·临床论著·

基于超广角 SS-OCTA 的高度近视脉络膜血管与基质差异性重构的量化分析

雷安琪[1,2],李 锐[1],胡卫群[1],王泽旭[1,2],邹春梅[1,2],张丹娜[1]

引用:雷安琪, 李锐, 胡卫群, 等. 基于超广角 SS-OCTA 的高度近视脉络膜血管与基质差异性重构的量化分析. 国际眼科杂志, 2026,26(12):2101-2107.

基金项目:孝感市自然科学计划项目(No.XGKJ2024010047)
作者单位:[1](432100)中国湖北省孝感市,武汉科技大学附属孝感医院眼科; [2](430000)中国湖北省武汉市,武汉科技大学医学部医学院
作者简介:雷安琪,女,在读硕士研究生,研究方向:斜视、弱视与屈光学。
通讯作者:张丹娜,女,副主任医师,硕士研究生导师,研究方向:斜视、弱视与屈光学. 2419910230@qq.com
收稿日期: 2026-05-27 修回日期: 2026-10-15

摘要

目的:利用超广角扫频源光学相干断层血管成像技术(SS-OCTA)来探究脉络膜结构、血流密度的变化与近视进展之间的关系。

方法:横断面研究,收集 18-50 岁近视前期以及近视患者,按等效球镜度数(SE)分为正视及低度近视组(-3.00 D< SE≤+0.75 D)、中度近视组(-6.00 D<SE≤-3.00 D)和高度近视组(SE≤-6.00 D)。采用 400 kHz SS-OCTA 行黄斑部 24 mm×20 mm 扫描,分 9 个区域量化脉络膜毛细血管血流密度(CCD)、单位面积脉络膜基质体积(CSV/a)及脉络膜基质指数(CSI)。

结果:纳入患者共 120 例 120 眼,正视及低度近视组29 例,其中男 7 例,女 22 例,年龄 31.0(21.0,37.0)岁;中度近视组 25 例,其中男 7 例,女 18 例,年龄 32.0(22.0,36.0)岁;高度近视组 66 例,其中男 27 例,女 39 例,年龄 34.0(27.0,41.0)岁;随着近视度数增加,多数区域 CCD 及 CSV/a 显著下降,CSI 代偿性升高(均 $P<0.05$)。颞侧 CCD 与轴率比呈倒 U 型关系($b_2=-22.77$, $P<0.001$, $R^2=0.856$),拐点位于轴率比 3.05;在拐点前 CCD 代偿性上升,拐点后明显下降。根据整体水平结果,单眼平均 CSV/a 与 CSI 呈显著负相关($\rho=-0.546$, $P<0.001$),而在分区水平,鼻侧($\rho=-0.364$, $P<0.001$)、下方($\rho=-0.383$, $P<0.001$)则存在中度负相关。

结论:高度近视脉络膜毛细血管改变非均匀同步,存在明显时空异质性:后极部早期代偿性密度升高,随后转为弥漫性降低;颞侧则更早失代偿,提示区域特异性缺氧与血管重塑差异。高度近视患者脉络膜发生萎缩性重构,反映高度近视患者存在脉络膜变薄,血管层优先萎缩的特征性改变可作为评估近视性脉络膜缺血与血管重塑的敏感影像学指标。

关键词:脉络膜血流;脉络膜基质;高度近视;扫频源光学相干断层血管成像技术(SS-OCTA);脉络膜基质指数
DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.12.06

Differential remodeling of choroidal vasculature and stroma in high myopia: a quantitative ultra-wide-field SS-OCTA study

Lei Anqi[1,2], Li Rui[1], Hu Weiqun[1], Wang Zexu[1,2], Zou Chunmei[1,2], Zhang Danna[1]

Foundation item: Xiaogan Natural Science Program Project (No. XGKJ2024010047)
[1]Department of Ophthalmology, Xiaogan Hospital Affiliated to Wuhan University of Science and Technology, Xiaogan 432100, Hubei Province, China; [2]Medical College of Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000, Hubei Province, China
Correspondence to: Zhang Danna. Department of Ophthalmology, Xiaogan Hospital Affiliated to Wuhan University of Science and Technology, Xiaogan 432100, Hubei Province, China. 2419910230@qq.com
Received:2026-05-27 Accepted:2026-10-15

Abstract

• AIM: To investigate the associations of choroidal structural and blood flow density changes with myopia progression using ultra-wide-field swept-source optical coherence tomography angiography (SS-OCTA).

• METHODS: This was a cross-sectional study. Participants aged 18-50 y with pre-myopia or myopia were enrolled and categorized according to spherical equivalent (SE) into the emmetropia and low myopia group (-3.00 D<SE≤+0.75 D), moderate myopia group (-6.00 D <SE≤-3.00 D), and high myopia group (SE≤ -6.00 D). Macular scanning of 24 mm × 20 mm was performed using a 400 kHz SS-OCTA. Choriocapillaris flow density (CCD), choroidal stromal volume per unit area (CSV/a), and choroidal stromal index (CSI) were quantified in nine subregions.

• RESULTS: A total of 120 patients (120 eyes) were enrolled. The emmetropia and low myopia group included 29 patients (7 males, 22 females), aged 31.0 (21.0, 37.0) y. The moderate myopia group included 25 patients (7 males, 18 females), aged 32.0 (22.0, 36.0) y. The high myopia group included 66 patients (27 males, 39 females), aged 34.0 (27.0, 41.0) y. With increasing myopic refractive error, CCD and CSV/a decreased significantly in most regions, while CSI increased compensatorily (all $P<0.05$). Temporal CCD exhibited an inverted U-shaped relationship with the axial length-to-

anterior chamber depth ratio (b_2 = -22.77, P<0.001, R^2 = 0.856), with the inflection point at a ratio of 3.05. The overall analysis showed that the monocular mean CSV/a was significantly negatively correlated with CSI (ρ = -0.546, P<0.001). At the sectoral level, moderate negative correlations were observed in the nasal (ρ = -0.364, P< 0.001) and inferior sectors (ρ = -0.383, P< 0.001). CCD increased compensatorily before the inflection point and decreased markedly after the inflection point.

• CONCLUSION: Choriocapillaris alterations in high myopia are non-uniform and asynchronous, with obvious spatiotemporal heterogeneity. The posterior pole shows an early compensatory increase in density, followed by diffuse reduction; the temporal region becomes decompensated earlier, indicating regional - specific differences in hypoxia and vascular remodeling. Atrophic choroidal remodeling occurs in high myopia, reflecting the characteristic change of choroidal thinning with preferential atrophy of the vascular layer. This may act as a sensitive imaging indicator for evaluating myopic choroidal ischemia and vascular remodeling.

• KEYWORDS: choroidal blood flow; choroidal stroma; high myopia; swept - source optical coherence tomography angiography (SS - OCTA); choroidal stromal index

Citation: Lei AQ, Li R, Hu WQ, et al. Differential remodeling of choroidal vasculature and stroma in high myopia: a quantitative ultra-wide-field SS-OCTA study. Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci), 2026,26(12):2101-2107.

0 引言

近视已经成为一个日益严重且备受关注的全球性公共卫生问题,目前全球近视患病率超过 28.3%,高度近视患病率为 4.0%,预计 2050 年,近视患病率将达到 49.8%,高度近视患病率将达到 9.8%[1-2]。近视的发展伴随着眼底血液循环和结构特征的改变,而高度近视患者的视网膜和脉络膜常常会出现代谢异常,从而极大程度地影响了视网膜和脉络膜血流灌注。此外,眼轴的机械性延伸同样可引起脉络膜和视网膜色素上皮层的厚度减少,最终导致高度近视患者出现一系列的眼部退行性病变。

此前聚焦于关于 HM 患者视网膜脉络膜血流灌注和厚度的研究多集中于视网膜的血流和厚度变化,以及脉络膜毛细血管层的血流和脉络膜厚度的变化[3-4],且大部分研究成像范围为 12 mm×12 mm,鲜少有在 20 mm×24 mm 范围内评估随着近视度数的增长黄斑中心及中周边范围内脉络膜毛细血管血流密度(choriocapillaris flow density, CCD)是否存在代偿,并探究单位面积脉络膜基质体积(choroidal stromal volume per unit area,CSV/a)与脉络膜基质指数(choroidal stroma index, CSI)是否存在相关性,以及其与轴率比的关联。多项研究比较超广角扫频源光学相干断层扫描技术(SS-OCT)与谱域-OCT(SD-OCT)的脉络膜成像能力,发现 SS-OCT 相较 SD-OCT(无论是否使用 EDI 方法)能更准确地识别正常眼的脉络膜巩膜交界面[5-6]。既往大多数光学相干断层扫描(OCT)系统扫描的多为黄斑区域[7-12],发现周边视网膜或脉络膜病变的能力有限,因此 SS-OCT 为探索脉络膜周边区域的改变提供了有用的工具[13-15]。而超广角扫频源光学相干断层扫描血管成像(SS-OCTA)技术的发展有助于我们深入探究近视进展过程中脉络膜血管特征,据此,本研究采用扫描范围24 mm×20 mm 的 SS-OCTA 技术,对高度近视患眼与对照眼的脉络膜血管变化进行定量对比分析,旨在进一步阐明高度近视脉络膜灌注的机制,为高度近视的防控及其眼底病理性改变的防治提供理论依据。

1 对象和方法

1.1 对象 采用横断面研究设计,收集 2025 年 2 月至 2025 年 9 月于武汉科技大学附属孝感医院就诊的参与者,将年龄匹配的参与者按照等效球镜度数(SE)分为三组,分别为正视及低度近视组(-3.00 D<SE≤+0.75 D)、中度近视组(-6.00 D < SE ≤ -3.00 D)和高度近视组(SE ≤ -6.00 D)[16]。纳入标准:(1)年龄 18-50 岁;(2)眼压为 10-21 mmHg(1 mmHg = 0.133 kPa);(3)最佳矫正视力(BCVA)≥0.8,该条件一方面用于初步排除伴视功能损害的病理性近视,另一方面保障参与者可配合完成SS-OCTA 扫描,获取合格影像数据。正视及低度近视组以及中度近视组若双眼均符合纳入标准,随机纳入一眼;高度近视患者若双眼均符合纳入标准,纳入眼轴较长眼。排除标准:(1)有高血压和糖尿病等全身性疾病史者;(2)有玻璃体手术或玻璃体腔注射治疗史者;(3)有糖尿病视网膜病变、视网膜脱离等眼底疾病史者;(4)由于固视不良或屈光介质严重混浊而无法获得高质量眼底图像者。本研究遵循《赫尔辛基宣言》,研究方案取得武汉科技大学附属孝感医院伦理委员会批准(批文号:会 KY-2025063008),所有参与者均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 常规眼科检查 所有参与者均采用标准对数视力表检查最佳矫正视力,采用非接触眼压计测量眼压;采用电脑角膜验光仪行电脑验光,检查最佳矫正视力及屈光状态;采用裂隙灯显微镜检查眼前节情况,采用 IOL Master 500 测量被检者眼轴长度(AL,mm)。轴率比定义为 AL 与平均角膜曲率半径(CR,mm)的比值(AL/CR)。平均角膜曲率取平坦 K1、陡峭 K2 的算术平均值;角膜曲率半径由公式 $CR = 337.5/K_{mean}$ 换算获得。

1.2.2 SS-OCTA 检查 所有参与者均采用 400 kHz SS-OCTA设备,以中心凹为中心行 24 mm×20 mm 范围扫描,扫描模式为 1 536(水平)×1 280(垂直)B 扫描光栅模式。设备内置人工智能算法可自动识别 Bruch 膜及脉络膜-巩膜界面,其中脉络膜中大血管层定义为 Bruch 膜下 29 μm 至脉络膜-巩膜界面区间,并由机器自带的人工智能技术自动分割血管管腔与基质组织。在 enface 层面,将扫描区域平均分为 9 个分区,以中央 8.0 mm×6.7 mm 区域作为包含黄斑在内的中央区。采用设备配套软件自动测量 CSI(即脉络膜基质面积与脉络膜总面积的百分比);CSV/a[即脉络膜基质(非血管部分)在单位面积下的体积];同时测量 CCD(脉络膜毛细血管血流信号面积与所选区域面积的百分比)。

统计学分析:采用 SPSS 27.0 统计学软件对数据进行数据分析。运用 Kolmogorov-Smirnov 检验对计量资料进行正态分布检验,满足正态分布的计量资料用($\bar{x} \pm s$)表示,三组间比较采用单因素方差分析,多组间两两比较采用 Bonferroni 法校正,校正后检验水准 $\alpha = 0.0167$;偏态分

布的计量资料采用 $M(P_{25},P_{75})$ 表示,三组间比较采用 Kruskal-Wallis H 检验,两两比较采用 Dunn-Bonferroni 法校正,校正后检验水准 $P<0.05$;计数资料采用 χ^2 检验,相关性分析采用 Spearman 相关检验。非线性关系采用二次回归模型检验。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料比较 三组年龄、性别构成、眼压差异无统计学意义(均 $P>0.05$);高度近视组轴率比、SE 数值显著高于正视及低度近视组和中度近视组(均 $P<0.0167$),见表 1。

2.2 三组 CCD 与 CSV/a 及 CSI 比较

2.2.1 各组 CCD 在不同区域的比较 在 9 个区域中,三组间鼻上方、上方、颞上方、鼻侧、颞侧、颞下方的 CCD 差异有统计学意义(均 $P<0.05$),其余 3 个区域(中央、鼻下、下方)差异无统计学意义,且鼻上方、颞上方、鼻侧、颞侧、颞下方高度近视组 CCD 均低于正视及低度近视组(均 $P<0.05$),见表 2。

2.2.2 各组 CSV/a 在不同区域的比较 在 9 个区域中,三组 CSV/a 差异有统计学意义(均 $P<0.05$),其中鼻侧和颞下区域差异尤为显著。两两比较校正后,除颞上、鼻上外,高度近视组 CSV/a 均显著低于正视及低度近视组(均 $P<0.05$),见表 3。

2.2.3 各组 CSI 在不同区域的比较 三组间 CSI 在除上方、下方以外的7个区域中,差异有统计学意义(均$P<$

表 1 各组一般资料比较

组别	n	年龄[$M(P_{25},P_{75})$,岁]	性别构成(男/女,例)	眼压($\bar{x}\pm s$,mmHg)	轴率比($\bar{x}\pm s$)	SE($\bar{x}\pm s$,D)
正视及低度近视组	29	31.0(21.0,37.0)	7/22	14.97±2.37	3.10±0.09	−1.84±0.84
中度近视组	25	32.0(22.0,36.0)	7/18	15.00±2.38	3.22±0.08[a]	−4.48±0.86[a]
高度近视组	66	34.0(27.0,41.0)	27/39	15.21±2.38	3.44±0.14[a,b]	−8.49±2.43[a,b]
$H/F/\chi^2$		5.76	3.05	0.13	98.95	135.00
P		0.06	0.22	0.88	<0.01	<0.01

注:正视及低度近视组为−3.00 D<SE≤+0.75 D;中度近视组为−6.00 D<SE≤−3.00 D;高度近视组为 SE≤−6.0 D;[a]$P<0.0167$ *vs* 正视及低度近视组;[b]$P<0.0167$ *vs* 中度近视组。

表 2 各组不同区域 CCD 比较 [$M(P_{25},P_{75})$,%]

组别	n	鼻上	上方	颞上	鼻侧	中央
正视及低度近视组	29	48.69(47.00,51.00)	48.03(47.00,49.00)	47.83(46.00,50.00)	46.59(45.00,48.00)	46.59(46.00,48.00)
中度近视组	25	44.24(40.50,49.00)	48.36(47.00,49.00)	45.36(40.00,49.50)	44.16(42.00,47.00)	46.44(45.50,47.00)
高度近视组	66	44.08(40.75,50.00)[a]	46.93(47.00,48.25)[b]	41.45(35.75,49.00)[a]	44.45(43.00,47.00)[a]	46.14(45.75,48.00)
H		8.659	6.610	11.255	9.230	0.537
P		0.013	0.037	0.004	0.010	0.764
组别	n	颞侧	鼻下	下方	颞下	
正视及低度近视组	29	45.93(45.50,47.50)	43.03(38.00,48.50)	47.24(46.50,49.00)	40.93(37.00,46.50)	
中度近视组	25	44.40(42.50,47.00)	40.88(35.50,46.00)	47.08(45.50,48.50)	35.32(31.50,41.50)	
高度近视组	66	42.44(39.00,47.00)[a]	40.45(35.00,46.00)	45.68(45.00,49.00)	35.27(37.00,46.50)[a]	
H		10.623	3.130	3.634	9.948	
P		0.005	0.209	0.163	0.007	

注:正视及低度近视组为−3.00 D<SE≤+0.75 D;中度近视组为−6.00 D<SE≤−3.00 D;高度近视组为 SE≤−6.0 D;[a]$P<0.05$ *vs* 正视及低度近视组;[b]$P<0.05$ *vs* 中度近视组。

表 3 各组不同区域 CSV/a 比较 $\mu m^3/\mu m^2$

组别	n	鼻上($\bar{x}\pm s$)	上方[$M(P_{25},P_{75})$]	颞上($\bar{x}\pm s$)	鼻侧($\bar{x}\pm s$)	中央[$M(P_{25},P_{75})$]
正视及低度近视组	29	107.03±26.43	116.52(86.50,149.50)	109.76±22.34	99.34±24.86	125.66(85.50,148.50)
中度近视组	25	111.12±31.36	103.84(75.00,115.00)	101.36±20.40	99.64±28.08	103.4(85.50,122.00)
高度近视组	66	95.05±28.45	91.36(72.00,112.00)[a]	95.24±25.82	80.92±25.57[b,d]	89.62(68.00,109.25)[a]
H/F		3.633	7.785	3.739	7.601	12.742
P		0.029	0.020	0.027	<0.001	0.002
组别	n	颞侧($\bar{x}\pm s$)	鼻下($\bar{x}\pm s$)	下方[$M(P_{25},P_{75})$]	颞下[$M(P_{25},P_{75})$]	
正视及低度近视组	29	118.24±36.16	71.45±21.03	82.55(57.50,102.50)	93.07(73.50,109.00)	
中度近视组	25	113.68±30.38	67.76±15.53	68.32(55.50,82.00)	91.68(77.50,100.50)	
高度近视组	66	96.74±27.59[b]	59.89±14.37[b]	63.36(46.75,73.25)[a]	76.64(62.75,87.25)[a,c]	
H/F		6.183	5.669	9.032	14.115	
P		0.003	0.010	0.004	<0.001	

注:正视及低度近视组为−3.00 D<SE≤+0.75 D;中度近视组为−6.00 D<SE≤−3.00 D;高度近视组为 SE≤−6.0 D;[a]$P<0.05$,[b]$P<0.0167$ *vs* 正视及低度近视组;[c]$P<0.05$,[d]$P<0.0167$ *vs* 中度近视组。

0.05)。中度近视组与正视及低度近视组相比,除鼻上方差异有统计学意义外(P<0.05),其他区域差异均无统计学意义;高度近视组在鼻上、颞上、鼻侧、颞侧、鼻下、颞下分区 CSI 显著高于正视及低度近视组(均 P<0.05),中央分区高度近视组 CSI 高于中度近视组(P<0.05),表明 CSI 代偿升高主要出现于高度近视阶段,并且存在明显区域异质性,见表 4。

2.3 CCD 与轴率比呈倒 U 型关系　根据此前研究结果,高度近视组颞侧各指标相较正视及低度近视组表现出较稳定的变化,可以体现眼轴牵拉带来的非线性损伤效应,更贴合高度近视脉络膜病理改变特征。故本实验以中心化后的轴率比为自变量,颞侧 CCD 为因变量建立二次回归模型。结果显示,颞侧 CCD 与轴率比呈显著倒 U 型二次曲线关系(二次项系数 b_2 = −22.77,一次项系数 b_1 = −11.85,均 P<0.001,R^2 = 0.856),计算拐点位于轴率比 = 3.05。在轴率比<3.05 时,颞侧 CCD 呈代偿性上升趋势;超过该阈值后,CCD 随轴率比升高而显著下降,见图 1。提示在眼轴增长早期存在代偿性血管密度升高,超过阈值后进入失代偿下降阶段。

2.4 CSV/a 与 CSI 呈显著负相关　本研究通过两个层级的 Spearman 相关分析对 CSV/a 与 CSI 相关性进行检测,分别进行分区水平分析和整体水平分析。分区水平分析将每只眼 9 个扫描分区分别作为观测单元,共纳入1 080 个眼-分区配对检测,以 0.1≤|ρ|<0.3 为弱负相关,0.3≤|ρ|<0.5 为中度负相关,结果可见鼻侧(ρ = −0.364,P<0.001)、下方(ρ = −0.383,P<0.001)CSV/a 与 CSI 呈中度负相关;鼻下方呈弱负相关(ρ = −0.209,P = 0.022);其余分区未见显著相关性,见图 2。

整体水平分析见图 3,先对单眼 9 个分区指标取算术平均值,以受检眼为独立观测单元(n = 120),得到 ρ = −0.546(P<0.001),根据 SE 将所有研究眼划分为三个亚组。在各亚组内,分别采用 Spearman 秩相关分析探讨 CSV/a 与 CSI 的相关性;亚组内相关性分析均基于单眼 9 个黄斑分区测量值取平均后的眼水平数据,见图 4。亚组相关性分析结果显示,正视及低度近视组(ρ = −0.626,P<0.001)与高度近视组(ρ = −0.538,P<0.001)CSV/a 与 CSI 均存在显著负相关;而中度近视组 CSV/a 与 CSI 相关性无统计学意义(ρ = −0.245,P = 0.238),提示中度近视阶段脉络膜基质绝对体积与基质相对占比之间尚未建立稳定的反向代偿关联。由分区数据聚合为单眼均值的过程消除了眼内不同方位的局部差异性,受聚合偏误影响,相关系

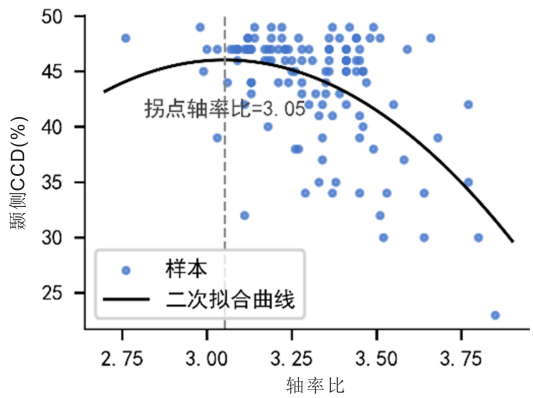


图 1　颞侧 CCD 与轴率比的倒 U 型关系　采用中心化后的轴率比进行二次回归分析。灰色垂直虚线为轴率比 = 3.05,黑色实线为二次拟合曲线,散点为各参与者数据。

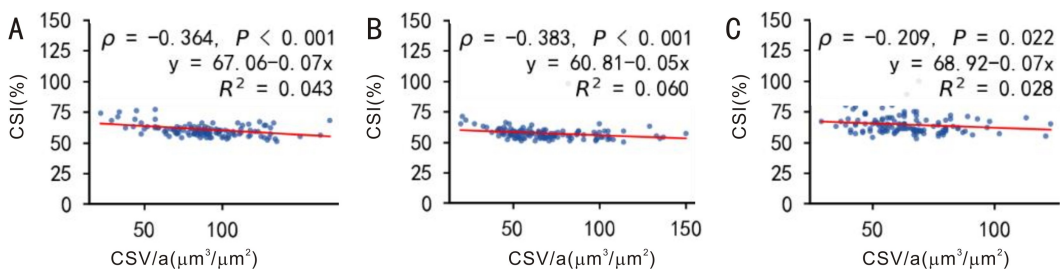


图 2　鼻侧与下方以及鼻下方 CSV/a 与 CSI 的相关性散点图　A:鼻侧;B:下方;C:鼻下方;实线为线性拟合线。

表 4　各组不同区域 CSI 比较　[$M(P_{25},P_{75})$,%]

组别	n	鼻上	上方	颞上	鼻侧	中央
正视及低度近视组	29	58.55(54.50,58.00)	60.03(55.00,59.00)	57.48(54.00,58.50)	60.41(55.50,60.00)	61.72(57.00,61.00)
中度近视组	25	61.08(57.00,64.50)[a]	55.76(54.00,57.00)	56.00(54.00,62.50)	60.20(58.00,62.00)	57.12(55.50,58.00)
高度近视组	66	60.30(56.75,64.00)[a]	56.82(54.75,58.25)	61.42(56.00,66.25)[a]	61.06(57.00,63.00)[a]	59.26(57.00,61.25)[b]
H		14.329	2.939	11.168	10.068	11.027
P		<0.001	0.230	0.004	0.007	0.004

组别	n	颞侧	鼻下	下方	颞下
正视及低度近视组	29	61.93(58.00,63.00)	61.07(57.50,61.50)	57.00(53.00,58.50)	61.03(56.50,63.00)
中度近视组	25	62.72(59.00,67.00)	63.56(59.00,68.00)	56.08(54.00,58.50)	64.28(59.00,70.50)
高度近视组	66	63.82(59.00,68.00)[a]	66.15(61.00,70.00)[a]	57.71(55.00,60.00)	65.06(60.00,70.25)[a]
H		6.867	20.010	4.066	9.184
P		0.032	<0.001	0.131	0.010

注:正视及低度近视组为−3.00 D<SE≤+0.75 D;中度近视组为−6.00 D<SE≤−3.00 D;高度近视组为 SE≤−6.0 D;[a]P<0.05 *vs* 正视及低度近视组;[b]P<0.05 *vs* 中度近视组。

数绝对值出现小幅变化,但局部易感分区和全眼整体层面分析均提示 CSV/a 与 CSI 存在负相关。

3 讨论

脉络膜是位于巩膜与 Bruch 膜之间的高度血管化组织,主要功能是通过血流为视网膜外层提供氧气和营养[17-18],其他功能包括光吸收、调节体温、通过调节脉络膜血流调节眼压[19]。研究发现脉络膜还可通过厚度的变化来调整视网膜位置,以及释放参与调节血管形成、巩膜重塑和眼生长调节的生长因子[20-23]。脉络膜血容量异常或血流受损可导致光感受器的功能障碍和死亡[24]。

目前认为脉络膜血管结构和血流的变化可能在近视性眼底病变的发展中起重要作用[11,25-26]。既往研究提示,脉络膜不仅参与多种脉络膜视网膜疾病的发病机制,还参与调控眼球生长与近视发生。值得注意的是:Zhang 等[27]最近的研究发现脉络膜血流灌注的减少与人类近视的进展存在潜在关联,目前也有越来越多的观点认为脉络膜在眼部生长和近视等异常屈光状态的发展中起到重要作用[21]。因此,阐明近视进展中脉络膜结构以及血管特征变化对深入研究其病理机制及预防和治疗高度近视至关重要。有文献总结,既往多数 SS-OCTA 近视相关研究局限于黄斑小范围扫描,重点关注黄斑中心凹下脉络膜整体厚度与血管指数改变,较少关注黄斑联合近周边眼底多分区的参数异质性分析[28]。本研究采用 24 mm×20 mm 超广角 SS-OCTA,将扫描区域划分为 9 个分区,分别测算各分区 CCD、CSV/a 与 CSI,进一步结合轴率比指标,揭示高度近视进程中脉络膜血管-基质改变存在区域差异性,可为理解高度近视脉络膜区域性代偿重塑提供更多参考证据。本研究利用超广角 SS-OCTA 对不同程度近视眼脉络膜多个分区的血管及基质指标进行定量分析,结果显示,随近视程度由低度向高度进展,多数区域 CCD 与 CSV/a 进行性下降,而 CSI 代偿性升高,呈现“结构减低、功能代偿”的典型微循环变化模式。

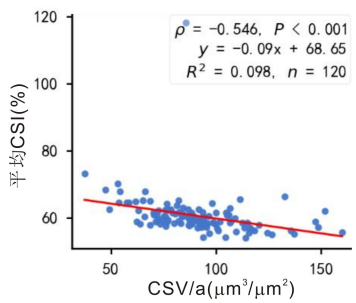


图 3 CSV/a 与 CSI 整体水平分析的相关性散点图 CSV/a 和 CSI 均为各眼 9 个测量区域的平均值,红色实线为线性拟合线。ρ 为 Spearman 相关系数,R^2为决定系数。

本研究结果和既往同类文献既有一致性也存在部分差异。Cheng 等[29]发现非病理性高度近视的脉络膜毛细血管灌注缺损主要集中于 3-6 mm 周边区域,黄斑中心受累较轻,与本研究中央区 CCD 组间无统计学差异、近周边区域指标显著下降的结果相吻合。Liang 等[20]与 Si 等[25]利用超广角 SS-OCTA 同样观察到高度近视患者多区域脉络膜血管受损,但该研究仅分析了脉络膜厚度与血流密度,没有区分血管腔和基质的容积,无法揭示血管-基质组成失衡的重构模式。Cao 等[30]提出儿童屈光参差人群中发现轻中度近视即可出现脉络膜毛细血管灌注下降,与本研究成人样本结果存在一定差异。分析差异来源:(1)研究人群不同,儿童眼球尚处于生长发育期,脉络膜对屈光改变、眼轴牵拉的反应更为敏感;本研究纳入 18-50 岁成年人,眼球发育已定型,脉络膜的改变是长期机械牵拉的累积效应;(2)扫描范围与分区方案不同,多数既往研究采用 12 mm×12 mm 黄斑扫描,本研究 24 mm×20 mm 超广角模式纳入更多近周边眼底组织;(3)设备分割算法有差异,不同厂家 SS-OCTA 设备对脉络膜血管腔、基质的自动分割判定标准不完全一致,会造成参数绝对值存在偏差,但指标变化趋势具备可对比性。并且通过进一步非线性分析发现,CCD 与轴率比之间呈先升后降的倒 U 型关系,拐点大约位于轴率比 3.05。在眼轴伸长早期,局部毛细血管可通过代偿性扩张将血流密度短暂的增加来维持视网膜灌注;轴率比突破临界值后,毛细血管网受压变得稀疏、灌注失去代偿,CCD 显著下降。这一动态过程提示,轴率比可作为近视性脉络膜缺血由代偿转向失代偿的一个潜在转折指标,有助于识别脉络膜微循环从代偿转为失代偿的高危个体,服务于高度近视人群风险分层,指导高风险对象加强随访监测,助力病理性近视眼底改变的早期预警。本研究全部参数均可通过无创 SS-OCTA 获取,检查可重复性较好,适合临床常规随访使用。

CSV/a 代表单位面积脉络膜基质的容积,为脉络膜基质的绝对体积。我们发现高度近视患者各区域 CSV/a 均较正视及低度近视组有明显下降,这一分布特点与 CCD 的减低区域有重叠。CSV/a 的下降意味着随近视进展,脉络膜基质成分的绝对体积呈进行性减少,脉络膜整体组织结构向萎缩方向发展。然而,在除了中央区域外 CSI 却在反向升高,尤其在鼻上、鼻下等周边区域。CSI 升高代表基质成分在脉络膜总面积中的占比增加,这一表面上矛盾

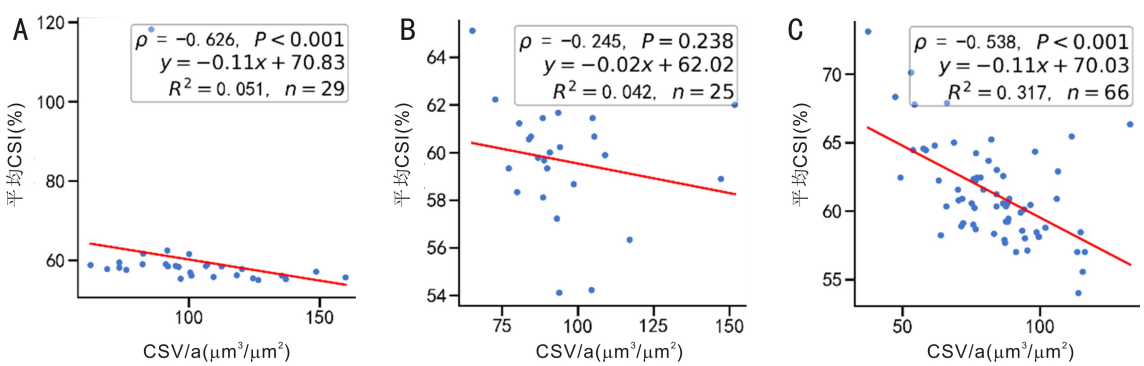


图 4 不同近视程度亚组中 CSV/a 与 CSI 的相关性散点图 A:正视及低度近视组;B:中度近视组;C:高度近视组;实线为线性拟合线,ρ 为 Spearman 相关系数,n 为各组样本量。

的现象其实蕴含重要的病理生理学含义:当脉络膜整体厚度变薄、总容积减少时,如果血管管腔的萎缩速率超过了基质成分的塌陷速度,基质在残存脉络膜组织中所占的相对比例反而会被动增加。基质绝对体积的减少(CSV/a 下降)与基质相对占比的增大(CSI 升高)同时存在,说明脉络膜总容积缩减过程中,血管成分的丢失比基质成分的丢失更为严重。从解剖结构来分析,脉络膜毛细血管层缺少完整的肌壁结构,在眼轴拉长导致的机械牵拉作用下更容易塌陷、闭锁和萎缩;而脉络膜大血管层虽然具有较厚的平滑肌壁,但也难以完全抵挡持续性的被动扩张,最终出现管腔狭窄、血流减少。这种"总容积萎缩、血管丢失更甚、基质相对富集"的差异性重塑的特征,反映了高度近视眼底微循环由代偿向失代偿过渡的动态病理生理过程,提示上述指标可以用于评估近视性脉络膜萎缩与血管丢失。

分区相关性分析显示鼻侧($\rho=-0.364$,$P<0.001$)、下方($\rho=-0.383$,$P<0.001$)CSV/a 与 CSI 呈中等负相关,鼻下($\rho=-0.209$,$P=0.022$)呈弱负相关;单眼平均 CSV/a 与 CSI 同样存在显著负相关($\rho=-0.546$,$P<0.001$),提示脉络膜血管与基质此消彼长的重构改变,在局部易感分区及全眼整体层面均可被观察到。值得注意的是,CSV/a 与 CSI 的负向关联仅在正视及低度近视组、高度近视组中显现,中度近视组二者无统计学相关性($\rho=-0.245$,$P=0.238$),提示脉络膜血管-基质重构并不随近视度数升高呈线性变化,中度近视是由良性代偿向病理性失代偿过渡的中间阶段。该阶段眼轴牵拉效应已作用于脉络膜,但损伤模式个体异质性较强,毛细血管与基质的受损比例不一,尚未形成稳定的反向变化规律;进展至高度近视后,持续牵拉诱发血管层广泛性优先萎缩,血管丢失程度超过基质消耗,重构模式趋于同质化,再次出现显著负相关。上述结果提示,CSV/a 与 CSI 的负相关是高度近视特征性影像学改变,该指标组合评估中度近视脉络膜重构的价值有限,对于中度近视参与者,需联合 CCD、多分区指标综合评估,识别隐匿、异质性较强的早期脉络膜改变。

本研究的创新点主要包含三方面:(1)采用 24 mm×20 mm 大视野 SS-OCTA,设置 9 分区定量分析策略,突破传统黄斑局限扫描的限制,证实高度近视脉络膜损伤存在明显空间异质性,颞侧近周边对眼轴牵拉更敏感,较早出现脉络膜微循环重构改变,是高度近视脉络膜损伤的易感区域,分区统计结果显示,高度近视患者颞侧区域 CCD、CSV/a 出现显著下降(均 $P<0.05$),而中央黄斑区尽管 CSV/a 组间差异具有统计学意义($P=0.002$),CCD 组间差异却无统计学意义,提示脉络膜重构改变优先出现于颞侧近周边区域,黄斑中心不同指标改变存在差异性;且二次回归分析提示颞侧 CCD 与轴率比存在倒 U 型关系,代偿-失代偿转换拐点位于轴率比 3.05,提示颞侧微循环对眼轴机械牵拉更为敏感,更早由代偿灌注转向灌注丢失,进一步证明该区域是脉络膜缺血损伤的易感部位,可为高度近视眼底损伤的早期识别提供分区参考证据。既往多数 SS-OCTA 近视相关研究局限于黄斑小范围扫描,重点关注黄斑中心凹下脉络膜整体厚度与血管指数改变,较少关注黄斑联合近周边眼底多分区的指标异质性分析,本研究超广角成像策略弥补了这一不足;(2)同时检测CSV/a、CSI 两套指标、反映脉络膜重构:CSV/a 为基质单位面积绝对容积,CSI 为基质的相对占比。随近视进展 CSV/a 下降(基质绝对量减少),而 CSI 升高(基质相对占比增加),二者呈显著负相关,提示脉络膜萎缩过程中血管腔成分丢失幅度大于基质,表现为血管层优先受累的差异性重构;单纯依靠相对占比指标会掩盖基质绝对体积下降的真实改变,两套指标联合评估才能客观反映近视性脉络膜萎缩的病理改变,揭示高度近视脉络膜血管层优先萎缩的病理特征;(3)发现颞侧 CCD 与轴率比的倒 U 型变化规律,提出脉络膜微循环代偿-失代偿转换的参考阈值,为理解高度近视脉络膜动态损伤过程补充新的影像学证据。

本研究尚存在一定局限性:(1)本研究为横断面研究,仅能够揭示各指标间的相关性,无法确立变量之间的因果关系,脉络膜结构与血流的动态变化仍有待纵向队列研究进一步验证;(2)本研究样本量有限,纳入参与者均为 18-50 岁成年人,研究结论外推至青少年及老年人群时需谨慎;(3)本研究高度近视纳入主要依据等效球镜 SE ≤-6.00 D,包含部分曲率性高度近视病例,虽然曲率性近视样本占比较低,对整体统计趋势干扰较小,且我们将 CCD 与轴率比相比较,得出两者关系,一定程度上校正了角膜曲率的个体差异,但无法完全区分轴性因素与角膜陡峭所致曲率近视的独立效应,后续研究可将两类近视分开分析;(4)本研究采用超广角 OCTA 对黄斑及近周边区域进行 9 分区量化分析,但并未涵盖远周边眼底,无法反映全周周边脉络膜的改变;(5)脉络膜血管与基质分割依赖设备内置人工智能算法,图像质量会直接影响分割精度,不同设备检测得到的参数不能直接互相套用。后续可开展多中心、大样本的纵向随访研究,区分轴性、曲率性近视,进一步探究近视进展过程中脉络膜血管-基质代偿重塑的深层机制;(6)本研究将最佳矫正视力 BCVA≥0.8 列为纳入标准,目的是保障受试者可以配合完成超广角 SS-OCTA扫描,获取合格的影像数据;但这一条件排除了 BCVA<0.8 的病理性高度近视患者,研究结论仅适用于最佳矫正视力保留较好的 18-50 岁近视人群,无法代表已经发生视功能损害的高度近视眼;(7)本研究中单眼平均 CSV/a、平均 CSI 为 9 个眼底分区指标的聚合均值,该整体水平分析存在一定局限性:对各分区指标取均值会消除眼内不同区域脉络膜重构的局部异质性,掩盖鼻侧、下方、鼻下方局灶性损伤特征,产生聚合偏倚。因此,整体水平的相关结果仅反映单眼脉络膜成分改变的平均趋势,不能替代分区分析,仅能描述两类成分占比的相对消长关系。

综上所述,高度近视患者脉络膜毛细血管改变并不是均匀同步的,而是表现出明显的时空异质性:后极部在早期先发生代偿性密度增高,随病情发展慢慢变为弥漫性降低,旁中心凹及周边区则更早就进入了失代偿的状态。脉络膜血管的重塑也有分层特异性,具体表现为 CCD 下降、CSV/a 下降与 CSI 相对增加三者同时存在,呈现出一种彼此分离的变化趋势。这些结果从影像学上为理解近视性脉络膜缺血和血管重塑提供了新的证据,而且通过 SS-OCTA这种无创手段获取的量化指标,有望在高度近视眼底病变的早期预警和随访监测中发挥参考作用。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。
作者贡献声明:雷安琪论文选题与修改,初稿撰写;李锐、胡卫群、王泽旭、邹春梅文献检索,数据分析;张丹娜选题

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] Holden BA, Fricke TR, Wilson DA, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050. Ophthalmology, 2016,123(5):1036-1042.
[2] Baird PN, Saw SM, Lanca C, et al. Myopia. Nat Rev Dis Primers, 2020,6:99.
[3] Azemin MZ, Daud NM, Hamid FA, et al. Influence of refractive condition on retinal vasculature complexity in younger subjects. Sci World J, 2014,2014:783525.
[4] Shimada N, Ohno-Matsui K, Harino S, et al. Reduction of retinal blood flow in high myopia. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2004,242(4):284-288.
[5] Copete S, Flores-Moreno I, Montero JA, et al. Direct comparison of spectral-domain and swept-source OCT in the measurement of choroidal thickness in normal eyes. Br J Ophthalmol, 2014,98(3):334-338.
[6] Adhi M, Liu JJ, Qavi AH, et al. Choroidal analysis in healthy eyes using swept-source optical coherence tomography compared to spectral domain optical coherence tomography. Am J Ophthalmol, 2014,157(6):1272-1281.e1.
[7] Liu L, Zhu CC, Yuan Y, et al. Three-dimensional choroidal vascularity index in high myopia using swept-source optical coherence tomography. Curr Eye Res, 2022,47(3):484-492.
[8] Wang YY, Chen SS, Lin J, et al. Vascular changes of the choroid and their correlations with visual acuity in pathological myopia. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2022,63(12):20.
[9] Wu H, Zhang GY, Shen MX, et al. Assessment of choroidal vascularity and choriocapillaris blood perfusion in anisomyopic adults by SS-OCT/OCTA. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2021,62(1):8.
[10] Zheng FH, Chua J, Ke MY,et al. Quantitative OCT angiography of the retinal microvasculature and choriocapillaris in highly myopic eyes with myopic macular degeneration. Br J Ophthalmol, 2022,106(5):681-688.
[11] Milani P, Montesano G, Rossetti L, et al. Vessel density, retinal thickness, and choriocapillaris vascular flow in myopic eyes on OCT angiography. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2018,256(8):1419-1427.
[12] Luo H, Sun JF, Chen L, et al. Compartmental analysis of three-dimensional choroidal vascularity and thickness of myopic eyes in young adults using SS-OCTA. Front Physiol, 2022,13:916323.
[13] McNabb RP, Grewal DS, Mehta R, et al. Wide field of view swept-source optical coherence tomography for peripheral retinal disease. Br J Ophthalmol, 2016,100(10):1377-1382.
[14] Lim HB, Kim K, Won YK, et al. A comparison of choroidal thicknesses between pachychoroid and normochoroid eyes acquired from wide-field swept-source OCT. Acta Ophthalmol, 2021,99(1):e117-e123.
[15] Hoseini-Yazdi H, Vincent SJ, Collins MJ, et al. Wide-field choroidal thickness in myopes and emmetropes. Sci Rep, 2019,9:3474.
[16] 中华医学会眼科学分会眼视光学组, 中国医师协会眼科医师分会眼视光专业委员会, 中国非公立医疗机构协会眼科专业委员会视光学组, 等. 高度近视防控专家共识(2023). 中华眼视光学与视觉科学杂志(中英文), 2023,25(6):401-407.
[17] Read SA, Fuss JA, Vincent SJ, et al. Choroidal changes in human myopia: insights from optical coherence tomography imaging. Clin Exp Optom, 2019,102(3):270-285.
[18] Gonzales AL, Paikai A, Maeng D. Interplay of retinal and choroidal vasculatures in ocular health and disease. Retinal Degenerative Diseases XX. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025:459-463.
[19] Nickla DL, Wallman J. The multifunctional choroid. Prog Retin Eye Res, 2010,29(2):144-168.
[20] Liang RB, Yang RD, Ai B, et al. Structural changes in the retina and choroid in patients with different degrees of myopia. Sci Rep, 2024,14:31033.
[21] Ostrin LA, Harb E, Nickla DL, et al. IMI—the dynamic choroid: new insights, challenges, and potential significance for human myopia. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2023,64(6):4.
[22] Liu YL, Wang LJ,Xu YY, et al. The influence of the choroid on the onset and development of myopia: from perspectives of choroidal thickness and blood flow. Acta Ophthalmol, 2021,99(7):730-738.
[23] Mathis U, Ziemssen F, Schaeffel F. Effects of a human VEGF antibody(Bevacizumab) on deprivation myopia and choroidal thickness in the chicken. Exp Eye Res, 2014,127:161-169.
[24] An SY, Yu HD, Islam MM, et al. Effects of donor-specific microvascular anatomy on hemodynamic perfusion in human choriocapillaris. Sci Rep, 2023,13:22666.
[25] Si YY, Pang KP, Song YL, et al. Observation of structural and vascular features of retina and choroid in myopia using ultra-widefield SS-OCTA. BMC Ophthalmol, 2024,24(1):208.
[26] Sun L, Xue M, Tang Y, et al. Association of choroidal thickness and blood flow features with asymmetric axial lengths in children with unilateral myopic anisometropia. BMC Ophthalmol, 2024,24(1):329.
[27] Zhang S, Zhang GY, Zhou X, et al. Changes in choroidal thickness and choroidal blood perfusion in guinea pig myopia. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2019,60(8):3074-3083.
[28] 王曦, 黄潇颖, 周言, 等. 扫频源光学相干断层扫描血管成像在眼科临床中的应用进展. 国际眼科杂志, 2024,24(2):255-259.
[29] Cheng WJ, Song YH, Gao XB, et al. Axial length and choriocapillaris flow deficits in non-pathological high myopia. Am J Ophthalmol, 2022,244:68-78.
[30] Cao YW, Gu XP, Zhang YD, et al. Assessment of the effects of myopic and hyperopic anisometropia on choroidal vascular structure in children using SS-OCTA. Ophthalmic Physiol Opt, 2024,44(3):525-536.