

# UWFSS-OCTA 检测糖尿病视网膜病变微循环的变化

赵娟<sup>1</sup>, 焦万珍<sup>2</sup>, 赵博军<sup>2</sup>

1. 山东第一医科大学第二附属医院 眼科, 山东 泰安 271000

2. 山东第一医科大学附属省立医院 眼科, 山东 济南 250021

**摘要:**目的 应用超广角扫频源光学相干断层扫描血管成像(ultra-widefield swept-source optical coherence tomography angiography, UWFSS-OCTA)研究不同程度的糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)视网膜和脉络膜血流密度的变化。方法 横断面研究。观察山东省立医院共 159 例患者微循环变化情况。根据 DR 的分期,将患者分为糖尿病无视网膜病变(no diabetic retinopathy, NDR)组 69 眼,非增殖期糖尿病视网膜病变(non-proliferative diabetic retinopathy, NPDR)组 54 眼,增殖期糖尿病视网膜病变(proliferative diabetic retinopathy, PDR)组 72 眼,年龄相匹配的 68 只健康眼作为对照。使用 UWFSS-OCTA 在 26 mm×21 mm 范围内扫描眼底图像,以黄斑为中心分为 1~6 mm、6~15 mm、15~21 mm 的同心环(分上、下、鼻、颞),分别测量视网膜浅层毛细血管网(superficial capillary plexus, SCP)、视网膜深层毛细血管网(deep capillary plexus, DCP),脉络膜厚度(choroidal thickness, CT)、脉络膜灌注面积(choroidal perfusion area, CPA)。分析视网膜血管密度、最佳矫正视力(BCVA;以 LogMAR 表示)及糖尿病病程的关系。结果 与其他组相比,PDR 组的 SCP 和 DCP 降低,NPDR 组部分区域低于对照组。PDR 及 NPDR 组在部分区域 CT 低于对照组,PDR 组在部分区域低于对照组及 NDR 组。脉络膜血流分析显示,PDR 组在多区域 CPA 低于其他组。糖尿病病程与 DCP 部分区域负相关,与 BCVA(LogMAR)正相关。结论 UWFSS-OCTA 能够清晰展示糖尿病视网膜病变不同阶段的微循环损伤,为临床诊断和个性化治疗提供了重要技术支持。

**关键词:**糖尿病视网膜病变;超广角扫频源光学相干断层扫描血管成像;视网膜血管;血流密度;脉络膜厚度

中图分类号:R774.1

文献标志码:A

文章编号:1673-3770(2026)02-0080-07

**引用格式:**赵娟,焦万珍,赵博军. UWFSS-OCTA 检测糖尿病视网膜病变微循环的变化[J]. 山东大学耳鼻喉眼学报,2026, 40(2):80-86. ZHAO Juan, JIAO Wanzhen, ZHAO Bojun. Assessment of fundus microcirculation changes in diabetic retinopathy using UWFSS-OCTA [J]. Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University, 2026, 40(2):80-86.

## Assessment of fundus microcirculation changes in diabetic retinopathy using UWFSS-OCTA

ZHAO Juan<sup>1</sup>, JIAO Wanzhen<sup>2</sup>, ZHAO Bojun<sup>2</sup>

1. Department of Ophthalmology, The Second Affiliated Hospital of Shandong First Medical University, Taian 271000, Shandong, China

2. Department of Ophthalmology, Shandong Provincial Hospital Affiliated to Shandong First Medical University, Jinan 250021, Shandong, China

**Abstract: Objective** To investigate changes in retinal and choroidal blood flow density in diabetic retinopathy (DR) of varying severity using ultra-widefield swept-source optical coherence tomography angiography (UWFSS-OCTA). **Methods** A total of 159 individuals (263 eyes) recruited from Shandong Provincial Hospital were included. Based on DR staging, patients were categorized into the non-diabetic retinopathy (NDR) group (69 eyes), non-proliferative diabetic retinopathy (NPDR) group (54 eyes), and proliferative diabetic retinopathy (PDR) group (72 eyes). Age-matched healthy controls comprised 68 eyes. Using UWFSS-OCTA to scan fundus images within a 26 mm×21 mm field, the macula was centered and divided into concentric rings of 1-6 mm, 6-15 mm, and 15-21 mm (upper, lower, nasal, and temporal). Measurements were taken for the superficial capillary plexus (SCP), deep capillary plexus (DCP), choroidal thickness (CT), and choroidal perfusion area (CPA). The relationship between retinal vascular density, best-corrected visual acuity (BCVA; expressed as LogMAR), and diabetes duration were analyzed. **Results** Compared with other groups, the PDR group exhibited reduced SCP and DCP, while the NPDR group showed lower values in certain regions relative to the control group. Both PDR and NPDR groups demonstrated lower CT values than the control group in some regions, with the PDR group also showing lower values than both the control and NDR groups in certain areas. Choroidal blood flow analysis revealed that the PDR group had lower CPA in multiple regions compared to other groups. Diabetes duration was negatively

收稿日期:2025-01-02

基金课题:山东省自然科学基金项目(ZR2019MH111)

通信作者:赵博军. E-mail:15168860708@163.com

correlated with DCP in some regions and positively correlated with BCVA (LogMAR). **Conclusion** UWFSS-OCTA clearly demonstrates microcirculatory damage at different stages of diabetic retinopathy, providing crucial technical support for clinical diagnosis and personalized treatment.

**Key words:** Diabetic retinopathy; UWFSS-OCTA; Retinal vessels; Blood flow density; Choroidal thickness

作为糖尿病最常见的微血管并发症之一,糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)持续位居工作年龄人群可避免性视力丧失的首要致病因素<sup>[1]</sup>。其病理进程具有显著隐匿性特征,微动脉瘤、毛细血管无灌注等初期病理改变并不伴随明显视觉症状<sup>[2]</sup>。因此有效的早期筛查和治疗对预防视力丧失至关重要。近年来的研究证据表明,持续的高血糖会引发微血管损伤、内皮功能障碍。这种微血管异常会导致血-视网膜屏障完整性受损,继而引发视网膜渗出、出血及黄斑水肿等病理改变,最终造成视网膜光感受器细胞的不可逆性损伤<sup>[3]</sup>。研究发现,视网膜黄斑中央凹区域缺乏视网膜毛细血管系统,其营养供给依赖于脉络膜循环系统<sup>[4]</sup>。因此脉络膜参数的评估可以潜在地检测早期疾病中的视网膜损伤,并揭示 DR 的病理机制。

近年来,超广角扫频源光学相干断层扫描血管成像(ultra-widfield swept-source optical coherence tomography angiography, UWFSS-OCTA)技术的应用,为眼底疾病的诊断提供了新的视角。尽管已有研究使用 OCTA 技术评估 DR 的微循环变化,但大部分研究集中于视网膜中心区域和黄斑区,忽视了周边视网膜和脉络膜的变化<sup>[5-6]</sup>。本研究中,UWFSS-OCTA 扩展扫描范围至 26 mm×21 mm,分辨率可达 3.8 μm,可以在更广泛的范围内扫描视网膜和脉络膜,提供更高分辨率的图像,详细测量视网膜浅层(superficial capillary plexus, SCP)和深层毛细血管网(deep capillary plexus, CP)的血流密度、脉络膜厚度(choroidal thickness, CT)和脉络膜灌注面积(choroidal perfusion area, CPA),为分析微循环损伤提供了全方位的视角,因此具有较大的临床应用潜力。

本研究不仅为 DR 的治疗提供了新的技术路径,也为深入理解 DR 的病理机制提供了数据支持。随着 UWFSS-OCTA 技术在临床中的广泛应用,DR 的诊断和个性化治疗有望得到更好的发展。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

本研究纳入 2023 年 12 月—2024 年 2 月山东第

一医科大学附属省立医院招募的共 159 例(263 眼)患者,其中男 75 例、女 84 例。根据美国糖尿病视网膜病变早期治疗研究(ETDRS),结合眼底镜检查 and 眼底照相将受试者分为 4 组:①糖尿病无视网膜病变(NDR)组 69 眼;②非增殖期糖尿病视网膜病变(NPDR)组 54 眼;③增殖期糖尿病视网膜病变(PDR)组 72 眼;④年龄相匹配的 68 只健康眼为对照组。

本研究遵循《赫尔辛基宣言》原则,经山东省立医院医学伦理委员会审核批准(SWYX NO.2020-235),告知患者研究的细节和任何潜在风险后,所有患者及家属均签署知情同意书。

纳入标准:①根据最新 WHO 诊断标准确诊的糖尿病患者;②依从性好,能够参加本次研究,可以配合相关检查;③屈光不正≤6D;④18~80 岁。

排除标准:①屈光介质混浊,如玻璃体混浊、严重的白内障患者;②存在眼底其他血管性疾病(视网膜动、静脉阻塞、青光眼、葡萄膜炎等);③眼压异常(<10 mmHg 或>21 mmHg);④存在一些严重的全身疾病患者,心、肝、肾等严重的疾病;⑤不愿配合检查治疗。同一受试者双眼可纳入研究时,左右眼无差别纳入后续检查及研究。

### 1.2 眼科检查

利用 UWFSS-OCTA,在 26 mm×21 mm 的范围内,扫描每位受试者眼底图像,设备自带软件将眼底各层 21 mm×21 mm 范围眼底图片以黄斑为中心分为不同半径(1~6 mm、6~15 mm、15~21 mm)的同心环,每个同心环分为上、下、鼻、颞,系统自动测算,并将扫描区域精准划分为 12 个分区,分别定义为 S1(1)、S2(2)、S3(3)、I1(4)、I2(5)、I3(6)、N1(7)、N2(8)、N3(9)、T1(10)、T2(11)、T3(12)。见图 1。

脉络膜解剖学边界:其组织范围起始于 Bruch 膜的内界,终止于脉络膜与巩膜交界区,构成视网膜外层的重要血管结构。动态运动及投影伪影或图像质量评分未达标(阈值设定为≥7 分)的扫描数据予以排除。所有影像数据在预处理阶段均进行误差检测与空间配准校正,以确保数据有效性。见图 2。

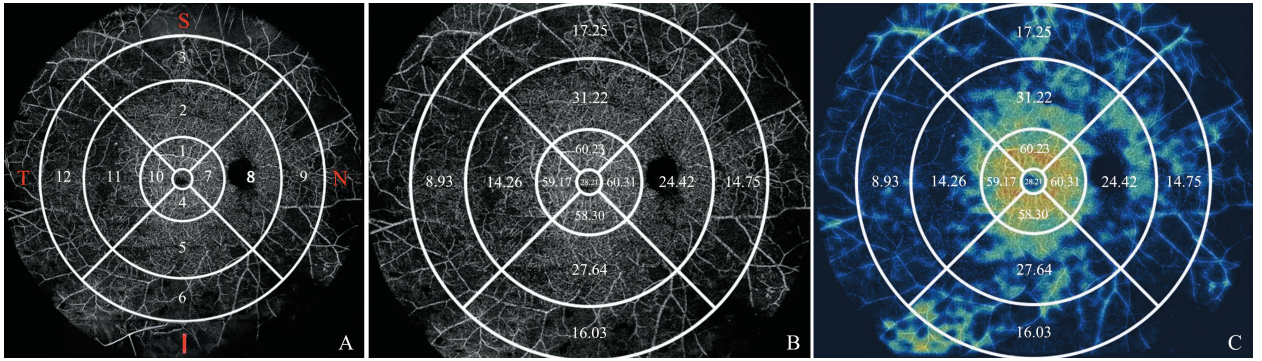


图1 视网膜浅层毛细血管网血流密度图

A: OCTA 26 mm×21 mm 模式的 ETDRS 分区,其中红色数字 S 代表上侧,I 代表下侧,N 代表鼻侧,T 代表颞侧; B:为视网膜浅层毛细血管图; C:为 SCP 血流密度图,白色数字为血流密度(%),色彩示意不同的血流密度区间

Figure 1 Blood flow density map of the superficial capillary plexus (SCP) of the retina

A: OCTA ETDRS grid in 26 mm×21 mm mode, where red numerals indicate: S = superior, I = inferior, N = nasal, T = temporal; B: Superficial capillary plexus (SCP) image; C: SCP blood flow density map, with white numerals representing blood flow density (%) and color coding different blood flow density ranges

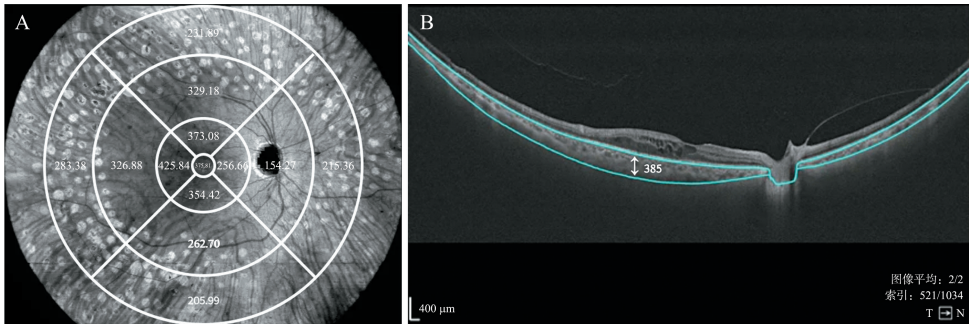


图2 脉络膜厚度

A:脉络膜层; B:光学相干断层扫描图,蓝色线表示脉络膜的上下边界,白色数字为脉络膜厚度

Figure 2 Choroidal Thickness

A: Choroidal layer; B: Optical coherence tomography image, with blue lines indicating the upper and lower boundaries of the choroid, and white numbers representing choroidal thickness (μm)

### 1.3 统计学处理

应用 SPSS 27.0 软件,不符合正态分布的计量资料以中位数  $M(P_{25}, P_{75})$  表示,多组间比较采用 Kruskal-Wallis  $H$  检验。计数资料以  $n(%)$  表示,组间比较采用 Pearson's  $\chi^2$  检验。组间在进行两两比较时,采用 Bonferroni 法进行校正,采用 Spearman 相关分析。检验水准  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 患者基线指标比较

对照组、NDR 组、NPDR 组、PDR 组人群年龄差异无统计学意义( $H = 2.405, P = 0.493$ )。最佳矫正视力在各组差异有统计学意义( $H = 104.697, P < 0.01$ )。眼压在各组中差异无统计学意义( $H = 5.067, P = 0.167$ )。BMI 在各组差异有统计学意义( $H = 12.673, P < 0.05$ )。糖尿病病程在各组差异有统计学意义( $H = 183.646, P < 0.05$ ),见表 1。

表1 研究人群的人口学特征( $n = 263$ )  
Table 1 Demographic data of the subjects( $n = 263$ )

指标	对照组	NDR 组	NPDR 组	PDR 组	$H$	$P$
受试眼数	68	69	54	72	—	—
年龄/岁	54(47,60)	53(46,59)	55(47,65)	53.5(47,61)	2.405	0.493
BCVA(logMAR)	0(0,0)	0(0,0.05)	0(0,0.2)	0.4(0.1,0.7)	104.679	<0.001
眼压/mmHg	15(14,16.8)	15(13,17)	15(14,17)	15(14,17)	5.067	0.167
BMI/(kg/m <sup>2</sup> )	23.5(21.5,26)	25.3(23.4,27.4)	25.4(23.3,27.9)	24.8(23.5,26.6)	12.673	0.005
糖尿病病程/年	—	3(0.7,7)	10(2,17)	10.5(10,18.5)	183.646	<0.001

## 2.2 SCP

在对照组、NDR 组、NPDR 组、PDR 组之间相同区域进行比较,在 1~6 mm,15~21 mm 及 1~21 mm 区域,SCP 的差异具有统计学意义( $H=39.106, P<0.001$ ;  $H=17.186, P<0.001$ ;  $H=34.882, P<0.001$ ),在 6 mm~15 mm 区域,SCP 的降低差异无

有统计学意义( $H=6.046, P=0.109$ )。进一步两两比较,在 1~6 mm,15~21 mm 及 1~21 mm 区域,NPDR 组与对照组比较,SCP 的降低具有统计学意义( $P<0.05$ ),PDR 组与对照组比较,SCP 的降低具有统计学意义( $P<0.05$ ),PDR 组与 NDR 组比较,SCP 的降低具有统计学意义( $P<0.05$ ),见表 2。

表 2 视网膜浅层血管网血流密度  
Table 2 Superficial capillary pexus

分组	对照组	NDR 组	NPDR 组	PDR 组	H	P
SCP1~6 mm	61.5(59.6,63.5)	60.1(58.2,62.1)	58.6(56.1,61.6) <sup>a</sup>	57.0(52.1,60.6) <sup>b,c</sup>	39.106	<0.001
SCP6~15 mm	26.5(24.8,27.9)	26.4(23.6,28.1)	25.2(22.8,27.2)	25.4(21.6,28.6)	6.046	0.109
SCP15~21 mm	20.2(18.1,21.6)	19.8(18.2,21.4)	18.9(16.7,20.8) <sup>a</sup>	17.6(15.1,20.9) <sup>b,c</sup>	17.186	<0.001
SCP1~21 mm	35.6(34.6,37.5)	34.9(33.8,37.0)	33.9(32.1,36.0) <sup>a</sup>	32.7(30.9,35.5) <sup>b,c</sup>	34.882	<0.001

注:M;中位数,Q25、Q75 分别代表 25 百分位数及 75 百分位数。区域见图 1。 $P$  值为 3 组之间比较的统计学差异, $P<0.05$ ,3 组之间的差异具有统计学意义。<sup>a</sup> NPDR 组与对照组比较,SCP 的降低具有统计学意义, $P^a<0.05$ ;<sup>b</sup> PDR 组与对照组比较,SCP 的降低具有统计学意义, $P^b<0.05$ ;<sup>c</sup> PDR 组与 NDR 组比较,SCP 的降低具有统计学意义, $P^c<0.05$ 。

## 2.3 DCP

在对照组、NDR 组、NPDR 组、PDR 组之间相同区域进行比较,差异在 4 个区域具有统计学意义( $H=54.196, P<0.001$ ;  $H=149.008, P<0.001$ ;  $H=128.589, P<0.001$ ;  $H=148.812, P<0.001$ )。进一

步两两比较,在 1~6 mm、6~15 mm、15~21 mm、1~21 mm 区域,PDR 组与其他 3 个组比较,DCP 的降低,差异具有统计学意义( $P<0.05$ ),NPDR 组与 NDR 组及对照组相比较,DCP 的降低,差异具有统计学意义( $P<0.05$ ),见表 3。

表 3 视网膜深层血管网血流密度  
Table 3 Deep capillary pexus

分组	对照组	NDR 组	NPDR 组	PDR 组	H	P
DCP1~6 mm	8.7(6.1,11.9)	10.2(7.2,13.2)	7.7(4.3,9.7) <sup>a,c</sup>	3.7(2.0,7.9) <sup>b,d,e</sup>	54.196	<0.001
DCP6~15 mm	16.4(13.4,19.1)	16.0(11.4,18.9)	11.6(8.2,14.7) <sup>a,c</sup>	4.9(3.2,7.0) <sup>b,d,e</sup>	149.008	<0.001
DCP15~21 mm	15.8(14.1,19.1)	16.1(12.3,19.0)	11.1(7.4,15.4) <sup>a,c</sup>	6.7(4.3,9.3) <sup>b,d,e</sup>	128.589	<0.001
DCP1~21 mm	14.0(11.6,16.2)	13.7(10.9,16.7)	10.6(7.9,12.7) <sup>a,c</sup>	5.5(4.1,7.4) <sup>b,d,e</sup>	148.812	<0.001

注:M;中位数,Q25、Q75 分别代表 25 百分位数及 75 百分位数。区域见图 1。 $P$  值为三组之间比较的统计学差异, $P<0.05$ ,三组之间的差异具有统计学意义。<sup>a</sup> NPDR 组与对照组比较,DCP 的降低具有统计学意义, $P^a<0.05$ ;<sup>b</sup> PDR 组与对照组比较,DCP 的降低具有统计学意义, $P^b<0.05$ ;<sup>c</sup> NPDR 组与 NDR 组比较,DCP 的降低具有统计学意义, $P^c<0.05$ ;<sup>d</sup> PDR 组与 NDR 组比较,DCP 的降低具有统计学意义, $P^d<0.05$ ;<sup>e</sup> PDR 组与 NPDR 组比较,DCP 的降低具有统计学意义, $P^e<0.05$ 。

## 2.4 CT

在对照组、NDR 组、NPDR 组、PDR 组之间相同区域进行比较,差异在 T3、I3 区域具有统计学意义( $H=10.763, P=0.013$ ;  $H=8.507, P=0.037$ )。在颞、下 15~21 mm 区域,PDR 组与对照组及 NDR 组

相比较,CT 的降低,差异具有统计学意义( $P<0.05$ )。在下 15~21 mm 区域,PDR 组与 NPDR 组相比较,CT 的降低,差异具有统计学意义( $P<0.05$ ),见表 4。

表 4 脉络膜厚度  
Table 4 Choroidal thickness

分组	对照组	NDR 组	NPDR 组	PDR 组	H	P
CTS1	312(269,407)	333(279,427)	316(247,393)	321(269,400)	2.756	0.431
CTS2	284(257,355)	301(259,369)	294(250,365)	276(253,339)	2.295	0.514
CTS3	228(211,274)	238(217,266)	239(207,276)	224(190,272)	4.879	0.181
CTT1	333(279,413)	324(270,397)	317(243,389)	326(258,395)	2.443	0.486
CTT2	282(246,329)	279(237,331)	263(218,315)	265(232,300)	6.934	0.074
CTT3	244(208,276)	233(213,273)	237(202,254)	213(194,261) <sup>a,b</sup>	10.763	0.013
CTI1	317(252,401)	315(254,387)	283(231,403)	305(243,399)	0.836	0.841
CTI2	221(196,299)	239(197,290)	223(195,278)	208(187,272)	4.026	0.259
CTI3	186(167,220)	187(166,203)	189(166,209)	166(145,207) <sup>a,b,c</sup>	8.507	0.037

续表

分组	对照组	NDR 组	NPDR 组	PDR 组	<i>H</i>	<i>P</i>
CTN1	263(204,352)	280(232,373)	237(198,347)	267(210,380)	2.325	0.508
CTN2	192(151,254)	195(153,242)	192(155,242)	183(148,261)	0.497	0.920
CTN3	221(176,269)	223(193,259)	228(187,265)	210(173,261)	3.320	0.345

注:*M*:中位数,*Q*<sub>25</sub>、*Q*<sub>75</sub> 分别代表 25 百分位数及 75 百分位数。区域见图 1。*P* 值为三组之间比较的统计学差异,*P*<0.05,三组之间的差异具有统计学意义。<sup>a</sup>PDR 组与对照组比较,CT 的降低具有统计学意义,*P*<sup>a</sup><0.05;<sup>b</sup>PDR 组与 NDR 组比较,CT 的降低具有统计学意义,*P*<sup>b</sup><0.05;<sup>c</sup>PDR 组与 NPDR 组比较,CT 的降低具有统计学意义,*P*<sup>c</sup><0.05。

## 2.5 CPA

在对照组、NDR 组、NPDR 组、PDR 组之间相同区域进行比较,差异在 4 个区域具有统计学意义(*H*=11.342,*P*=0.01;*H*=15.694,*P*=0.001;*H*=

52.239,*P*<0.001;*H*=55.773,*P*<0.001)。进一步两两比较,在 1~6 mm、6~15 mm、15~21 mm、1~21 mm 区域,PDR 组与其他 3 个组相比较,CPA 的降低,差异具有统计学意义(*P*<0.05),见表 5。

表 5 脉络膜灌注面积  
Table 5 Choroidal perfusion area

分组	对照组	NDR 组	NPDR 组	PDR 组	<i>H</i>	<i>P</i>
CPA1~6 mm	6.9(6.9,6.9)	6.9(6.9,6.9)	6.9(6.9,6.9)	6.9(6.9,6.9) <sup>a,b,c</sup>	11.342	0.010
CPA6~15 mm	16.4(13.4,19.1)	16.0(11.4,18.9)	11.6(8.2,14.7)	4.9(3.2,7.0) <sup>a,b,c</sup>	15.694	0.001
CPA15~21 mm	15.8(14.1,19.1)	16.1(12.3,19.0)	11.1(7.4,15.4)	6.7(4.3,9.3) <sup>a,b,c</sup>	53.239	<0.001
CPA1~21 mm	14.0(11.6,16.2)	13.7(10.9,16.7)	10.6(7.9,12.7)	5.5(4.1,7.4) <sup>a,b,c</sup>	55.773	<0.001

注:*M*:中位数,*Q*<sub>25</sub>、*Q*<sub>75</sub> 分别代表 25 百分位数及 75 百分位数。区域见图 1。*P* 值为三组之间比较的统计学差异,*P*<0.05,三组之间的差异具有统计学意义。<sup>a</sup>PDR 组与对照组比较,CPA 的降低具有统计学意义,*P*<sup>a</sup><0.05;<sup>b</sup>PDR 组与 NDR 组比较,CPA 的降低具有统计学意义,*P*<sup>b</sup><0.05;<sup>c</sup>PDR 组与 NPDR 组比较,CPA 的降低具有统计学意义,*P*<sup>c</sup><0.05。

## 2.6 相关性分析

糖尿病病程与 DCP 上、下、鼻侧 15~21 mm 成负相关性;糖尿病病程与 BCVA(LogMAR)正相关;

BCVA(LogMAR)与 DCP15~21 mm 区域负相关,见表 6。

表 6 视网膜血流密度与糖尿病病程及 BCVA 相关性分析

Table 6 Correlation analysis across retinal blood flow density and diabetic disease duration/BCVA

分组	糖尿病病程 相关系数( <i>r</i> )	<i>P</i>	BCVA(LogMAR) 相关系数( <i>r</i> )	<i>P</i>
DCPS3	-0.568	<0.001	-0.519	<0.001
DCPI3	-0.459	<0.001	-0.426	<0.001
DCPN3	-0.449	<0.001	-0.417	<0.001
BCVA(LogMAR)	0.478	<0.001	—	—

## 3 讨论

此研究应用 UWFSS-OCTA 技术,对不同程度 DR 患者的视网膜及脉络膜微循环进行深层分析,揭示了糖尿病进展对视网膜脉和络膜血流密度及脉络膜厚度的区域性影响。这为进一步探索 DR 的病理机制提供了重要的依据,同时也为临床分期及诊治提供了潜在指导。

### 3.1 视网膜血流密度的变化

我们的研究显示,随着 DR 的进展,SCP 和 DCP 血流密度出现了显著下降<sup>[7]</sup>,尤其在 PDR 组。具体而言,在 1~6 mm、15~21 mm 及 1~21 mm 区域,PDR 组的 SCP 显著低于对照组和 NDR 组,NPDR 组在这些区域的 SCP 也表现出较低的血流密度,这与 Amato 等<sup>[8]</sup>的研究一致。这表明,DR 的进展导

致了视网膜微循环的严重损伤,尤其在视网膜的外周区域(15~21 mm),毛细血管网的血流减少较为显著。Kaizu 等<sup>[9]</sup>发现,这种血流密度的下降可能与糖尿病引起的毛细血管闭塞、微血管瘤形成和内皮细胞功能损伤密切相关<sup>[10]</sup>。PDR 组的 DCP 在多个区域(包括 1~6 mm、6~15 mm、15~21 mm 和 1~21 mm)显著低于其他组,NPDR 组的 DCP 血流密度也低于对照组和 NDR 组,这与 Ryu 等<sup>[11]</sup>的研究一致。这一现象支持了 DR 深层微循环功能衰退的观点。DCP 血流密度的下降可能与糖尿病引起的深层毛细血管网受损及微血管再生不足有关。

多项研究表明,DR 表现为周细胞(pericytes, PCs)减少或消失,病理性毛细血管内皮细胞增生,基底膜增厚,血-视网膜屏障(blood-retina barrier, BRB)功能破坏,导致血管内皮生长因子(vascular

endothelial growth factor, VEGF) 形成<sup>[12]</sup>, 导致 SCP 和 DCP 的变化与视觉功能的下降<sup>[13]</sup>。

### 3.2 脉络膜厚度和灌注面积的变化

本研究还发现, 随着 DR 病情的进展 CT 和 CPA 在不同区域均呈现下降趋势。具体而言, 在研究中, PDR 组在多个区域的 CT 明显低于对照组和 NPDR 组, 这与 Fernández-Espinosa G 等<sup>[14]</sup> 研究一致。此外, CPA 在 PDR 组的 1~6 mm、6~15 mm、15~21 mm 及 1~21 mm 区域也表现出显著下降。这一现象与脉络膜的结构变化和血流供应不足密切相关。

Laíns 等<sup>[15]</sup> 推测, 糖尿病引起的脉络膜变化是多因素作用的结果, 其中包括长期的高血糖对血管内皮细胞的损伤、血流动态的改变以及微血管功能障碍等。特别是在糖尿病的后期, 脉络膜的萎缩和血流减少往往伴随着视网膜的进一步损害, 从而影响视网膜的氧合状态, 加剧视网膜的缺血性损伤, 形成血流无灌注区或新生血管, 导致黄斑水肿等并发症。在 Abalem 等<sup>[16]</sup> 的研究中, 脉络膜厚度和灌注面积的减少与视网膜的氧供不足密切相关, 脉络膜是视网膜的主要血液供应来源, 其功能衰退对视网膜的健康起着决定性作用。通过 UWFSS-OCTA 对脉络膜参数的定量分析, 本研究证实了脉络膜厚度和灌注面积与 DR 分期的相关性, 表明监测脉络膜变化不仅有助于揭示 DR 的病理机制, 还可为临床早期诊断和靶向干预提供重要依据<sup>[17]</sup>。

### 3.3 糖尿病病程进展对微循环损伤的影响

Spearman 相关分析显示, 糖尿病病程与 DCP 呈显著负相关性<sup>[18]</sup>, 而与 BCVA (LogMAR) 呈正相关, 这一结果支持了糖尿病微血管损伤的累积效应假说, 即长期高血糖通过氧化应激和炎症反应持续破坏微血管结构及功能<sup>[19]</sup>。此外病程与视力预后的关联提示, 微循环损伤的动态监测对延缓 DR 进展至关重要。上述发现强调了在糖尿病管理中, 需根据病程调整随访策略, 对于病程较长的患者, 应通过 UWFSS-OCTA 技术提高眼底检查频率, 重点关注外周视网膜及脉络膜微循环变化, 以实现 DR 早期迹象的精准识别和及时干预<sup>[20-21]</sup>。

### 3.4 UWFSS-OCTA 技术的临床应用价值

本研究证实, UWFSS-OCTA 凭借其超广角 (26 mm×21 mm) 和高分辨率 (3.8 μm) 成像特性, 能够全面评估 DR 患者视网膜及脉络膜微循环损伤的空间分布特征, 为 DR 的分期提供了新的思路<sup>[22-23]</sup>。相较于传统 OCTA (12 mm×12 mm), UWFSS-OCTA 显著扩展了检测范围, 尤其在外周视网膜 (15 ~

21 mm) 和脉络膜低灌注区域显示出更高的敏感性。这一优势使其能够早期识别微血管退行性改变, 从而为临床监测 DR 微循环动态演变及制定个体化干预策略提供了关键影像学依据<sup>[24]</sup>。

传统的眼底荧光血管造影 (fundus fluorescein angiography, FFA) 虽然能够评估毛细血管无灌注区和新生血管的分布, 但存在侵入性、荧光素副作用等问题<sup>[25-26]</sup>。而 UWFSS-OCTA 通过非接触式扫描即可获取高分辨率眼底三维结构影像与微循环血流数据, 在避免造影剂相关并发症的同时, 实现了视网膜各层毛细血管网络及脉络膜血管系统的精准分层可视化<sup>[27]</sup>。这种技术的广泛应用极大地提升了糖尿病患者的检查安全性及依从性, 其量化血流参数更为糖尿病微循环损伤的纵向研究提供了可靠的客观评价指标<sup>[28]</sup>。

### 3.5 研究的局限性与未来展望

目前的研究仍存在一些局限性: ①研究为横断面设计, 无法动态地评估糖尿病病程与微循环损伤的因果关系。需要进一步开展纵向前瞻性研究, 以进一步验证 UWFSS-OCTA 参数变化在 DR 进展中的预测价值; ②本研究纳入的样本量有限, 为最大化利用临床数据, 将同一患者的双眼均纳入分析, 这可能引入了数据的非独立性。尽管敏感性分析支持了我们的主要发现, 但未来研究应采用更严谨的设计 (如预先规定单眼入选标准) 或使用混合效应模型来处理此类数据, 未来研究可考虑扩大样本规模, 并进行多中心研究, 以提高研究结果的广泛适用性和可靠性; ③UWFSS-OCTA 技术虽然具有明显优势, 但目前算法的优化、扫描范围的扩大和分辨率的提高等问题需要进一步解决<sup>[29]</sup>。

未来的研究可以进一步探讨 UWFSS-OCTA 在 DR 早期干预中的应用价值, 尤其是其在糖尿病控制、治疗效果评估及视网膜恢复过程中发挥的作用<sup>[30]</sup>。UWFSS-OCTA 技术可以成为 DR 早期筛查的重要工具, 有助于更早地识别 DR, 及时采取干预措施, 减少视力丧失的风险<sup>[31]</sup>。此外, UWFSS-OCTA 的应用还可能为新型治疗手段 (如抗 VEGF 药物、视网膜激光光凝治疗) 的疗效评估提供客观参数支持, 从而进一步优化 DR 的诊疗策略<sup>[32]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Teo ZL, Tham YC, Yu M, et al. Global prevalence of diabetic retinopathy and projection of burden through 2045: systematic review and meta-analysis [J]. *Ophthalmology*, 2021, 128 (11): 1580-1591. doi: 10.1016/j.

- ophtha.2021.04.027
- [2] Arrigo A, Teussink M, Aragona E, et al. MultiColor imaging to detect different subtypes of retinal microaneurysms in diabetic retinopathy[J]. *Eye (Lond)*, 2021, 35(1): 277-281. doi: 10.1038/s41433-020-0811-6
- [3] Sidorcuk P, Obuchowska I, Konopinska J, et al. Correlation between choroidal vascularity index and outer retina in patients with diabetic retinopathy [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(13): 3882. doi: 10.3390/jcm11133882
- [4] Kim JT, Park EJ. Correlation of photoreceptor integrity with retinal vessel density and choriocapillaris in eyes with diabetic retinopathy[J]. *Retina*, 2022, 42(3): 434-441. doi: 10.1097/IAE.0000000000003343
- [5] 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 [J]. *国际眼科杂志*, 2024, 24(9): 1471-1475. doi: 10.3980/j.issn.1672-5123.2024.9.23
- ZENG Shaojie, XIE Huailin, ZHANG Yunyun. Diagnostic value of optical coherence tomography angiography in evaluating parameters of foveal avascular zone in early diabetic retinopathy [J]. *Int Eye Sci*, 2024, 24(9): 1471-1475. doi: 10.3980/j.issn.1672-5123.2024.9.23
- [6] 鲁鑫, 赵星星, 伊恩晖, 等. OCTA 定量分析糖尿病视网膜病变患者黄斑区微循环变化 [J]. *国际眼科杂志*, 2023, 23(6): 1033-1039. doi: 10.3980/j.issn.1672-5123.2023.6.30
- LU Xin, ZHAO Xingxing, YI Enhui, et al. Quantitative analysis of macular microcirculation changes in diabetic retinopathy patients by optical coherence tomography angiography [J]. *Int Eye Sci*, 2023, 23(6): 1033-1039. doi: 10.3980/j.issn.1672-5123.2023.6.30
- [7] Cheung N, Mitchell P, Wong TY. Diabetic retinopathy [J]. *Lancet*, 2010, 376(9735): 124-136. doi: 10.1016/S0140-6736(09)62124-3
- [8] Amato A, Nadin F, Borghesan F, et al. Widefield optical coherence tomography angiography in diabetic retinopathy [J]. *J Diabetes Res*, 2020, 2020: 8855709. doi: 10.1155/2020/8855709
- [9] Kaizu Y, Nakao S, ARIMA M, et al. Capillary dropout is dominant in deep capillary plexus in early diabetic retinopathy in optical coherence tomography angiography [J]. *Acta Ophthalmol*, 2019, 97(5): e811-e812. doi: 10.1111/aos.14041
- [10] Srinivasan S, Raman R, Kulothungan V, et al. Influence of serum lipids on the incidence and progression of diabetic retinopathy and macular oedema: Sankara Nethralaya Diabetic Retinopathy Epidemiology And Molecular genetics Study-II [J]. *Clin Exp Ophthalmol*, 2017, 45(9): 894-900. doi: 10.1111/ceo.12990
- [11] Ryu G, Kim I, Min SG. Topographic analysis of retinal and choroidal microvasculature according to diabetic retinopathy severity using optical coherence tomography angiography [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2021, 259(1): 61-68. doi: 10.1007/s00417-020-04785-7
- [12] 王娇娇, 李苗, 宋宗明. 糖尿病视网膜病变的机制和细胞模型研究进展 [J]. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2022, 36(5): 93-99. doi: 10.6040/j.issn.1673-3770.0.2021.203
- WANG Jiaojiao, LI Miao, SONG Zongming. Progress in diabetic retinopathy mechanisms and cellular models [J]. *Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University*, 2022, 36(5): 93-99. doi: 10.6040/j.issn.1673-3770.0.2021.203
- [13] Klein R. Hyperglycemia and microvascular and macrovascular disease in diabetes [J]. *Diabetes Care*, 1995, 18(2): 258-268. doi: 10.2337/diacare.18.2.258
- [14] Fernández-Espinosa G, Orduna-Hospital E, Boned-Murillo A, et al. Choroidal and retinal thicknesses in type 2 diabetes mellitus with moderate diabetic retinopathy measured by swept source OCT [J]. *Biomedicine*, 2022, 10(9): 2314. doi: 10.3390/biomedicine10092314
- [15] Laíns I, Talcott KE, Santos AR, et al. Choroidal thickness in diabetic retinopathy assessed with swept-source optical coherence tomography [J]. *Retina*, 2018, 38(1): 173-182. doi: 10.1097/IAE.0000000000001516
- [16] Abalem MF, Nazareth Santos Veloso H, Garcia R, et al. The effect of glycemia on choroidal thickness in different stages of diabetic retinopathy [J]. *Ophthalmic Res*, 2020, 63(5): 474-482. doi: 10.1159/000506381
- [17] Wang W, Lo ACY. Diabetic retinopathy: pathophysiology and treatments [J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(6): 1816. doi: 10.3390/ijms19061816
- [18] Sun ZH, Yang DW, Tang ZQ, et al. Optical coherence tomography angiography in diabetic retinopathy: an updated review [J]. *Eye*, 2021, 35(1): 149-161. doi: 10.1038/s41433-020-01233-y
- [19] Faselis C, Katsimardou A, Imprialos K, et al. Microvascular complications of type 2 diabetes mellitus [J]. *Curr Vasc Pharmacol*, 2020, 18(2): 117-124. doi: 10.2174/1570161117666190502103733
- [20] Simó-Servat O, Hernández C, Simó R. Diabetic retinopathy in the context of patients with diabetes [J]. *Ophthalmic Res*, 2019, 62(4): 211-217. doi: 10.1159/000499541
- [21] Durbin MK, An L, Shemonski ND, et al. Quantification of retinal microvascular density in optical coherence tomographic angiography images in diabetic retinopathy [J]. *JAMA Ophthalmol*, 2017, 135(4): 370-376. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2017.0080

- [29] Bojarskaite L, Vallet A, Bjørnstad DM, et al. Sleep cycle-dependent vascular dynamics in male mice and the predicted effects on perivascular cerebrospinal fluid flow and solute transport[J]. *Nat Commun*, 2023, 14: 953. doi: 10.1038/s41467-023-36643-5
- [30] Badran M, Puech C, Gozal D. The cardiovascular consequences of chronic sleep fragmentation: Evidence from experimental models of obstructive sleep apnea [J]. *Sleep Med*, 2025, 132: 106566. doi: 10.1016/j.sleep.2025.106566
- [31] Goto I, Katsuki S, Ikui H, et al. Pathological studies on the intracerebral and retinal arteries in cerebrovascular and noncerebrovascular diseases [J]. *Stroke*, 1975, 6(3): 263-269. doi:10.1161/01.str.6.3.263
- [32] Wang J, Wang WC, Jin B, et al. Improvement in cerebral and ocular hemodynamics early after carotid endarterectomy in patients of severe carotid artery stenosis with or without contralateral carotid occlusion [J]. *Biomed Res Int*, 2016, 2016: 2901028. doi: 10.1155/2016/2901028
- [33] Lin PW, Chiu LW, Chang CT, et al. Impaired blood flow of optic nerve head in patients with severe obstructive sleep apnea/hypopnea syndrome [J]. *J Sleep Res*, 2025, 34(4): e14422. doi:10.1111/jsr.14422
- (编辑:李伟)
- 
- (上接第 86 页)
- [22] Kupis M, Wawrzyniak ZM, Szaflik JP, et al. Retinal photoreceptors and microvascular changes in the assessment of diabetic retinopathy progression: a two-year follow-up study[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(15): 2513. doi: 10.3390/diagnostics13152513
- [23] Ipp E, Liljenquist D, Bode B, et al. Pivotal evaluation of an artificial intelligence system for autonomous detection of referable and vision-threatening diabetic retinopathy[J]. *JAMA Netw Open*, 2021, 4(11): e2134254. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2021.34254
- [24] Arrigo A, Aragona E, Bandello F. VEGF-targeting drugs for the treatment of retinal neovascularization in diabetic retinopathy[J]. *Ann Med*, 2022, 54(1): 1089-1111. doi: 10.1080/07853890.2022.2064541
- [25] Mohite AA, Perais JA, McCullough P, et al. Retinal ischaemia in diabetic retinopathy: understanding and overcoming a therapeutic challenge [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(6): 2406. doi: 10.3390/jcm12062406
- [26] 常威威, 焦万珍, 崔艳艳, 等. 糖尿病性黄斑缺血的研究进展[J]. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2024, 38(3): 130-136. doi:10.6040/j.issn.1673-3770.0.2022.538
- CHANG Weiwei, JIAO Wanzhen, CUI Yanyan, et al. Research progress of diabetic macular ischaemia [J]. *Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University*, 2024, 38(3): 130-136. doi:10.6040/j.issn.1673-3770.0.2022.538
- [27] Xu XY, Gao B, Ding WX, et al. Retinal image measurements and their association with chronic kidney disease in Chinese patients with type 2 diabetes: the NCD study[J]. *Acta Diabetol*, 2021, 58(3): 363-370. doi: 10.1007/s00592-020-01621-6
- [28] Santos AR, Lopes M, Santos T, et al. Intraretinal microvascular abnormalities in eyes with advanced stages of non-proliferative diabetic retinopathy: comparison between UWF-FFA, CFP, and OCTA—the RICHARD study[J]. *Ophthalmol Ther*, 2024, 13(12): 3161-3173. doi: 10.1007/s40123-024-01054-2
- [29] Zhang JF, Zhang JX, Zhang CY, et al. Diabetic macular edema: current understanding, molecular mechanisms and therapeutic implications[J]. *Cells*, 2022, 11(21): 3362. doi: 10.3390/cells11213362
- [30] Chauhan MZ, Rather PA, Samarah SM, et al. Current and novel therapeutic approaches for treatment of diabetic macular edema[J]. *Cells*, 2022, 11(12): 1950. doi: 10.3390/cells11121950
- [31] Borrelli E, Battista M, Sacconi R, et al. Optical coherence tomography angiography in diabetes[J]. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*, 2021, 10(1): 20-25. doi: 10.1097/APO.0000000000000351
- [32] Shughoury A, Bhatwadekar A, Jusufbegovic D, et al. The evolving therapeutic landscape of diabetic retinopathy[J]. *Expert Opin Biol Ther*, 2023, 23(10): 969-985. doi: 10.1080/14712598.2023.2247987
- (编辑:李伟)