

基于 UWF-SS-OCTA 构建糖尿病视网膜病变的临床预测模型

刘昕舒^{1,2}, 史灿灿¹, 于 晴², 陈舒文¹, 赵颖奕¹, 王 贺², 李明新²

引用: 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.

基金项目: 江苏省中医药科技发展计划项目 (No.QN202330)
作者单位: ¹(221004) 中国江苏省徐州市, 徐州医科大学研究生院; ²(221002) 中国江苏省徐州市, 徐州医科大学附属医院眼科
作者简介: 刘昕舒, 在读硕士研究生, 研究方向: 眼表、眼底疾病。
通讯作者: 李明新, 毕业于北京大学, 博士, 主任医师, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 眼外伤、眼底疾病. lmx216@vip.sina.com
收稿日期: 2024-11-19 修回日期: 2025-04-23

摘要
目的: 基于超广域扫频源光学相干断层扫描血管成像 (UWF-SS-OCTA) 技术探讨糖尿病视网膜病变 (DR) 有关的危险因素, 并建立临床预测模型。
方法: 选取 2024 年 7 月至 2024 年 11 月于徐州医科大学附属医院就诊的 2 型糖尿病患者共 235 例 235 眼作为研究对象, 根据是否合并 DR 分为无 DR 组 (NDR 组) 120 例 120 眼和非增殖型 DR 组 (NPDR 组) 115 例 115 眼。收集两组患者的一般项目及实验室检查、OCTA 等数据, 通过单因素分析筛选出 DR 相关危险因素, 并对相关危险因素进行 Logistic 回归分析, 建立 DR 预测模型, 并采用 ROC 曲线、校准曲线、DCA 曲线评价模型的效能。
结果: 糖尿病病程、空腹血糖、血尿素氮 (BUN)、高血压病史、脉络膜血管指数 (CVI) 在模型中均有差异 (均 $P < 0.05$), 其中糖尿病病程、空腹血糖、BUN、高血压病史均为影响糖尿病患者发生 DR 的危险因素, CVI 为影响糖尿病患者发生 DR 的保护因素。模型预测 DR 发生概率的曲线下面积为 0.898 (0.859-0.938), 诊断阈值为 0.438, 对应灵敏度为 87.8%、特异度为 78.3%, 说明该模型预测 DR 发生的价值较高。
结论: 糖尿病病程、空腹血糖、BUN、高血压病史、CVI 与 DR 显著相关, 由此建立的预测模型对 DR 有一定的筛查作用。
关键词: 糖尿病视网膜病变; 超广域扫频源光学相干断层扫描血管成像 (UWF-SS-OCTA); 预测模型; 脉络膜血管指数; 脉络膜
DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2025.6.23

Clinical prediction model for diabetic retinopathy based on ultra - widefield swept - source optical coherence tomography angiography
Liu Xinshu^{1,2}, Shi Cancan¹, Yu Qing², Chen Shuwen¹, Zhao Yingyi¹, Wang He², Li Mingxin²

Foundation item: Jiangsu Traditional Chinese Medicine Science and Technology Development Program Project (No.QN202330)
¹Graduate School, Xuzhou Medical University, Xuzhou 221004, Jiangsu Province, China; ²Department of Ophthalmology, the Affiliated Hospital of Xuzhou Medical University, Xuzhou 221002, Jiangsu Province, China
Correspondence to: Li Mingxin. Department of Ophthalmology, the Affiliated Hospital of Xuzhou Medical University, Xuzhou 221002, Jiangsu Province, China. lmx216@vip.sina.com
Received: 2024-11-19 Accepted: 2025-04-23

Abstract
• **AIM:** To explore the risk factors associated with diabetic retinopathy (DR) based on ultra-widefield swept-source optical coherence tomography angiography (UWF-SS-OCTA), and to establish a clinical prediction model.
• **METHODS:** A total of 235 patients (235 eyes) with type 2 diabetes mellitus who were treated in the Affiliated Hospital of Xuzhou Medical University from July to November 2024 were selected as the research objects. According to the presence or absence of DR, they were divided into 120 cases (120 eyes) in non-DR group (NDR group) and 115 cases (115 eyes) in non-proliferative DR group (NPDR group). Data on general characteristics, laboratory tests, and OCTA results were collected for both groups. Univariate analysis was employed to identify DR-related risk factors. Logistic regression analysis was conducted to analyze these risk factors and to establish a DR prediction model. The efficacy of the model was evaluated using the receiver operating characteristic (ROC) curve, calibration curve, and decision curve analysis (DCA).
• **RESULTS:** The duration of diabetes, fasting blood glucose, blood urea nitrogen (BUN), history of hypertension, and the choroidal vascular index (CVI) were found to be statistically significant in the model (all $P < 0.05$). Specifically, the duration of diabetes, fasting blood glucose, BUN, and history of hypertension were identified as risk factors for DR among diabetic patients, while CVI was recognized as a protective factor. The area under the curve for the model predicting the probability of

DR was 0.898 (0.859–0.938), with a diagnostic threshold of 0.438. The corresponding sensitivity and specificity were 87.8% and 78.3%, respectively, indicating that the model possesses high predictive value for the occurrence of DR.

• **CONCLUSION:** The duration of diabetes, fasting blood glucose, BUN, history of hypertension, and CVI are significantly correlated with DR. The established prediction model demonstrates a substantial screening capability for DR.

• **KEYWORDS:** diabetic retinopathy; ultra - widefield swept-source optical coherence tomography angiography (UWF-SS-OCTA); prediction model; choroidal vascular index; choroid

Citation: Liu XS, Shi CC, Yu Q, et al. Clinical prediction model for diabetic retinopathy based on ultra - widefield swept - source optical coherence tomography angiography. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2025,25(6):999–1004.

0 引言

糖尿病视网膜病变 (diabetic retinopathy, DR) 是糖尿病 (diabetes mellitus, DM) 最为常见的并发症之一^[1], 并且已经成为全球成年人失明的主要因素之一^[2]。DR 可以分为非增殖型糖尿病视网膜病变 (non - proliferative diabetic retinopathy, NPDR) 与增殖型糖尿病视网膜病变 (proliferative diabetic retinopathy, PDR) 两期^[3-4]。晚期 DR 引起的视力丧失会严重影响患者生活质量。研究显示, 早期关注 DR 的危险因素、通过眼底筛查尽早发现视网膜的异常, 可有效预防或延缓 DR 进展^[5-6]。

扫频源光学相干断层扫描血管成像技术 (swept - source optical coherence tomography angiography, SS-OCTA) 作为一种新型眼底检查技术, 能够在无需使用静脉注射造影剂的前提下, 快速获取眼底血流信号, 并且对视网膜、脉络膜各层间进行量化分析, 在眼科疾病诊断中发挥着重要作用^[7-8]。研究表明, 视网膜深层毛细血管的血流密度、FAZ 面积与 DR 的进展显著相关^[9], 可作为 DR 发生的预测指标。即使在眼底无糖尿病视网膜病变 (non - diabetic retinopathy, NDR) 的糖尿病患者中, OCTA 仍可观察到视网膜浅层及深层毛细血管血流密度的降低, 这说明在 DR 临床前期已存在眼底微血管的改变^[10-11]。近年来, 已有研究提出 OCTA 可以作为预测 DR 发展的影像学标志物^[12]。传统 OCTA 因为扫描范围较小, 无法检测周边视网膜脉络膜微血管的变化, 因此目前国内外很少有研究早期 DR 与超广域 SS-OCTA (ultra - widefield swept - source optical coherence tomography angiography, UWF-SS-OCTA) 血流参数关系的研究。UWF-SS-OCTA 具有扫描范围广、穿透深度深的特点, 可以直接对脉络膜毛细血管及中大血管密度、脉络膜血管指数 (choroidal vascular index, CVI) 等指标进行量化。随着 24 mm×20 mm UWF-SS-OCTA 技术的引入, 对 DR 的管理可能会迎来新的转折点^[13]。临床预测模型是一个基于患者临床症状、体征等已知信息来推断其未知疾病状况的工具。本次研究拟构建一个基于 UWF-SS-OCTA 的 DR 临床预测模型, 筛查与 DR 相关的危险因素, 为早期 DR 的筛查工作提供临床依据。

1 对象和方法

1.1 对象 选取 2024 年 7 月至 2024 年 11 月于徐州医科大学附属医院就诊的 2 型糖尿病患者共 235 例 235 眼作

为研究对象, 收集研究对象的一般项目及实验室检查、眼科检查、OCTA 数据。根据患者是否合并 DR 分为无 DR (NDR 组) 120 例 120 眼与非增殖型 DR (NPDR 组) 115 例 115 眼。NPDR 诊断标准: (1) 诊断为 2 型糖尿病; (2) 散瞳后行眼底镜检查、扫描激光眼底照相、荧光素眼底血管造影检查, 符合 2014 年中华医学会眼科学分会眼底病学组^[14]提出的 NPDR 分期方法。纳入标准: (1) 符合 2 型糖尿病或 (和) NPDR 的诊断标准; (2) 视网膜各层结构清晰; (3) 年龄 18–70 岁。排除标准: (1) 增殖型糖尿病视网膜病变 (PDR); (2) 角膜、晶状体等屈光介质混浊严重影响眼底检查者; (3) 患有其他视网膜疾病者, 如视网膜静脉阻塞、视网膜动脉阻塞、高血压视网膜病变者; (4) 曾行视网膜激光光凝或抗 VEGF 术治疗、内眼手术者 (白内障手术除外); (5) OCT 显示视网膜明显水肿、黄斑水肿、黄斑前膜、视网膜脱离者; (6) 患有严重的全身性疾病, 如严重的心血管、肿瘤或中风者; (7) 无法理解或配合相关检查者; (8) 成像质量差, OCTA 图像评分 < 8 分者。本研究通过徐州医科大学附属医院伦理委员会批准 (批准号: XYFY2024-KL299-01), 所有参与者均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 一般项目及实验室检查 参与者签署知情同意书后, 采集患者基本信息。采集内容包括性别、年龄、糖尿病病程、高血压病史等一般情况。采集患者清晨静脉血, 检测实验室项目: 空腹血糖 (fasting plasma glucose, FPG)、糖化血红蛋白 (glycated hemoglobin, HbA1c)、甘油三酯 (triglyceride, TG)、总胆固醇 (total cholesterol, TC)、低密度脂蛋白 (low-density lipoprotein, LDL)、高密度脂蛋白 (high-density lipoprotein, HDL)、血尿素氮 (blood urea nitrogen, BUN)、血清肌酐 (serum creatinine, SCr) 等一般资料。

1.2.2 眼科检查 检查患者的裸眼及最佳矫正视力、眼压、裂隙灯检查眼前节、眼底镜检查、眼底照相等相关眼科检查。所有的眼科检查均由同一位有经验的眼科医生进行。

1.2.3 OCTA 检查 采用型号为 BM Lite 的 UWF-SS-OCTA, 该设备实际扫描速度: 400 000 Ascan/s, 波长 1 060 nm, 单次血流成像最大范围: 24 mm×20 mm, 血流成像分辨率: 1536×1280, 单张血流采集点数 1 966 080 个。

使用 0.5 % 复方托吡卡胺滴眼液充分散瞳后, 选择该设备的 OCTA 模式, 成像范围为: 24 mm×20 mm, 对所有患者进行扫描。检查前告知患者注意事项, 嘱患者注视固视目标即绿色“十”字标记, 告知患者尽量不眨眼、不转动眼睛。检查过程中医师缓慢推进扫描镜头, 调整镜头使瞳孔位置位于影像中央, 根据患者屈光状态进行对焦, 使显示屏上呈现清晰的眼底图像, 摄取清晰且连续的图像并保存。图像评分 > 8 分者被予以采纳。所有患者均行双眼检查 (每例患者选择符合纳排标准的患眼入组, 若双眼均可入组, 则选择右眼入组)。扫描结束后, 检查医师嘱患者闭上双眼休息。由两位眼科医师进行阅片, 获得的 OCTA 图像自动分割成: 浅层视网膜血管层 (superficial capillary plexus, SCP)、深层视网膜血管层 (deep capillary plexus, DCP)、脉络膜毛细血管层 (choroidal capillary, CC)、脉络膜中大血管层 (medium and large choroidal vessels, MLCV) 共 4 个层面。其中, SCP 定义为内界膜-内丛状层的视网膜, 其厚度为浅层视网膜厚度 (superficial retinal thickness, SRT); DCP 定义为内丛状层-外丛状层的视网膜, 其厚度为深层视网膜厚度 (deep retinal thickness, DRT); CC 定义为 Bruch 膜-Bruch 膜下 29 μm 的脉络膜; MLCV 定义为

Bruch 膜下 29 μm-脉络膜巩膜交界层的脉络膜。观察指标包括 SCP、DCP、CC、MLCV 的血流密度、SRT、DRT、脉络膜厚度 (choroidal thickness, CT) 及 CVI。其中,CT 为 CC 和 MLCV 层的总厚度。血流密度的定义为单位面积内血管面积与单位面积的比值。CVI 的定义为脉络膜中大血管体积与脉络膜总体积的比值。

统计学分析:采用 SPSS 26.0 和 R 4.1.2 对数据进行统计分析。计量资料采用 Shapiro-Wilk 进行正态性检验,符合正态分布的均采用均数±标准差 ($\bar{x}\pm s$) 表示,组间比较采用独立样本 *t* 检验。不符合正态分布的资料均采用中位数(四分位数)表示,组间比较采用 Mann-Whitney *U* 检验。计数资料均采用 *n*(%) 表示,组间比较采用 χ^2 检验。采用 Logistic 回归分析影响糖尿病患者发生 DR 的相关因素,并建立预测 NPDR 的模型,绘制诺莫图,采用 Bootstrap 抽样 1 000 次对模型进行内部验证,Hosmer-Lemeshow 检验对模型的拟合优度进行检验。采用 ROC 曲线、校准曲线、DCA 曲线评价模型的效能。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 NDR 组与 NPDR 组患者临床资料比较

表 1 两组间临床资料比较

临床资料	NDR 组(<i>n</i> = 120)	NPDR 组(<i>n</i> = 115)	<i>t</i> / <i>Z</i> / χ^2	<i>P</i>
性别(例,%)			0.001	0.995
男	47(39.2)	45(39.1)		
女	73(60.8)	70(60.9)		
年龄($\bar{x}\pm s$,岁)	57.38±8.73	56.31±7.16	1.022	0.308
糖尿病病程($\bar{x}\pm s$,a)	8.63±3.78	11.79±3.27	6.872	<0.001
HbA1c[<i>M</i> (<i>P</i> ₂₅ , <i>P</i> ₇₅),%]	8.72(7.79,9.73)	8.58(7.63,9.64)	-0.603	0.547
空腹血糖[<i>M</i> (<i>P</i> ₂₅ , <i>P</i> ₇₅),mmol/L]	9.06(7.51,11.2)	9.98(7.72,12.99)	-2.484	0.013
TG[<i>M</i> (<i>P</i> ₂₅ , <i>P</i> ₇₅),mmol/L]	1.68(1.39,2.04)	1.69(1.35,2.05)	-0.348	0.728
TC[<i>M</i> (<i>P</i> ₂₅ , <i>P</i> ₇₅),mmol/L]	4.67(4.31,5.04)	4.72(4.19,5.29)	-0.529	0.597
LDL-C($\bar{x}\pm s$,mmol/L)	2.97±0.55	3.03±0.58	0.907	0.365
HDL-C($\bar{x}\pm s$,mmol/L)	1.33±0.28	1.29±0.19	1.460	0.146
BUN($\bar{x}\pm s$,mmol/L)	6.84±0.88	8.37±1.99	7.556	<0.001
高血压病史(例,%)	45(37.5)	68(59.1)	11.006	0.001
SCr[<i>M</i> (<i>P</i> ₂₅ , <i>P</i> ₇₅),μmol/L]	66.69(62.75,73.73)	68.5(61.74,75.48)	-0.308	0.758
SCP($\bar{x}\pm s$,%)	33.61±3.63	33.64±4.45	0.055	0.956
DCP($\bar{x}\pm s$,%)	36.04±3.08	35.57±3.09	1.186	0.237
CC($\bar{x}\pm s$,%)	47.32±2.43	47.36±1.99	0.137	0.891
MLCV($\bar{x}\pm s$,%)	55.58±2.50	54.08±4.28	3.273	0.001
CVI($\bar{x}\pm s$,%)	38.51±2.01	36.47±2.22	7.420	<0.001
SRT($\bar{x}\pm s$,μm)	75.35±7.20	76.41±6.72	1.164	0.245
DRT($\bar{x}\pm s$,μm)	176.35±6.20	175.97±6.98	0.441	0.659
CT($\bar{x}\pm s$,μm)	194.34±43.87	212.45±50.55	2.936	0.004

表 2 影响糖尿病患者发生 DR 的多因素 Logistic 回归

因素	<i>B</i>	<i>SE</i>	Wald χ^2	<i>P</i>	<i>OR</i> (95% <i>CI</i>)
糖尿病病程	0.263	0.056	22.270	<0.001	1.301(1.166-1.451)
空腹血糖	0.212	0.075	7.949	0.005	1.237(1.067-1.433)
BUN	0.616	0.136	20.484	<0.001	1.852(1.418-2.419)
高血压病史	0.989	0.371	7.104	0.008	2.690(1.299-5.568)
CVI	-0.558	0.105	28.036	<0.001	0.572(0.466-0.704)
常量	10.995	3.906	7.926	0.005	-

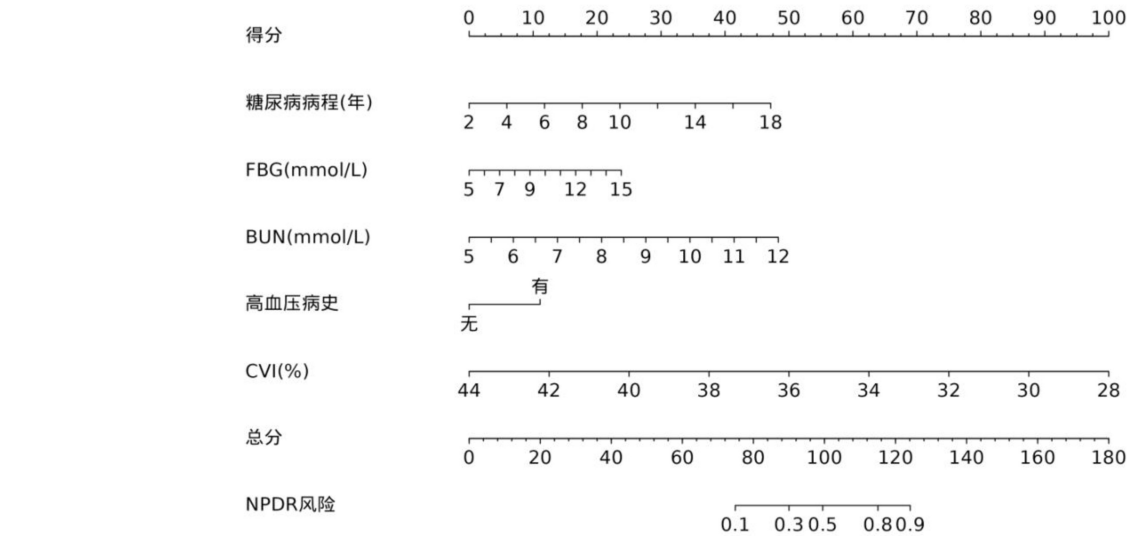


图1 预测DR的logistic回归Nomogram图。

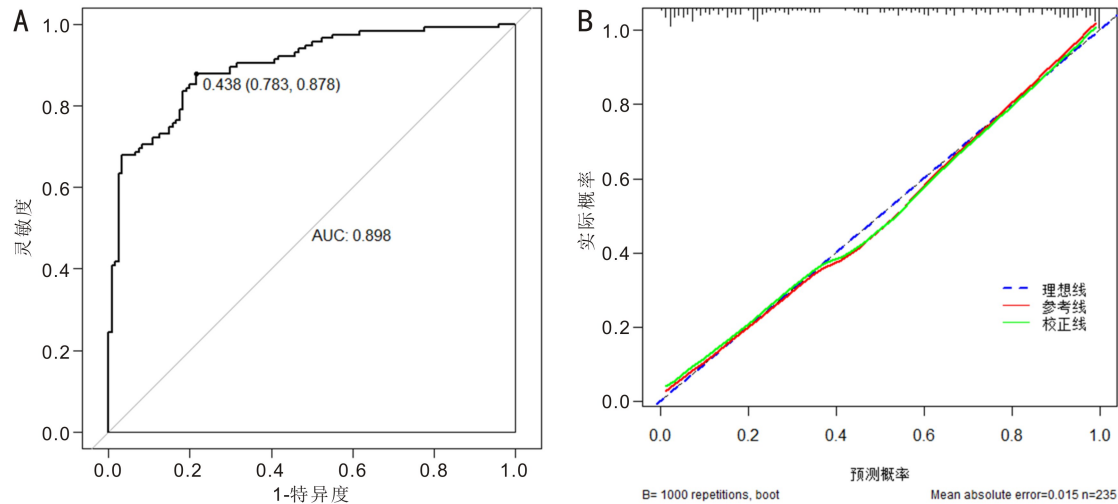


图2 DR预测模型的ROC曲线及校准曲线 A:ROC曲线;B:校准曲线。

2.3 预测模型的 ROC 曲线及校准曲线 模型的 ROC 曲线及校准曲线见图 2。按照已建立的 Logistic 回归模型计算联合概率,并绘制 ROC 曲线,DR 预测模型的曲线下面积为 0.898(0.859–0.938),诊断阈值为 0.438,对应灵敏度为 87.8%、特异度为 78.3%,说明该模型预测 DR 的价值较高。采用 Bootstrap 法重复抽样 1 000 次对模型的拟合优度进行检验,模型拟合优度检验 Hosmer–Lemeshow 结果显示, $\chi^2=4.700, P=0.789$,说明模型区分度较好。

2.4 预测模型的 DCA 曲线 模型的 DCA 曲线见图 3,该模型的 DCA 曲线可以看出,模型的预测效果较好。

3 讨论

近年来,DR 的患病率逐年提升。探查 DR 发生的危险因素,做到对 DR 早干预、早防治变得尤为重要。目前,有研究表明,高血糖刺激氧化应激反应加速^[15],导致视网膜细胞氧代谢异常,从而触发视网膜微血管的异常^[16]。视网膜依赖于视网膜与脉络膜血管系统的共同滋养,其中脉络膜负责供给外层视网膜、光感受器及色素上皮层^[17],视网膜循环支撑内层视网膜。因此,在糖尿病的早期阶段,往往更易出现脉络膜循环灌注的异常情况,这些变化随后影响到视网膜的氧代谢^[18]。

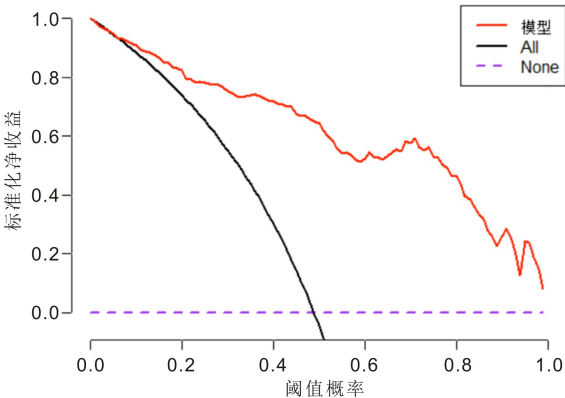


图3 模型的DCA曲线。

在一项应用超广角 OCTA 探讨 NDR 患者中、外周视网膜及脉络膜改变的研究中,Zhao 等^[19]发现 NDR 患者较正常对照组 MLCV 血流密度呈现降低趋势。同样,一项专门探究 NDR 患者脉络膜变化的研究发现,在 24 mm×20 mm 范围内,患者的 MLCV 血流密度较正常对照组出现显著下降,同时发现 CC 血流密度在两组间并未出现显著差异^[20]。以上两组研究都是探究了 NDR 组与正常对照

组之间脉络膜 MLCV 的血流变化,并且得出了一致的结果,即在未发现 DR 眼底改变的糖尿病患者中,MLCV 血流密度已出现具有统计学意义的下降。在本研究中,NPDR 组的 MLCV 血流密度显著低于 NDR 组,而 CC 血流密度在两组间未见显著差异,因此我们推测,在 DR 早期,当 CC 血流密度未发生明显改变时,MLCV 血流密度已显著降低。提示早期 DR 患者存在脉络膜病变,且脉络膜中大血管层血流降低先于毛细血管层。

齐志昊^[21]的研究表明,NDR 组和 NPDR 组患者 CC 层血流密度无明显统计学差异,这与我们的研究结果一致。然而,一项基于 OCTA 扫描范围为 6 mm×6 mm 定量分析糖尿病患者黄斑区 SCP、DCP、CC 血流密度变化情况的研究显示,DR 组 SCP、DCP、CC 的血流密度较 NDR 组均降低^[22]。Wang 等^[23]也发现,黄斑区 CC 灌注量可以作为评估 DR 严重程度的生物标记物。故脉络膜血流循环障碍可能参与了 DR 的发病机制,但 CC 血流密度在 DR 疾病进展中的作用仍存在争议,不同的结果可能与 OCTA 扫描范围不同、样本量不同、患者 DR 分期不同等因素有关,今后我们将细化扫描范围、扩大样本量,对此问题进行更深入地研究。

Jing 等^[24]在研究 DR 不同分期的 CT 变化时,发现相较于 NDR 和 PDR 组,NPDR 的 CT 更厚($P=0.014$),这与我们的研究结果大致相同。Kim 等^[25]的研究得出相似的结果,将 NDR 与 NPDR、PDR 组 CT 作对比,发现 NPDR 组的 CT 较 NDR 组增加,后随着 DR 的进展,CT 呈减少趋势。Muir 等^[26]的动物模型显示,脉络膜血流缺失可能是 DR 早期的病理变化。故 Kim 等^[25]推测早期 DR 脉络膜增厚的原因是脉络膜基质的增厚,血管成分并不参与其中。然而,Kim 等^[27]却得出了不同的结论,随着 DR 的进展,CT 呈持续增加的趋势,他们推测,视网膜缺氧可能导致了血管内皮细胞因子(如 VEGF)等细胞因子的增加,进而促使脉络膜血流量增大以及血管扩张,最终导致了脉络膜血管层的增厚。但 Lafins 等^[28]的研究指出,随着 DR 进展,CT 显著降低,这可能与脉络膜血管萎缩及血流量减少有关。综上表明,CT 似乎不是预测 DR 发展的稳定参数。脉络膜具有内在的动态变化,不同的检查时间、输注甘露醇、服用咖啡等因素都可以影响脉络膜厚度变化^[29],这可能是导致在多个研究中得到不同结果的原因。

CVI 定义为脉络膜中大血管体积与脉络膜总体积的比值,能够更准确地反映脉络膜中血管或间质成分在病理状态下的相对变化^[30]。CT 的增加可能源于脉管系统、基质组织或两者的共同增加,单纯测量 CT 并不能明确脉络膜厚度的改变是由于脉络膜血管或是间质的变化所导致的^[30-31]。相较于 CT,CVI 受生理因素影响较小,因此 CVI 被认为是评估脉络膜血管更稳定、可靠的标志^[25]。以前的研究大多依赖手动测量 OCT 获取的脉络膜横截面,以获取 CVI 等相关参数,但在我们的研究中,通过 UWF-SS-OCTA 机器自动获取脉络膜中大血管体积和脉络膜总体积以计算 CVI 值。本研究发现 NPDR 组 CVI 显著低于 NDR 组,CVI 为影响糖尿病患者发生 DR 的保护因素,即 CVI 值越高,糖尿病患者眼底患 DR 的风险就越低。土耳其的 Keskin 等^[32]得出了相似的结论,与健康对照组相比,

DR 组的 CVI 较低,CVI 可被视为 DR 发病的早期敏感生物标志物,他们的研究首次确定了能够预测 DR 发展且具有临床意义的 CVI 临界值,故临床医生可以通过 CVI 值,更全面地评估患者发生 DR 的概率,并及时给予干预。Jing 等^[24]分析了 DR 不同分期的 CVI 与最佳矫正视力(BCVA)的相关性,发现 CVI 与 BCVA 呈正相关,且 CVI 随 DR 病程延长而降低,这提示 CVI 可能是监测 DR 进展的可靠影像学生物标志物。

既往有研究指出,SCP(去除大血管)和 DCP 是 DR 发病的独立危险因素^[26]。SCP、DCP 的血流密度随着 DR 的进展而减少。张煜等^[16]研究也发现,NDR 患者的视网膜浅层、深层血流灌注均出现不同程度的下降,且视网膜血流变化集中在深层血管复合体。同样,谭心格等^[22]在研究 DR 患者黄斑区视网膜脉络膜血流密度变化中发现,DCP 识别 DR 严重程度的能力优于 SCP 和 CC,这可能与视网膜深层毛细血管对缺氧更加敏感有关。然而,我们的研究显示 NDR 组和 NPDR 组的 SCP、DCP 血流密度在 24 mm×20 mm 范围内并无明显统计学差异。出现不同结果可能与样本量不足、OCTA 检测仪器不同、扫描范围不同等原因所致,今后将扩大样本量,细化扫描范围,进行更深入地研究。本研究中两组间 SRT、DRT 未发现明显差异,这与齐志昊^[21]的研究结果相似。推测与早期 DR 发生时,外层脉络膜会代偿血供,导致厚度变化较晚所致。

较长的糖尿病病程、高血压病史是目前公认的糖尿病患者并发 DR 的最主要的危险因素^[33],我们的研究结果与之相吻合。在临床上,空腹血糖是临床上评估患者血糖控制情况最直接、最常用的指标,HbA1c 的表达水平能有效反映糖尿病患者近 3 mo 的血糖控制情况^[34],我们的研究结果显示,空腹血糖升高是糖尿病患者发生 DR 的危险因素,这与赖丽平等^[35]的结论相似。空腹血糖水平受患者饮食、运动及降糖药物等情况的影响,而我们的研究仅采用患者随机 1 d 的空腹血糖进行分析,存在一定的选择偏倚,故所得结论还需要今后更多研究进行论证。已有研究指出,肾功能下降是 DR 发生的危险因素^[36],我们的研究指出 BUN 的升高为 DR 发生的危险因素,这与赵颖等^[37]的研究结果相似。BUN 的上升代表了肾功能指标的异常,故在临床上,对于肾功能指标异常的患者,应该尽早进行眼底检查,并进行随访。

杨雄一等^[38]构建的 DR 临床预测模型通过引入 6 mm×6 mm OCTA 扫描范围内的外层血管密度,显著提升了模型的有效性。本研究同样聚焦 DR 患者的 OCTA 指标,在更广的扫描范围内,发现了 DR 患者脉络膜血管指数的显著改变,结合与 DR 相关的影响因素,构建 DR 临床预测模型,对 DR 的发生具有一定的预测价值,并通过校准曲线和 DCA 曲线验证了其良好的预测准确性及显著的临床使用价值。本研究的局限性在于:(1)作为一项单中心研究、样本量过小、尚未进行外部验证,未来希望通过多中心合作、扩大样本量以进一步验证模型表现;(2)研究属于横断面研究,未能研究出 DR 与眼底微血管改变的因果关系;(3)未细分轻、中、重度 NPDR 患者,未纳入 PDR 患者入组;(4)未细化 OCTA 扫描范围。望今后的研究中可以扩大样本量、进行多中心临床研究,并细化 OCTA 扫

描范围,以便对糖尿病患者的眼底微血管变化进行更详尽的分析。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。

作者贡献声明:刘昕舒论文选题与修改,初稿撰写,文献检索,数据分析;史灿灿、陈舒文、赵颖奕论文数据分析;于晴、王贺论文修改及审阅;李明新选题指导,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] Wolter JR. Diabetic retinopathy. *Am J Ophthalmol*, 1961, 51: 1123-1141.

[2] Resnikoff S, Pascolini D, Etya'ale D, et al. Global data on visual impairment in the year 2002. *Bull World Health Organ*, 2004, 82(11): 844-851.

[3] Wirkkala J, Kubin AM, Ohtonen P, et al. Outcomes of 35-year duration of type 1 diabetes and proliferative diabetic retinopathy on functional vision and quality of life: Benefits of good glycemic control. *J Diabetes Complications*, 2023, 37(2): 108408.

[4] 付梅, 陈长征, 蒋婧文, 等. 糖尿病视网膜病变分级与视网膜缺血的相关性分析. *中华眼底病杂志*, 2021, 37(10): 784-789.

[5] 陆锦昆, 潘海林, 苏宏业, 等. 瑞舒伐他汀联合依帕司他治疗2型糖尿病早期视网膜病变的疗效及对血清 IGF-1、BNP、HbA1c 水平的影响. *中国老年学杂志*, 2018, 38(9): 2087-2089.

[6] 支雪涵, 刘海伟. 《2023年欧洲心脏病学会糖尿病和心血管疾病管理指南》更新解读. *临床军医杂志*, 2023, 51(10): 1000-1002.

[7] Spaide RF, Fujimoto JG, Waheed NK, et al. Optical coherence tomography angiography. *Prog Retin Eye Res*, 2018, 64: 1-55.

[8] Jia YL, Bailey ST, Hwang TS, et al. Quantitative optical coherence tomography angiography of vascular abnormalities in the living human eye. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2015, 112(18): E2395-E2402.

[9] Sun ZH, Tang FY, Wong R, et al. OCT angiography metrics predict progression of diabetic retinopathy and development of diabetic macular edema: a prospective study. *Ophthalmology*, 2019, 126 (12): 1675-1684.

[10] de Carlo TE, Chin AT, Bonini Filho MA, et al. Detection of microvascular changes in eyes of patients with diabetes but not clinical diabetic retinopathy using optical coherence tomography angiography. *Retina*, 2015, 35(11): 2364-2370.

[11] Dimitrova G, Chihara E, Takahashi H, et al. Quantitative retinal optical coherence tomography angiography in patients with diabetes without diabetic retinopathy. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2017, 58(1): 190-196.

[12] Yuan M, Wang W, Kang SM, et al. Peripapillary microvasculature predicts the incidence and development of diabetic retinopathy: an SS-OCTA study. *Am J Ophthalmol*, 2022, 243: 19-27.

[13] 董文韬, 刘三梅, 李杰, 等. 增生早期糖尿病视网膜病变患者视网膜及视盘新生血管的超广角 OCTA 与 FFA 检测结果对比分析. *眼科新进展*, 2023, 43(4): 294-297.

[14] 中华医学会眼科学会眼底病学组. 我国糖尿病视网膜病变临床诊疗指南(2014年). *中华眼科杂志*, 2014, 50(11): 851-865.

[15] 刘秋平, 刘昭麟, 李晶明. 糖尿病视网膜病变发病机制及潜在治疗靶点研究最新进展. *眼科新进展*, 2024, 44(10): 757-768.

[16] 张煜, 庞淑度, 雷艳芸, 等. 应用光学相干断层扫描研究1型糖尿病患者视网膜及脉络膜的血流变化. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2024, 26(1): 30-37.

[17] Hamadneh T, Aftab S, Sherali N, et al. Choroidal changes in diabetic patients with different stages of diabetic retinopathy. *Cureus*, 2020, 12(10): e10871.

[18] Liu WZ, Wang SJ, Soetikno B, et al. Increased retinal oxygen metabolism precedes microvascular alterations in type 1 diabetic mice. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2017, 58(2): 981-989.

[19] Zhao Q, Wang CT, Meng LH, et al. Central and peripheral changes in the retina and choroid in patients with diabetes mellitus without clinical diabetic retinopathy assessed by ultra-wide-field optical coherence tomography angiography. *Front Public Health*, 2023, 11: 1194320.

[20] Deng XW, Li ZJ, Li ZP, et al. Changes in the choroid detected by ultrawide-field optical coherence tomography angiography in type 2 diabetes mellitus patients without diabetic retinopathy. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2023, 44: 103823.

[21] 齐志昊. 早期糖尿病视网膜病患者视网膜及脉络膜超广角 SS-OCTA 特征分析. 山东大学, 2023.

[22] 谭心格, 高自清. 基于 OCTA 观察眼底不同分期的2型糖尿病患者黄斑区脉络膜及视网膜血流密度变化. *眼科新进展*, 2023, 43(3): 230-233.

[23] Wang W, Guo X, Chen YF, et al. Choriocapillaris perfusion assessed using swept source optical coherence tomographic angiography and the severity of diabetic retinopathy. *Br J Ophthalmol*, 2023, 107(6): 836-841.

[24] Jing RX, Sun XB, Cheng JM, et al. Vascular changes of the choroid and their correlations with visual acuity in diabetic retinopathy. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2024, 15: 1327325.

[25] Kim M, Ha MJ, Choi SY, et al. Choroidal vascularity index in type-2 diabetes analyzed by swept-source optical coherence tomography. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 70.

[26] Muir ER, Rentería RC, Duong TQ. Reduced ocular blood flow as an early indicator of diabetic retinopathy in a mouse model of diabetes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2012, 53(10): 6488-6494.

[27] Kim JT, Lee DH, Joe SG, et al. Changes in choroidal thickness in relation to the severity of retinopathy and macular edema in type 2 diabetic patients. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2013, 54(5): 3378-3384.

[28] Láíns I, Talcott KE, Santos AR, et al. Choroidal thickness in diabetic retinopathy assessed with swept-source optical coherence tomography. *Retina*, 2018, 38(1): 173-182.

[29] 杨柳森. 脉络膜厚度对早期糖尿病性视网膜病变进展提示价值的研究. 山西医科大学, 2022.

[30] 沙艳会, 李爽, 王薇, 等. 关于糖尿病视网膜病变患者脉络膜血管指数的初步研究. *国际眼科杂志*, 2020, 20(9): 1587-1593.

[31] Tan KA, Laude A, Yip V, et al. Choroidal vascularity index—a novel optical coherence tomography parameter for disease monitoring in diabetes mellitus? *Acta Ophthalmol*, 2016, 94(7): e612-e616.

[32] Keskin Ç, Dilekçi EN, Üçgül AY, et al. Choroidal vascularity index as a predictor for the development of retinopathy in diabetic patients. *J Endocrinol Invest*, 2024, 47(5): 1175-1180.

[33] Ivanescu A, Popescu S, Ivanescu R, et al. Predictors of diabetic retinopathy in type 2 diabetes: a cross-sectional study. *Biomedicines*, 2024, 12(8): 1889.

[34] 唐婷, 赵勋, 李金萍. 糖尿病性视网膜病患者空腹血糖、糖化血红蛋白及血清 C 肽水平与眼底病变严重程度的相关性分析. *糖尿病新世界*, 2023, 26(9): 173-177.

[35] 赖丽平, 刘贺, 黄锡岚, 等. 2型糖尿病患者的糖尿病视网膜病变患病率及危险因素. *广西医学*, 2022, 44(4): 370-375.

[36] 赵庆芳, 魏会宇, 胡丽影. 2型糖尿病患者糖尿病视网膜病变程度与肾功能指标的相关性. *眼科新进展*, 2018, 38(5): 471-474.

[37] 赵颖, 刘大川. 糖尿病视网膜病变进展的影响因素. *国际眼科杂志*, 2024, 24(6): 943-949.

[38] 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.