DOI: 10.14188/j.1671-8852.2025.0228　　**文章编号** 1671-8852(2026)10-1336-09

扫频光学相干断层扫描及血管成像技术在评估不同屈光度学龄期儿童黄斑区视网膜、脉络膜参数的应用

瞿　婕　王　漫　吴国欢　王　姗　秦　惠　张　莹
武汉大学附属爱尔眼科医院(武汉爱尔眼科医院)　湖北　武汉　430064

摘要　目的：评估不同屈光度学龄期儿童黄斑区视网膜及脉络膜参数，并探究其与眼轴长度(AL)、等效球镜(SE)、角膜曲率(CC)的相关性。方法：本研究纳入2021年4月至6月武汉大学附属爱尔眼科医院就诊的学龄期儿童305例(305眼)，根据SE分为低度远视组(64眼，+0.50 D≤SE<+3.00 D)、正视组(37眼，−0.50 D<SE<+0.50 D)、低度近视组(158眼，−3.00 D≤SE<−0.50 D)、中度近视组(46眼，−6.00 D≤SE<−3.00 D)。所有受试者均行验光、AL和CC测量及扫频光学相干断层扫描及血管成像(SS-OCT/OCTA)检查，采集以中心凹为中心6 mm内的视网膜厚度(RT)、浅层毛细血管密度(SVD)及深层毛细血管密度(DVD)、脉络膜厚度(CT)、脉络膜毛细血管密度(CVD)，采用广义估计方程比较组间差异，Spearman分析相关性。结果：不同屈光度组儿童中心凹及旁中心凹RT、SVD、CT，及部分方位DVD、CVD差异显著($P<0.05$或$P<0.01$)；中心凹RT、SVD、DVD与AL正相关、与SE负相关，旁中心凹上述参数与AL负相关、与SE正相关，且相关性存在区域差异。结论：学龄期儿童近视度数增加时，中心凹RT及视网膜毛细血管密度代偿性升高，部分旁中心凹RT及毛细血管密度显著降低；中心凹与旁中心凹CT随近视进展降低，CVD无明显改变。

关键词　扫频光学相干断层扫描及血管成像；浅层毛细血管密度；深层毛细血管密度；脉络膜厚度；脉络膜毛细血管密度；近视；学龄期儿童
中图分类号　R77　　**文献标志码**　A

Application of swept-source optical coherence tomography/optical coherence tomography angiography in evaluating macular retinal and choroidal parameters in school-age children with various refractive errors

QU Jie, WANG Man, WU Guohuan, WANG Shan, QIN Hui, ZHANG Ying
Aier Eye Hospital of Wuhan University (Wuhan Aier Eye Hospital), Wuhan 430064, Hubei, China

Abstract

Objective: To evaluate macular retinal and choroidal parameters in school-age children with various refractive errors, and to explore their correlations with axial length (AL), spherical equivalent (SE) and corneal curvature (CC). **Methods:** A total of 305 school-age children (305 eyes) who underwent ophthalmic examinations at Wuhan Aier Eye Hospital from April to June 2021 were enrolled in this study. According to SE values, the subjects were divided into four groups: low hyperopia group (64 eyes, 0.50 D≤SE<3.00 D), emmetropia group (37 eyes, −0.50 D<SE<+0.50 D), low myopia group (158 eyes, −3.00 D<SE≤−0.50 D), and moderate myopia group (46 eyes, −6.00

课题来源：国家自然科学基金资助项目(编号：62176190)；湖南省自然科学基金项目(编号：2024JJ904)。
作者简介：瞿婕，女，1998—，医学硕士，主治医师，主要从事眼底疾病相关研究，E-mail：qj11341373357@163.com。
通信作者：张莹，E-mail：7814141@qq.com。

D＜SE≤－3.00 D). All subjects underwent refraction, AL measurement, CC measurement, and swept-source optical coherence tomography/optical coherence tomography angiography (SS-OCT/OCTA) examination. Parameters within a 6 mm diameter centered on the fovea were collected, including retinal thickness (RT), superficial vascular density (SVD), deep vascular density (DVD), choroidal thickness (CT), and choroidal vascular density (CVD). Generalized Estimating Equations were used to compare differences among groups, and Spearman correlation analysis was applied to explore correlations. **Results:** Significant differences were observed in RT, SVD, and CT at the fovea and parafovea, as well as in DVD and CVD at some parafoveal locations, among children with different refractive errors ($P<0.05$ or $P<0.01$). At the fovea, RT, SVD, and DVD were positively correlated with AL and negatively correlated with SE. At the parafovea, these parameters showed inverse correlations with AL and positive correlations with SE, with regional differences. **Conclusion:** With increasing myopia severity in school-age children, foveal RT and retinal vascular density demonstrate a compensatory increase, whereas certain parafoveal RT and vascular density decrease. CT at both the fovea and parafovea decreases with myopia progression, but no significant change was observed in CVD.

Key Words　Swept-Source Optical Coherence Tomography/Optical Coherence Tomography Angiography; Superficial Vascular Density; Deep Vascular Density; Choroidal Thickness; Choroidal Capillary Vascular Density; Myopia; School-Age Children

近视已成为发病率最高、患者年龄跨度最大且涉及面最广的视觉健康问题，并逐渐呈现低龄化趋势，是影响儿童视觉健康最主要的原因[1]，也是引起儿童视力损伤最常见的眼疾[2]。目前青少年儿童的近视防控已成为世界性的公共卫生问题。既往研究[3]显示近视进展过程中，视网膜、脉络膜的改变可出现于近视进展早期，可为临床上近视程度的判断提供依据。然而已有研究[4]针对成年近视患者的眼部生物学特征与视网膜血流、脉络膜血流关系进行分析发现：近视的严重程度与黄斑区视网膜及脉络膜的血流信号未见明显相关性。部分研究[5-7]分析了儿童的视网膜厚度及其血流情况，但其结论存在一定出入。为进一步分析不同屈光度学龄期儿童视网膜、脉络膜参数变化，本研究应用扫频光学相干断层扫描及血管成像（swept-source optical coherence tomography/optical coherence tomography angiography，SS-OCT/OCTA）仪观察分析了一批学龄期儿童的黄斑视网膜、脉络膜厚度及其不同层次毛细血管密度的变化，并分析相应影响因素，以探讨其在学龄儿童近视防控中的应用价值。

1　对象与方法

1.1　研究对象　本研究为横断面观察性研究，收集2021年4—6月于武汉大学附属爱尔眼科医院就诊的不同屈光度的学龄期儿童305例（305眼）纳入研究。本研究经武汉爱尔眼科医院伦理委员会审核批准（编号：2024IRB040903），遵守赫尔辛基宣言，并获得患儿及其监护人书面知情同意。

纳入标准：（1）年龄为6～14岁儿童，性别不限；（2）等效球镜度计算公式，等效球镜度＝球镜度＋1/2柱镜度，散瞳验光后根据等效球镜度（SE）值将受试者分为低度远视组＋0.50 D≤SE＜＋3.00 D，正视组－0.50 D＜SE＜＋0.50 D，低度近视组－3.00 D≤SE＜－0.50 D、中度近视组－6.00 D≤SE＜－3.00 D，且最佳矫正视力≥1.0（排除弱视）；双眼均符合条件者，收集单眼数据进行分析，左右眼选择通过使用随机数决定；（3）眼前节及眼底检查，均无异常；（4）10 mmHg≤眼压≤21 mmHg（1 mmHg＝0.133 kPa）；（5）排除眼部病变、眼外伤和内眼手术史等；（6）排除高血压、糖尿病等全身性病变；（7）能够配合SS-OCT/OCTA检查，获得图像的断层影像质量值（image quality value，IQV）达到40以上。

排除标准：（1）散光度数超过2.00 D者；（2）曾接受过眼部手术治疗者；（3）既往有角膜塑形镜、渐进镜或接受其他类型近视治疗史者；（4）不能配合SS-OCT/OCTA检查者。

1.2　研究方法　常规检查：所有受试者均接受裸眼视力（uncorrected visual acuity，UCVA）、最佳矫

正视力(best corrected visual acuity,BCVA)、眼压(intraocular pressure,IOP)、裂隙灯下眼前节检查及直接检眼镜下眼底检查。以上检查均由同一名经验丰富的专业医师操作完成。

角膜曲率(corneal curvature,CC)、眼轴(axial length,AL)、等效球镜度(spherical equivalent,SE)的测量:使用自动电脑验光和角膜曲率计,每眼测量3次并取其平均值;CC平均值=(CCK1+CCK2)/2,K1为平坦K值,K2为陡峭K值;所有受试儿童均使用盐酸环喷托酯滴眼液进行散瞳,由同一名专业的视光医师进行视网膜检影验光,计算SE值。AL测量:使用IOL-master 700光学生物测量仪测量,检测信噪比(signal to noise ratio,SNR)要求不低于10。

视网膜及脉络膜参数的测量:所有受试儿童接受扫频光学相干断层扫描成像(VG200N,河南视微影像科技有限公司)检查。扫描仪扫描波长可达1 050 nm,扫描速度达每秒10万次A-Scan,纵向分辨率达5 μm,横向分辨率为15 μm,扫描深度为2.7 mm,且系统配备了基于集成共焦扫描激光眼底镜的眼睛跟踪实用程序以消除眼睛运动伪影[8]。检查及测量由同一名经验丰富的眼科技师完成。为排除脉络膜厚度昼夜节律变化对结果的影响,所有受试者的OCT/OCTA检查均在上午8点至上午11点之间完成。以上所有检查均在小瞳状态下进行,避免抗胆碱类药物对脉络膜厚度产生影响[9]。

设备自动识别以中心凹为中心的全层视网膜及脉络膜并使用自带软件进行分层分析,其中视网膜色素上皮(retinal pigment epithelium,RPE)-Bruch膜复合体与脉络膜巩膜交界处的区域定义为脉络膜,检查时IQV必须达到40以上,使用内置自动测量工具,测量3次取平均值。本研究采集了以中心凹为中心,直径6 mm范围内的中心区域数据,所采集的数据使用ETDRS视力表划分区域,见附图S1(可手机扫描本文OSID二维码查看),使用系统自带软件进行分析,自动划分不同层面的OCTA图像。自动划分错误者,进行手动分层。OCTA图像由视微SS-OCTA算法获得,自动分层为浅层血管复合体(superficial vascular complex,SVC),深层血管复合体(deep vascular complex,DVC),脉络膜毛细血管层[10],见附图S2、S3(可扫描本文OSID二维码查看)。该算法去除了视网膜血管中的投影伪影。系统自带软件测量扫描范围内ETDRS视力表内中心凹以及1~3 mm旁中心凹上方、下方、鼻侧、颞侧共5个区域的视网膜厚度(retinal thickness,RT)、脉络膜厚度(choroidal thickness,CT)、浅层毛细血管密度(superficial vascular density,SVD)、深层毛细血管密度(deep vascular density,DVD)及脉络膜毛细血管密度(choriocapillaris vascular density,CVD)。

1.3 统计学分析 采用IBM SPSS 26.0统计学软件进行统计分析。所有变量的正态性分布用Shapiro-Wilk法检验。本研究中,正态分布且方差齐的数据采用单因素方差分析,不符合正态分布或方差不齐的数据,以中位数(四分位数间距)[$M(P_{25},P_{75})$]表示,多组间数据比较采用Kruskal-Wallis H检验,组间两两比较采用Bonferroni法;采用广义估计方程分析组间数据的差异性。采用Spearman相关性分析眼轴、等效球镜及平均角膜曲率与中心凹及旁中心凹各参数间的相关性。以$P<0.05$为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 研究对象基本情况比较 本研究共纳入学龄期儿童305例(305眼),年龄6~14岁,SE:(-5.50~2.50) D,AL:(21.40~26.96) mm。各组间性别比、CC总体分布差异无统计学意义($P>0.05$);年龄、SE、总体分布差异有统计学意义($P<0.001$)(见表1)。组间两两比较中,各组间AL、SE的差异均有统计学意义($P<0.05$,且自低度远视组至中度近视组,AL逐渐增长,SE逐渐降低,见附图S4、S5,可手机扫描本文OSID二维码查看)。

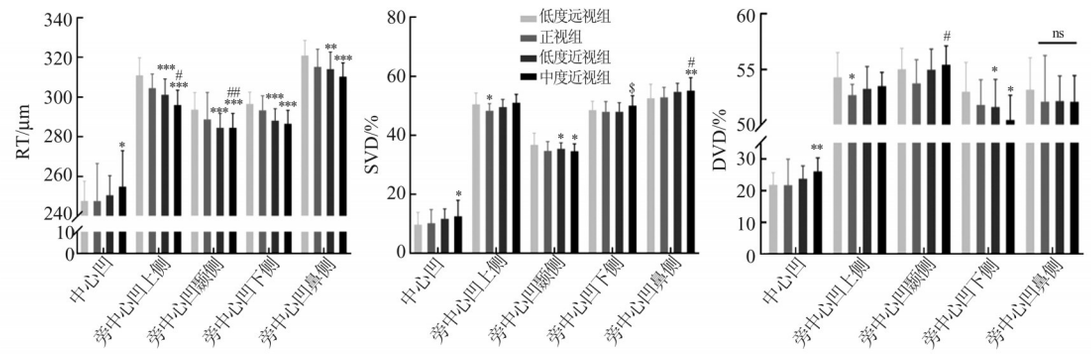
2.2 黄斑区各部位RT、SVD、DVD的比较

表1 学龄期儿童基本情况比较 [例;$M(P_{25},P_{75})$]

组别	低度远视组(n=64)	正视组(n=37)	低度近视组(n=158)	中度近视组(n=46)	H/χ^2	P
AL/mm	22.490(21.995,23.048)	23.600(22.770,24.165)	24.235(23.750,24.740)	24.880(24.310,25.500)	139.568	<0.001
SE/D	1.00(0.75,1.69)	0(-0.25,0.25)	-1.50(-2.00,-1.25)	-3.75(-4.13,-3.25)	258.063	<0.001
CC/D	43.533(42.626,44.480)	43.330(42.438,44.218)	42.93(42.324,44.255)	43.750(42.510,44.618)	7.142	0.068
年龄/岁	7(6,8)	9(7,11)	9(8,10)	10(9,11)	39.896	<0.001
性别(男/女)	30/34	23/14	76/82	21/25	2.958	0.400

注:AL.眼轴;SE.等效球镜度;CC.角膜曲率。

2.2.1　共同特征　见图 1。各组间数值比较可见，RT、SVD、DVD 中，除 DVD 的鼻侧外，其余数值在中心凹、旁中心凹各处的总体分布差异均有统计学意义（$P<0.05$）。三组数据组间比较显示，中心凹处可见中度近视组与低度远视组存在显著差异（$P<0.05$），且均为低度远视组低于中度近视组。



RT. 视网膜厚度；SVD. 浅层毛细血管密度；DVD. 深层毛细血管密度；$^{*}P<0.05$，$^{**}P<0.01$，$^{***}P<0.001$，与低度远视组比较；$^{\$}P<0.05$，与低度近视组比较；$^{\#}P<0.05$，$^{\#\#}P<0.01$，与正视组比较；ns. 无统计学意义。

图 1　不同组别 RT、SVD、DVD 的比较

2.2.2　组间差异　RT 的比较中，旁中心凹各处可见中度、低度近视组均低于低度远视组，但仅旁中心凹上侧、颞侧的中度近视组显著低于正视组（$P<0.05$）。余各组间两两比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。见图 1、附表 S1（可扫描本文 OSID 二维码查看）。

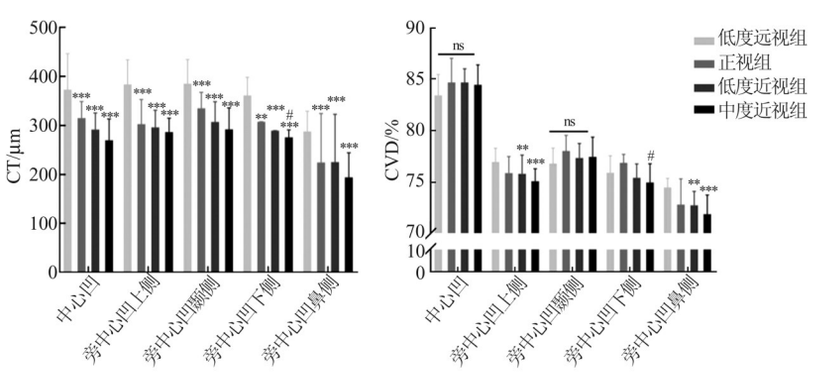
SVD 的比较中，旁中心凹上侧：正视组低于低度远视组（$P<0.05$）；旁中心凹颞侧：中度、低度近视组均低于低度远视组（$P<0.05$）；旁中心凹下侧：低度近视组低于中度近视组（$P<0.05$）；旁中心凹鼻侧：低度远视组、正视组低于中度近视组（$P<0.05$）。其余各组间两两比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。见图 1、附表 S2（可手机扫描本文 OSID 二维码查看）。

DVD 的比较中，旁中心凹上侧：正视组低于低度远视组（$P<0.05$）；旁中心凹颞侧：中度近视组高于正视组（$P<0.05$）；旁中心凹下侧：中度、低度近视组均低于低度远视组（$P<0.05$）。其余各组间两两比较，差异无统计学意义（$P>0.05$）。见图 1、附表 S3（可手机扫描本文 OSID 二维码查看）。

2.3　研究对象黄斑区各部位 CT 及 CVD 的比较

2.3.1　各组间受检眼各部位 CT 比较　各组间均为颞侧 CT 最高，鼻侧最薄。中心凹、旁中心凹各处的 CT 总体分布差异均有统计学意义（$P<0.05$）。见图 2。

组间两两比较，在中心凹、旁中心凹各处，中度近视组、低度近视组、正视组的 CT 均低于低度远视组（$P<0.05$）。仅旁中心凹下侧的中度近视组 CT 显著低于正视组（$P<0.05$）。见图 2，附表 S4（可手机扫描本文 OSID 二维码查看）。



CT. 脉络膜厚度；CVD. 脉络膜毛细血管密度；$^{**}P<0.01$，$^{***}P<0.001$，与低度远视组比较；$^{\#}P<0.05$，与正视组比较；ns. 无统计学意义。

图 2　不同组别黄斑区各部位 CT、CVD 的比较

2.3.2 各组间受检眼各部位CVD比较 各组间中心凹CVD最高。仅旁中心凹(上侧、下侧、鼻侧)的CVD总体分布差异有统计学意义($P<0.05$);其余部位差异无统计学意义($P>0.05$)。

组间两两比较中,仅在旁中心凹上侧、鼻侧两个部位,中度近视组、低度近视组的CVD低于低度远视组($P<0.05$),其余组别间两两比较差异无统计学意义($P>0.05$),具体见图2、附表S5(可手机扫描本文OSID二维码查看)。

2.4 各部位参数的相关性分析

2.4.1 SE、AL、CC与各部位数据相关性 见表2。SE与中心凹RT、SVD及DVD呈负相关,与旁中心凹各部位RT呈正相关,与旁中心凹颞侧SVD呈正相关,与旁中心凹鼻侧SVD呈负相关,与旁中心凹下侧DVD呈正相关,与各部位CT均呈正相关,与旁中心凹上侧、鼻侧CVD均呈正相关,其余指标与SE均未见明显相关性。

表2 不同部位数据与SE、AL及CC的相关性

参数	部位	RT	SVD	DVD	CT	CVD
SE	中心凹	-0.170^{**}	-0.163^{**}	-0.180^{**}	0.446^{***}	-0.098
	旁中心凹上侧	0.382^{***}	0.071	0.014	0.451^{***}	0.187^{**}
	旁中心凹颞侧	0.367^{***}	0.214^{***}	-0.063	0.457^{***}	-0.013
	旁中心凹下侧	0.282^{***}	-0.077	0.154^{**}	0.413^{***}	0.112
	旁中心凹鼻侧	0.271^{***}	-0.198^{**}	0.075	0.404^{***}	0.255^{***}
AL	中心凹	0.264^{**}	0.285^{***}	0.281^{***}	-0.497^{***}	0.095
	旁中心凹上侧	-0.354^{***}	-0.032	-0.031	-0.486^{***}	-0.163^{**}
	旁中心凹颞侧	-0.338^{***}	-0.102	0.093	-0.484^{***}	0.047
	旁中心凹下侧	-0.281^{***}	0.158^{**}	-0.119^{*}	-0.449^{***}	-0.183^{**}
	旁中心凹鼻侧	-0.182^{**}	0.326^{***}	-0.158^{**}	-0.453^{***}	-0.239^{***}
CC	中心凹	-0.055	-0.113^{*}	-0.036	0.194^{**}	-0.027
	旁中心凹上侧	0.056	-0.002	-0.021	0.143^{*}	0.090
	旁中心凹颞侧	0.042	-0.066	-0.051	0.147^{*}	-0.131^{*}
	旁中心凹下侧	0.078	-0.051	-0.042	0.175^{**}	0.055
	旁中心凹鼻侧	-0.009	-0.138^{*}	0.090	0.174^{**}	0.131^{*}

注:SE.等效球镜度,AL.眼轴长度,CC.角膜曲率,RT.视网膜厚度,SVD.浅层毛细血管密度,DVD.深层毛细血管密度,CT.脉络膜厚度,CVD.脉络膜毛细血管密度;$^{*}P<0.05$,$^{**}P<0.01$,$^{***}P<0.001$。

AL与中心凹RT、SVD及DVD呈正相关,与旁中心凹各部位RT呈负相关,与旁中心凹下侧及鼻侧SVD呈正相关,与旁中心凹下侧及鼻侧DVD呈负相关,与各部位CT均呈负相关,与旁中心凹上侧、下侧、鼻侧CVD均呈负相关,其余指标与AL之间均未见明显相关性。

CC与中心凹、旁中心凹鼻侧SVD呈负相关,与各部位CT均呈正相关,与旁中心凹颞侧CVD呈负相关,与旁中心凹鼻侧CVD均呈正相关,其余指标与CC均未见明显相关性。

2.4.2 各部位观察值间相关性 中心凹处RT与相应部位SVD及DVD呈明显正相关,旁中心凹各部位RT与SVD呈明显正相关,旁中心凹上侧、颞侧、下侧RT与DVD呈弱正相关;旁中心凹上侧、下侧、鼻侧CT与CVD呈正相关,余部位观察值未见明显相关性(见表3、表4)。

表3 不同部位RT与SVD、DVD的相关性

RT/μm	SVD/%		DVD/%	
	r	P	r	P
中心凹	0.748	<0.001	0.815	<0.001
旁中心凹上侧	0.530	<0.001	0.148	0.010
旁中心凹颞侧	0.486	<0.001	0.155	0.007
旁中心凹下侧	0.459	<0.001	0.154	0.007
旁中心凹鼻侧	0.361	<0.001	0.061	0.290

注:RT.视网膜厚度,SVD.浅层毛细血管密度,DVD.深层毛细血管密度。

表4 不同部位CT与CVD相关性

CT	CVD	
	r	P
中心凹	-0.109	0.058
旁中心凹上侧	0.287	<0.001
旁中心凹颞侧	0.105	0.067
旁中心凹下侧	0.248	<0.001
旁中心凹鼻侧	0.226	<0.001

注:CT.脉络膜厚度,CVD.脉络膜毛细血管密度。

3　讨论

我国是全球高度近视发病率最高的国家之一，青少年高度近视患病率已达 6.69%～38.4%，且呈现低龄化趋势[2,11-12]。学龄儿童近视具有发病早、增长快的特点，早期近视发生将导致病程延长及病理性近视风险增加，目前临床上尚无治愈近视的方法，这使得学龄期近视防控成为关键干预窗口。相关数据[12]显示，中国近视人数约占全球的 33%，比世界平均水平高出 10%，预测在 2050 年全球高度近视人群的数量将会接近 9.38 亿[13]。在近视进展至出现明确器质性病变前，我们可通过一系列检查手段获取相关信息评估近视的进展程度，并据此采取适当的控制措施。

本研究采用 SS-OCT/OCTA 技术，对 305 名矫正视力正常的 6～14 岁学龄儿童分组（低度远视组、正视组、低度近视组、中度近视组），系统评估 RT、CT、SVD/DVD 及 CVD 的分布特征。本研究中不乏低度远视者。他们拥有一定的远视储备，这种储备在正视化过程中可能起到关键作用，研究[14-15]表明适当的远视储备能够帮助儿童避免过早进入近视状态，可能延缓视网膜及脉络膜的变化。

本研究结果显示出两组现象：其一，近视组、正视组和远视组在中心凹处的 RT、SVD、DVD 方面，随着近视度的加深，呈现出不同程度的增加趋势；然而，在旁中心凹区域，这些数值却随近视度加深而呈现出方位依赖性降低趋势。BAYRAKÇEKEN 等[16]的研究中，12～18 岁的青少年，近视组与正视组在黄斑区以中心凹为直径的 6 mm 范围内的视网膜厚度差异无统计学意义，但近视组旁中心凹上方及鼻侧的浅层视网膜血流密度较正视组明显降低。本研究中度近视组、低度近视组旁中心凹各部位视网膜厚度均较低度远视组降低，但在中度近视组与正视组的比较中，类似的降低仅表现在旁中心凹上侧及颞侧。徐珊珊等[17]通过测量比较单眼近视儿童的视网膜厚度，发现近视眼旁中心凹仅颞侧内层的视网膜厚度低于对侧眼，外层各部位视网膜厚度均低于对侧眼。朱琴[18]的研究中，同样的现象率先出现在了上方与下方。LIU 等[19]的研究中视网膜血管密度随近视程度降低呈区域差异性，鼻上和颞下象限显著降低，鼻下象限表现最为滞后，且该研究结果提示相较于大、中血管系统，微血管密度能够更敏感地表现出血管的改变。本研究中旁中心凹视网膜毛细血管密度的降低在不同组别间也存在区域差异性，浅层毛细血管密度在颞侧表现最为明显，推测这种差异可能源于两方面：①研究人群的屈光状态差异（本研究中不仅纳入正视组及近视组，还纳入低度远视组作为对照，而多数研究仅比较近视与正视组）；②SS-OCT/OCTA 与传统光谱域光学相干断层扫描技术（SD-OCT）在视网膜分层算法上的技术差异等。

本研究发现，等效球镜与旁中心凹视网膜厚度呈正相关，而眼轴则与其呈负相关。这意味着随着近视程度的增加和眼轴的延长，旁中心凹处的视网膜厚度会降低。同时，视网膜浅层毛细血管血流密度也呈现出降低趋势，这与成年人的研究结果具有一定的相似性[20]。徐珊珊等[17]的研究中，黄斑中心凹的 RT、SVD、DVD 与 AL 呈正相关，旁中心凹各象限视网膜厚度与眼轴呈负相关，同本研究结果相似。LIU 等[19]的研究中将视网膜的毛细血管密度划分为浅层、深层、全层，研究中黄斑区不同部位视网膜毛细血管密度均与 AL 呈负相关（r=－0.139、－0.103、－0.154；均 P<0.05）、与 SE 呈正相关（r=－0.052、－0.096、－0.057；均 P<0.05），研究中分析视网膜微血管密度的变化可能受眼轴长度影响更大，此结论在本研究中未见明显体现。KHAN 等[21]的研究得出视网膜浅层毛细血管厚度与眼轴呈负相关，且总结出三种模型：①眼轴增长会导致视网膜伸展，引起视网膜总面积的增加，导致视网膜神经节细胞及视网膜血管密度的生理性降低，并认为此模型中，视网膜不会出现病理性改变。②伴随眼轴增长，视网膜神经节细胞的数量会减少，其需氧量会减少，因此同样范围内所需供养的血管密度会随之降低，此模型也是生理性的改变。③持续的眼轴延长，视网膜拉伸、变薄会导致血管密度的降低及部分血管的损坏，引起供氧量的下降，最终导致神经节细胞的减少。总结以上，区别于 KHAN 等[21]的研究，本研究对象正处于发育阶段，研究结果中伴随眼轴增长的中心凹处 RT、SVD、DVD，推测为生理性增厚可能性大，而旁中心凹视网膜厚度降低与眼轴拉长、眼球扩大引起的机械伸展相关可能性大。旁中心凹 SVD 随眼轴增长有轻度升高，考虑同生理性增加相关，在组间比较中亦可见中度、低度近视组低于低度远视组，余组别变化不明显，其矛盾点考虑为样本量过少及未纳入高度近视组数据所致研究结果不明显相关。另外，机体在近视进展过程中，会优先维持黄斑区中心凹视网膜结构稳定，进而保证中心凹视功能正

常[17,22]。MENG等[23]的研究中考虑随近视程度进展,旁中心凹视网膜厚度降低,中心凹厚度增厚,其原因可能为眼轴延长的机械拉伸配合内界膜的压平趋势及玻璃体牵引所致。以上观点可解释不同部位视网膜厚度、视网膜血流密度与等效球镜的相关性。但MIRHAJIANMOGHADAM等[24]发现近视儿童在靠近中心凹的区域锥体密度较低,其视网膜无血管区和中心凹的视网膜厚度及毛细血管密度则没有显著随年龄变化。这些发现表明,视网膜和脉络膜的发育在儿童时期表现出复杂的变化模式,需要进一步的研究来揭示其潜在的生物学机制。除此之外,本研究所有研究对象入组前均已进行眼前节、眼底检查,排除了病理性近视且伴有并发症者。考虑以上原因,相较于病理性近视出现的明显视网膜厚度及血流密度变化[25-26],本研究中的变化并不明显。

其二,脉络膜厚度与等效球镜呈正相关,与眼轴呈负相关,且中度近视组旁中心凹下侧CT显著低于正视组。多项研究[8,27]结果基本一致,表明随着近视程度的加深和眼轴的延长,脉络膜厚度会显著降低。李疏凤等[28]开展了一项纵向研究,结果显示在近视进展过程中,近视儿童的脉络膜厚度逐渐变薄;但XU等[27]同样进行了一项纵向研究,显示近视快速进展儿童的黄斑区脉络膜厚度显著减少,而稳定进展的儿童则没有显著变化。这表明脉络膜厚度的变化与眼球的生长和近视的发展密切相关。

除此之外,本研究中,平均角膜曲率与脉络膜厚度之间的表现出显著的相关性。王世明等[29]曾进行过相关研究,结果证明黄斑区脉络膜厚度与最佳矫正视力、等效球镜度数、角膜曲率、眼轴长度相关,其中眼轴长度是影响脉络膜厚度的主要因素。张海燕等[30]的研究结果也佐证了这一点。GONG等[31]的研究中提出,平坦角膜的低度近视者会因抵消眼轴过度增长对等效球镜度数的影响,从而掩盖其眼底改变的发生。本研究中,角膜曲率与脉络膜厚度呈正相关,低角膜曲率者,其脉络膜厚度也存在一定降低,与GONG等[31]观点一致。因此对于平坦角膜的低度近视儿童,我们需格外重视其眼底病变的进展。

另外,本研究发现,近视组与正视组相比,仅在下侧区域的脉络膜厚度显著降低。这一现象可能与高度近视眼中脉络膜血管和基质区域的显著减少有关,从而导致脉络膜整体厚度的下降[32]。此外,另一项研究[33]指出,在高度近视眼中,脉络膜厚度的减少与眼轴长度的增加存在显著相关性,尤其是在鼻侧区域,这一机制可能与我们观察到的下侧脉络膜厚度变化具有相似性。值得注意的是,近视眼的脉络膜厚度在不同区域呈现出不同的变化趋势。在高度近视患者中,脉络膜厚度变薄可能与脉络膜新生血管及漆裂纹等结构性改变的存在密切相关[34]。这些研究结果表明,脉络膜厚度的变化不仅与近视程度相关,还可能受到眼球形态和结构变化的显著影响。

在脉络膜毛细血管密度方面,本研究并未发现明显的改变。这可能与脉络膜循环的变化首先发生在大中血管层(Haller's层和Sattler's层)有关,而在近视进展到低度时,脉络膜毛细血管密度相对稳定[35]。当近视进展到一定程度时,脉络膜血管才会出现明显改变,这一点在CHANG等[8]、MO等[36]及张丹凤等[37]的研究中得到了支持,他们发现近视早期改变始于脉络膜大中血管层(Haller层/Sattler层),而毛细血管层代偿机制可能延缓其密度变化直至高度近视阶段脉络膜厚度的降低。

本研究存在以下局限性:首先,样本量不足、仅覆盖湖北地区,且文化背景与生活习惯同质性高,结论外推性弱,难反映近视异质性。其次,研究范围窄(未含高度近视),分组标准主观性较强,影响结果准确性;仪器校准误差、操作者依赖及图像伪影,可能降低参数测量准确性;横断面设计仅能观察脉络膜参数差异,无法建立因果关系,需前瞻性研究验证动态关联。本研究中,角膜曲率与旁中心凹视网膜厚度、深层毛细血管密度的相关性,与ZHANG等[38]报道的青少年近视与角膜曲率无显著关联的结果存在分歧。这种差异需要多中心大样本研究进一步验证。

综上所述,学龄期儿童近视进展中,黄斑区中心凹视网膜参数呈现代偿性升高,而旁中心凹区域性降低及脉络膜变薄可能为早期近视性改变的特征标志。

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

参考文献

[1] 中华医学会眼科学分会眼视光学组. 重视高度近视防控的专家共识(2017)[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志,2017,19(7):385-389.
Chinese Medical Association Ophthalmology Branch Optometry Group. Expert consensus on emphasizing

the prevention and control of high myopia (2017)[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2017, 19(7): 385-389.

[2] 张巧，刘海芳，胡哲，等 . 中国近视儿童配戴框架眼镜依从性的研究进展[J]. 武汉大学学报(医学版)，2025，46(7):941-948.
ZHANG Q, LIU HF, HU Z, et al. Research progress on compliance with spectacles among Chinese myopic children[J]. Medical Journal of Wuhan University, 2025, 46(7):941-948.

[3] XIONG S Y, HE X G, ZHANG B, et al. Changes in choroidal thickness varied by age and refraction in children and adolescents: A 1-year longitudinal study[J]. Am J Ophthalmol, 2020, 213: 46-56.

[4] YANG S Q, ZHOU M W, LU B, et al. Quantification of macular vascular density using optical coherence tomography angiography and its relationship with retinal thickness in myopic eyes of young adults[J]. J Ophthalmol, 2017, 2017: 1397179.

[5] 高莎莎，尚丽丽，符爱存，等 . 学龄期儿童黄斑区视网膜血流密度和厚度分析[J]. 中华眼底病杂志，2024，40(1):44-51.
GAO S S, SHANG L L, FU A C, et al. Analysis of macular vascular density and retinal thickness of school-age children [J]. Chin J Ocul Fundus Dis, 2024, 40(1): 44-51.

[6] 谷裕，陈振东，卞栏焰，等 . 青少年近视患者屈光度与视网膜厚度及黄斑血流的相关性研究[J]. 国际医药卫生导报，2022，28(14):2002-2005.
GU Y, CHEN Z D, BIAN L Y, et al. Correlations between diopter and retinal thickness and macular blood flow in adolescent myopia patients[J]. IMHGN, 2022, 28(14): 2002-2005.

[7] TIAN F F, ZHENG D Q, ZHANG J, et al. Choroidal and retinal thickness and axial eye elongation in Chinese junior students[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2021, 62(9): 26.

[8] CHANG X J, LI M, LV L, et al. Assessment of choroidal vascularity and choriocapillaris blood perfusion after accommodation in myopia, emmetropia, and hyperopia groups among children[J]. Front Physiol, 2022, 13: 854240.

[9] NICKLA D L, TOTONELLY K. Brief light exposure at night disrupts the circadian rhythms in eye growth and choroidal thickness in chicks[J]. Exp Eye Res, 2016, 146: 189-195.

[10] WU H, ZHANG G Y, SHEN M X, et al. Assessment of choroidal vascularity and choriocapillaris blood perfusion in anisomyopic adults by SS-OCT/OCTA [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2021, 62(1): 8.

[11] LI Y, LIU J, QI P C. The increasing prevalence of myopia in junior high school students in the Haidian District of Beijing, China: A 10-year population-based survey[J]. BMC Ophthalmol, 2017, 17(1): 88.

[12] 花雷，刘虎，张志强 . 学龄儿童近视的预防与控制[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志，2020，22(7):555-560.
HUA L, LIU H, ZHANG Z Q. Prevention and control of myopia in school-age children[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2020, 22(7): 555-560.

[13] HOLDEN B A, FRICKE T R, WILSON D A, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050[J]. Ophthalmology, 2016, 123(5): 1036-1042.

[14] LIU L J, JIANG D D, LI C C, et al. Relationship between myopia progression and school entrance age: A 2.5-year longitudinal study[J]. J Ophthalmol, 2021, 2021: 7430576.

[15] GROUP P E D I. Clinical factors associated with moderate hyperopia in preschool children with normal stereopsis and visual acuity[J]. J AAPOS, 2016, 20(5): 455-457.

[16] BAYRAKÇEKEN K. Comparison of retinal microvascular vascular density between adolescents with and without simple myopia using optical coherence tomography angiography[J]. Eurasian J Med, 2023, 55(1): 54-58.

[17] 徐珊珊，陈一芳，端宁茜，等 . 基于OCTA的单眼近视患儿黄斑区视网膜毛细血管血流密度及厚度分析[J]. 国际眼科杂志，2022，22(6): 926-930.
XU S S, CHEN Y F, DUAN X D, et al. Analysis of vascular density and thickness in macular retina of monocular myopic adolescents using OCTA[J]. Int Eye Sci, 2022, 22(6): 926-930.

[18] 朱琴 . 基于OCTA对青少年近视屈光参差患者黄斑区视网膜结构的临床观察[D]. 苏州：苏州大学，2022.
ZHU Q. Clinical observation on macular retinal microstructure from optical coherence tomography angiography in adolescent myopia anisometropia[D]. Suzhou: Soochow University, 2022.

[19] LIU M M, WANG P, HU X J, et al. Myopia-related stepwise and quadrant retinal microvascular alteration and its correlation with axial length[J]. Eye, 2021, 35(8): 2196-2205.

[20] YANG D W, CAO D, ZHANG L, et al. Macular and peripapillary vessel density in myopic eyes of young Chinese adults[J]. Clin Exp Optom, 2020, 103(6): 830-837.

[21] KHAN M H, LAM A K C, ARMITAGE J A, et al. Impact of axial eye size on retinal microvasculature density in the macular region[J]. J Clin Med, 2020, 9(8): 2539.

[22] JONAS J B, OHNO-MATSUI K, PANDA-JONAS S. Myopia: Anatomic changes and consequences for its etiology[J]. Asia Pac J Ophthalmol, 2019, 8(5):

355-359.

[23] MENG Y, YI Z H, XU Y S, et al. Changes in macular vascular density and retinal thickness in young myopic adults without pathological changes: an OCTA study [J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2022, 26(16): 5736-5744.

[24] MIRHAJIANMOGHADAM H, JNAWALI A, MUSIAL G, et al. *In vivo* assessment of foveal geometry and cone photoreceptor density and spacing in children [J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 8942.

[25] 蔡志鹏, 张红, 张津京, 等. 高度近视合并视盘旁脉络膜空腔黄斑区视网膜血流密度和厚度变化观察[J]. 中华眼底病杂志, 2022,38(6): 447-455.
CAI Z P,ZHANG H,ZHANG J J,et al. Macular vessel density and thickness in highly myopic eyes with peripapillary intrachoroidal cavitation[J]. Chin J Ocul Fundus Dis,2022,38(6): 447-455.

[26] 万婷,李涛,余曼,等. 病理性近视黄斑和视盘血流密度变化及其与眼轴长度的相关性研究[J]. 中华眼底病杂志,2022,38(6):440-446.
WAN T, LI T, SHE M, et al. Changes in the vessel densities of macular and optic nerve head and their relationships with axial length in pathological myopia[J]. Chin J Ocul Fundus Dis, 2022,38(6):440-446.

[27] XU M P, YU X P, WAN M H, et al. Two-year longitudinal change in choroidal and retinal thickness in school-aged myopic children: Exploratory analysis of clinical trials for myopia progression[J]. Eye Vis, 2022, 9(1): 5.

[28] 李疏凤,李雪,黄莹莹,等. 儿童近视进展与眼底血流及脉络膜厚度的关系[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志,2021,23(10):759-765.
LI S F, LI X, HUANG Y Y, et al. The relationship between myopia progression, fundus blood flow and choroidal thickness in children [J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci,2021,23(10):759-765.

[29] 王世明, 尚颖萍, 余腾, 等. 近视患者黄斑区脉络膜厚度及其影响因素分析[J]. 中华眼底病杂志, 2013, 29(5): 457-460.
WANG S M, SHANG Y P, YU T, et al. Choroidal thickness and the correlation factor in myopic Chinese population[J]. Chin J Ocul Fundus Dis, 2013, 29(5): 457-460.

[30] 张海燕, 李洪霞, 单石蕾, 等. OCT测量脉络膜厚度在学龄儿童近视进展中的研究[J]. 中国斜视与小儿眼科杂志, 2024, 32(4): 24.
ZHANG H Y, LI H X, SHAN S L, et al. Research on choroidal thickness measured by OCT in the progression of myopia in school-aged children[J]. Chin J Strabismus Pediatr Ophthalmol, 2024, 32(4): 24.

[31] GONG W, CHENG T Y, WANG J J, et al. Role of corneal radius of curvature in early identification of fundus tessellation in children with low myopia[J]. Br J Ophthalmol, 2023, 107(10): 1532-1537.

[32] GUPTA P, THAKKU S G, SAW S M, et al. Characterization of choroidal morphologic and vascular features in young men with high myopia using spectral-domain optical coherence tomography[J]. Am J Ophthalmol, 2017, 177: 27-33.

[33] FLORES-MORENO I, LUGO F, DUKER J S, et al. The relationship between axial length and choroidal thickness in eyes with high myopia[J]. Am J Ophthalmol, 2013, 155(2): 314-319.e1.

[34] WANG S M, WANG Y, GAO X M, et al. Choroidal thickness and high myopia: A cross-sectional study and meta-analysis[J]. BMC Ophthalmol, 2015, 15: 70.

[35] SCHERM P, PETTENKOFER M, MAIER M, et al. Choriocapillary blood flow in myopic subjects measured with OCT angiography[J]. Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina, 2019, 50(5): e133-e139.

[36] MO J, DUAN A L, CHAN S, et al. Vascular flow density in pathological myopia: An optical coherence tomography angiography study[J]. BMJ Open, 2017, 7(2): e013571.

[37] 张丹凤, 蔡劲锋, 王平, 等. 基于OCTA的青少年近视患者黄斑区视网膜脉络膜血管特点观察[J]. 中国斜视与小儿眼科杂志, 2020, 28(3): 1-4.
ZHANG D F, CAI J F, WANG P, et al. The research of vascular density and thickness of macular retina and choroid in myopic juveniles[J]. Chin J Strabismus Pediatr Ophthalmol, 2020, 28(3): 1-4.

[38] ZHANG J M, WU J F, CHEN J H, et al. Macular choroidal thickness in children: The Shandong Children Eye Study[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2015,56(13): 7646-7652.

(2025-03-15收稿)
编辑 张 峻