道典, 周代英, 包菁. 糖尿病患者视网膜高反射点与血清学指标的相关性. 中华眼视光学与视觉科学杂志(中英文), 2025, 27(3):201-206.

[14] 凌悦, 金燕. 血糖控制对无视网膜病变的 2 型糖尿病患者黄斑区血流的影响. 中国实验诊断学, 2025,29(12):1395-1401.

[15] Li N, Chen JL, Sun YJ, et al. Berberine attenuates the expression of NLRP3 and downstream inflammasome effectors in diabetic retinopathy. J Nat Med, 2025,79(5):1091-1105.

[16] Ouyang PW, Wu YN, Gu SS, et al. Procyanidin B2 attenuates microvascular dysfunction in diabetic retinopathy via inhibition of caspase-1/GSDMD mediated pyroptosis. J Ethnopharmacol, 2025, 344(3):119528-119533.

[17] 李彬彬, 李少君, 陈贵尚, 等. 银杏素对糖尿病视网膜病变大鼠视网膜病变及 NLRP3/caspase-1/GSDMD 焦亡通路的影响. 中国老年学杂志, 2024,44(20):5054-5058.

[18] Li YH, El Habib Daho M, Conze PH, et al. Hybrid fusion of high-resolution and ultra-widefield OCTA acquisitions for the automatic diagnosis of diabetic retinopathy. Diagnostics (Basel), 2023, 13(17):2770.

[19] Abtahi M, Le D, Ebrahimi B, et al. Differential capillary and large vessel analysis improves OCTA classification of diabetic retinopathy. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2024,65(10):20-26.

[20] 曾少杰, 谢怀林, 张昀昀. OCTA 评估黄斑中心凹无血管区参数对早期糖尿病视网膜病变的诊断价值. 国际眼科杂志, 2024, 24(9):1471-1475.