

不同程度近视青少年患者视盘区血管密度和黄斑厚度的差异及相关性

韩丽芳,程 材

引用: 韩丽芳,程材. 不同程度近视青少年患者视盘区血管密度和黄斑厚度的差异及相关性. 国际眼科杂志, 2026, 26 (1) : 21-28.

作者单位: (200941)中国上海市,上海中冶医院五官科

作者简介: 韩丽芳,女,本科,主治医师,研究方向:白内障、角膜病、干眼、儿童青少年屈光不正。

通讯作者: 韩丽芳. lifang448@163cn.com.cn

收稿日期: 2025-07-03 修回日期: 2025-11-28

摘要

目的: 探讨青少年近视程度对视盘区血管密度、黄斑厚度的影响及两者的关系。

方法: 横断面研究。选择上海中冶医院就诊的106例176眼青少年近视患者为研究对象,根据等效球镜度数(SE)分为低度、中度、高度近视三组。对比三组视盘区血管密度、黄斑厚度及微视野相关指标,分析视盘区血管密度与黄斑厚度的相关性以及两者在SE与视网膜平均光敏感度(MLS)间的中介作用。

结果: 三组患者基本资料具有可比性。随着近视程度加重,SE、视盘区各方位及平均血管密度、黄斑区除中央凹外各区域厚度、微视野相关指标均明显下降,眼轴长度、黄斑中央凹厚度均明显升高(均P<0.05)。广义加性模型显示,视盘区各方位及平均血管密度、黄斑区除中央凹外各区域厚度对近视程度呈负向影响,黄斑中央凹厚度呈正向影响(均P<0.05)。Pearson相关性分析表明,视盘区血管密度与黄斑中央凹厚度呈负相关,与黄斑其他区域厚度呈正相关(均P<0.05)。中介效应分析显示,黄斑各区域厚度、视盘区部分血管密度在SE与MLS整体间存在明显中介调控作用(均P<0.001)。

结论: 随着近视程度增加,视盘区血管密度及黄斑除中央凹外各区域厚度降低,黄斑中央凹厚度升高;视盘区血管密度与黄斑中央凹厚度负相关、与黄斑其他区域厚度正相关;黄斑厚度、视盘区血管密度在SE及MLS间发挥明显中介作用。

关键词: 青少年; 近视; 视盘区血管密度; 黄斑厚度; 相关性
DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.1.04

Differences and correlations in vascular density of the optic disc area and macular thickness among different degrees of adolescent myopia patients

Han Lifang, Cheng Cai

Department of Otorhinolaryngology, Shanghai Zhongye Hospital, Shanghai 200941, China

Correspondence to: Han Lifang. Department of Otorhinolaryngology, Shanghai Zhongye Hospital, Shanghai 200941, China. lifang448@163cn.com.cn

Received: 2025-07-03 Accepted: 2025-11-28

Abstract

• AIM: To explore the impact of myopia severity in adolescents on the vascular density in the optic disc area and macular thickness, as well as their relationship.

• METHODS: Cross-sectional study. A total of 106 cases (176 eyes) of adolescent myopia patients who chose Shanghai Zhongye Hospital for treatment were selected as the research subjects. They were divided into three groups according to the spherical equivalent (SE): low myopia, moderate myopia and high myopia. The vascular density in the optic disc area, macular thickness and microperimetry-related indicators of the three groups were compared. The correlation of the vascular density in the optic disc area with macular thickness was analyzed, as well as the mediating role of the two in SE with the average macular light sensitivity (MLS) of the retina.

• RESULTS: The baseline characteristics of the three groups of patients were comparable. With the increase of myopia degree, SE, the vessel density in all directions and the average vascular density of the optic disc area, the thickness of all regions of the macular area except the fovea, and the related indicators of microperimetry all decreased significantly, while the axial length and the thickness of the macular fovea increased significantly (all P<0.05). The generalized additive model showed that the vascular density in all directions and the average vascular density of the optic disc area, and the thickness of all regions of the macular area except the fovea had a negative impact on the degree of myopia, while the thickness of the macular fovea had a positive impact (all P<0.05). Pearson correlation analysis indicated that the vascular density of the optic disc area negatively correlated with the thickness of the macular fovea, and positively correlated with the thickness of other regions of the macula (all P<0.05). The mediation effect analysis showed that the thickness of all regions of the macula and the vascular density of some areas of the optic disc area had a significant mediating regulatory effect between SE and the overall MLS (all P<0.001).

• CONCLUSION: With the increase of myopia degree, the vascular density in the optic disc area and the thickness of all regions of the macula except the fovea decrease, while the thickness of the macular fovea increases; the vascular density in the optic disc area negatively correlated with the thickness of the macular fovea, and positively correlated with the thickness of other regions of the macula (all P<0.05). The mediation effect analysis showed that the thickness of all regions of the macula and the vascular density of some areas of the optic disc area had a significant mediating regulatory effect between SE and the overall MLS (all P<0.001).

the thickness of the macular fovea, and positively correlated with the thickness of other regions; the thickness of the macula and the vascular density in the optic disc area play a significant mediating role between SE and MLS.

• KEYWORDS: teenagers; myopia; vascular density in the optic disc area; macular thickness; correlation

Citation: Han LF, Cheng C. Differences and correlations in vascular density of the optic disc area and macular thickness among different degrees of adolescent myopia patients. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26(1):21–28.

0 引言

近年来,全球近视发病率呈明显上升趋势,青少年群体已成为近视防控的重点人群^[1]。研究表明,我国青少年近视率位居世界前列,且高度近视低龄化趋势加剧^[2]。高度近视不仅影响视觉质量,还可能引发视网膜脱离、黄斑病变等不可逆眼底病变,带来公共卫生挑战。因此,深入探究近视进展中眼部结构的病理变化,对实现早期干预至关重要。视盘为视神经纤维汇聚及视网膜中央血管出入的关键结构,其周边血管系统是视网膜功能维持的重要血流保障^[3]。光学相干断层扫描血管成像技术(optical coherence tomography angiography, OCTA)作为新型视网膜血管评估技术,可在无需造影剂的情况下精准量化视网膜不同结构层的血管网络功能,为解析近视相关血管改变提供了有力工具^[4]。然而,关于近视程度对视盘区血管密度的影响,目前研究仍存在争议:部分研究认为,近视轴性增长可致视盘形态改变与血管重构^[5];另一些研究则提出高度近视视盘周围毛细血管密度降低与巩膜牵拉引发的组织缺氧密切相关^[6];还有研究发现中度近视阶段可能存在血管代偿性扩张,进而导致血管密度升高,但机制不明^[7]。黄斑作为视网膜视觉功能的核心区域,其厚度变化直接反映神经细胞及纤维层的完整性^[8-9]。上述研究多关注黄斑中心厚度与近视度数关联,且缺乏针对青少年群体的系统性研究。因此,本研究基于 OCTA 技术,量化分析青少年不同程度近视患者视盘区血管密度差异及其与黄斑各亚区域厚度的相关性,旨在为近视防控提供新的影像学指标。

1 对象和方法

1.1 对象 横断面研究。选择 2022 年 2 月至 2024 年 8 月于上海中治医院就诊的青少年近视患者 106 例 176 眼作为研究对象,其中男 57 例,女 49 例,年龄 10~19(平均 14.36 ± 2.59)岁。本研究已取得上海中治医院伦理委员会批准(批号:20220926),所有参与者及其监护人均签署知情同意书。

1.1.1 纳入标准 (1)10~19 岁青少年:该年龄段为青少年群体的核心界定范围,契合本研究主题定位;(2)矫正视力 ≥ 1.0 且眼压(intraocular pressure, IOP)为 11~21 mmHg($1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$):矫正视力正常可避免视力异常干扰核心指标评估,正常眼压值可排除眼压异常对眼底血管、视网膜结构的影响,两者共同确保眼部基础功能正常,减少非近视因素的混杂干扰。

1.1.2 排除标准 (1)眼部相关异常者:如眼部外伤或手术史(可能改变视盘、视网膜结构及血管分布)、眼底病理

性改变(如黄斑萎缩、裂孔,可能影响结果与近视的关联性)、光学介质模糊(如角膜病变、白内障,干扰 OCTA 精准测量)、斜视或眼球运动异常(影响检查固视稳定性),此类情况均会直接影响观测指标准确性或结果解读,故予以排除。(2)患高血压、糖尿病等全身性疾病者:此类疾病可独立影响眼底血流灌注,需排除以控制混杂变量。

1.1.3 分组 根据等效球镜度数(spherical equivalent, SE)不同分为三组^[10]: (1) 低度近视组($-3.00 \text{ D} < \text{SE} \leq -0.50 \text{ D}$):此度数范围在临幊上通常被界定为轻度近视,对视力影响相对较小,眼底发生器质性病变的风险较低。共计 26 例 38 眼,男 15 例,女 11 例,年龄 10~17(平均 13.74 ± 2.05)岁;(2) 中度近视组($-6.00 \text{ D} < \text{SE} \leq -3.00 \text{ D}$):该范围属于中度近视范畴,患者视力损害较轻度近视更明显,眼底可能开始出现早期适应性改变。共计 46 例 76 眼,男 24 例,女 22 例,年龄 11~19(平均 14.25 ± 2.46)岁;(3) 高度近视组($\text{SE} \leq -6.00 \text{ D}$):临幊上将此度数以下定义为高度近视,此类患者因眼轴过度增长,眼底发生视网膜变性、黄斑病变等病理性改变的风险明显升高。共计 34 例 62 眼,男 18 例,女 16 例,年龄 10~19(平均 14.89 ± 2.95)岁。

1.2 方法

1.2.1 一般检查 收集入组患者一般资料,如性别、年龄、体质量指数(body mass index, BMI)、近视眼别等信息。所有眼科常规检查均在同一天由同一检查人员完成:(1)散瞳前,使用 0.5% 复方托吡卡胺滴眼液散瞳,滴双眼 3 次,给药间隔为 5 min,闭目 30 min 后,当瞳孔对光反射消失、瞳孔直径 $>6 \text{ mm}$,达到完全性睫状肌麻痹后,再均由同一医师完成验光。采用等效球镜法计算 SE, SE=球镜度数+1/2 柱镜度数;(2)散瞳前,采用光学生物测量仪测量中央角膜厚度(central corneal thickness, CCT)、眼轴长度(axial length, AL);(3)散瞳前,采用角膜地形图仪测量角膜陡峭轴曲率(the steep keratometry, Ks)、平坦轴曲率(the flap keratometry, Kf)、平均曲率(mean keratometry, Km),计算角膜散光(astigmatism, AST),即 $\text{AST} = \text{Kf} - \text{Ks}$;(4)散瞳前,采用眼压计测量 IOP。

1.2.2 OCTA 检查 本研究采用 RTVue XR 光谱域 OCTA 检查,该设备具有高分辨率、快速成像的优势,可清晰精准显示眼部血管网络结构与视网膜各层厚度,适用于本研究对视盘区血管密度及黄斑厚度的量化测量需求。散瞳后,受检者取坐位固定头位后,调节摄像头与角膜垂直、瞳孔水平,引导其注视蓝色视标以减少头眼运动及眨眼;扫描过程中若出现轻微头眼移动,需及时提醒患者并重新调整摄像头位置,确保成像对准目标区域。优先扫描优势眼,待受检者掌握注视方法后再扫描对侧眼。黄斑区扫描采用 HD Angio Retina 6.0 mm 模式,以黄斑中心凹为圆心扫描 6 mm 区域,按 ETDRS 标准经 3 个同心圆及 4 个象限划分 9 个视网膜亚区,每眼扫描 3 次取均值分析厚度。视盘区选用 HD Angio Disc 4.5 mm 模式,以视盘为中心扫描 4.5 mm 区域,依据 Garway-heath 标准测量血管密度,分 4 个扇形区分析浅层血管密度,由设备软件计算以百分比呈现。所有检查由同一名医师完成,剔除固视不良致伪影或信号强度 <50 的图像,确保数据质量。

1.2.3 微视野检查 微视野检查旨在评估黄斑区视网膜功

能状态,通过检测视网膜平均光敏感度(mean light sensitivity,MLS)与2°、4°固视率,直接反映黄斑区神经细胞的功能变化。本研究于散瞳前,使用Nidek MP-3微视野计进行检测,刺激点按直径2°、6°、10°的同心圆分布,中心圆8点,中、外层各16点;采用Goldmann III号视标,最大亮度10 000 asb,刺激持续200 ms,光敏感度阈值0~34 dB,背景光为31.4 asb白光模拟自然光。设备可在-12~+15 D范围内自动调焦,超范围者配镜矫正后检测。检查前指导患者保持舒适坐姿与头部稳定,集中注意力注视红色光标,余光感知刺激点时立即按键反馈,避免误触或延迟响应。经预实验让患者熟悉操作流程后正式检测,用Photoshop划分黄斑图像为中央、上方、鼻侧、下方、颞侧五区域记录MLS;系统自动检测2°和4°范围内注视点的集中程度,记录2°、4°固视率。

统计学分析:采用统计学软件SPSS 22.0进行分析。符合正态分布的计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,三组间比较采用F检验,进一步两两比较采用LSD-t检验;计数资料以n(%)表示,行 χ^2 检验;采用广义加性模型(generalized additive model,GAM)分析近视程度与视盘区血管密度、黄斑厚度的关系;Pearson相关分析视盘区血管密度与黄斑厚度的关系;采用Hayes Process程序分析黄斑厚度、视盘区血管密度在SE及MLS整体之间的中介效应。 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2结果

2.1 不同程度近视患者临床资料比较 三组患者年龄、BMI、性别、眼别分布及CCT、Ks、Kf、Km、AST、IOP比较,差异无统计学意义(均 $P>0.05$),具有可比性。与低度近视组相比,中度近视组、高度近视组患者的SE水平明显下降,AL水平明显升高(均 $P<0.05$);且中度近视组与高度近视组的SE、AL水平亦存在明显差异(均 $P<0.05$),见表1。

2.2 不同程度近视患者视盘区血管密度比较 三组患者视盘区血管密度比较,差异有统计学意义(均 $P<0.001$)。与低度近视组相比,中度近视组、高度近视组患者的视盘区上方、鼻侧、下方、颞侧、平均血管密度均明显下降(均 $P<0.05$),且中度近视组与高度近视组也存在明显差异(均 $P<0.05$),见表2。

2.3 不同程度近视患者黄斑厚度比较 三组黄斑厚度数据收集过程中采用Grubbs法识别异常值(共检出3个异常值,均因扫描伪影导致,已予以剔除),确保数据可靠性。三组近视患者黄斑中央凹厚度、黄斑区内环(上方、下方、颞侧)及外环(上方、下方、颞侧)厚度比较,差异有统计学意义(均 $P<0.01$)。与低度近视组相比,中度近视组、高度近视组患者的黄斑区内环(上方、下方、颞侧)及外环(上方、下方、颞侧)厚度均明显下降,黄斑中央凹厚度明显升高(均 $P<0.05$),且中度近视组与高度近视组间存在明显差异(均 $P<0.05$),见表3。

表1 不同程度近视患者临床资料比较

指标	低度近视组 (26例38眼)	中度近视组 (46例76眼)	高度近视组 (34例62眼)	χ^2/F	P
年龄($\bar{x}\pm s$,岁)	13.74±2.05	14.25±2.46	14.89±2.95	2.497	0.085
BMI($\bar{x}\pm s$,kg/m ²)	19.32±1.51	20.03±2.62	20.42±2.86	2.219	0.112
性别(例,%)				0.217	0.897
男	15(57.69)	24(52.17)	18(52.94)		
女	11(42.31)	22(47.83)	16(47.06)		
眼别(眼,%)				1.137	0.566
左眼	20(52.63)	35(46.05)	34(54.84)		
右眼	18(47.37)	41(53.95)	28(45.16)		
SE($\bar{x}\pm s$,D)	-2.19±0.47	-4.79±0.51 ^a	-7.36±0.67 ^{a,c}	1009.213	<0.001
CCT($\bar{x}\pm s$,μm)	532.84±37.97	525.95±29.18	522.52±27.45	1.335	0.266
AL($\bar{x}\pm s$,mm)	24.06±0.73	25.58±0.82 ^a	26.24±0.81 ^{a,c}	89.822	<0.001
Ks($\bar{x}\pm s$,D)	43.08±1.03	43.04±1.37	42.91±1.33	0.260	0.772
Kf($\bar{x}\pm s$,D)	44.11±0.83	44.02±1.32	43.86±1.37	0.526	0.592
Km($\bar{x}\pm s$,D)	43.38±1.46	43.17±1.37	43.05±1.63	0.587	0.557
AST($\bar{x}\pm s$,D)	1.02±0.68	0.98±0.69	0.95±0.61	0.164	0.849
IOP($\bar{x}\pm s$,mmHg)	15.09±1.04	15.18±1.76	15.25±1.82	0.103	0.902

注:低度近视组为-3.00 D<SE≤-0.50 D;中度近视组为-6.00 D<SE≤-3.00 D;高度近视组为SE≤-6.00 D。^aP<0.05 vs 低度近视组;^cP<0.05 vs 中度近视组。

表2 不同程度近视患者视盘区血管密度比较

方位	低度近视组(26例38眼)	中度近视组(46例76眼)	高度近视组(34例62眼)	F	P
上方	56.09±2.38	52.81±3.38 ^a	50.15±4.07 ^{a,c}	34.981	<0.001
鼻侧	51.92±3.07	48.96±3.42 ^a	47.14±3.38 ^{a,c}	24.297	<0.001
下方	58.63±2.47	54.75±3.60 ^a	51.24±3.60 ^{a,c}	57.070	<0.001
颞侧	58.38±3.31	55.76±2.81 ^a	52.32±2.69 ^{a,c}	55.304	<0.001
平均	56.26±1.41	53.07±1.72 ^a	50.21±1.82 ^{a,c}	151.709	<0.001

注:低度近视组为-3.00 D<SE≤-0.50 D;中度近视组为-6.00 D<SE≤-3.00 D;高度近视组为SE≤-6.00 D。^aP<0.05 vs 低度近视组;^cP<0.05 vs 中度近视组。

2.4 近视程度与视盘区血管密度及黄斑厚度的 GAM 分析
 GAM 可通过非参数光滑函数灵活拟合变量间的非线性关系,无需预设变量关联形式,更适用于解析近视程度与眼底结构指标的复杂联系。本研究采用 s() 函数对连续变量进行平滑处理,以分析近视程度的影响因素。结果表明,视盘区各方位及平均血管密度、黄斑区内环(上方、下方、颞侧)及外环(上方、下方、颞侧)厚度均为具有统计学意义的影响变量($P<0.05$),且对青少年近视程度均呈负向作用;黄斑中央凹厚度为具有统计学意义的影响变量($P<0.05$),且对青少年近视程度呈正向作用,见表 4,图 1。

2.5 不同近视程度患者微视野相关指标对比 2° 固视率指固视点落在以注视目标为中心 2° 视角范围内的比例, 4° 固视率为视角范围扩大至 4° 的固视集中程度,二者均反映黄斑区固视稳定性;MLS 指黄斑区不同区域对光刺激的感知阈值,整体 MLS 可综合评估黄斑神经功能。三组近视患者 2° 固视率、 4° 固视率及中心、颞侧、上方、下方、整体 MLS 比较,差异有统计学意义(均 $P<0.001$)。与低度近视组相比,中度近视组、高度近视组患者的 2° 固视率、 4° 固视率及中心、颞侧、上方、下方、整体 MLS 均明显下降,差异有统计学意义(均 $P<0.05$),且中度近视组与高度近视组间存在明显差异(均 $P<0.05$)。中度近视组、高

度近视组固视率及 MLS 的明显下降,提示随着近视程度加重,黄斑区神经细胞功能受损,固视稳定性减弱,可能导致精细视觉如阅读、视物分辨能力下降,见表 5。

2.6 视盘区血管密度与黄斑厚度的关系 采用 Pearson 相关分析视盘区血管密度与黄斑厚度的关系,结果显示,视盘区上方、下方、颞侧、平均血管密度与黄斑中央凹厚度呈负相关(均 $P<0.05$),与黄斑内环上方、下方、颞侧厚度及黄斑外环上方、下方、颞侧厚度呈正相关(均 $P<0.05$);视盘区鼻侧血管密度与黄斑中央凹厚度呈负相关,与黄斑外环上方、下方厚度呈正相关(均 $P<0.05$),见表 6。

2.7 中介效应分析 中介效应分析用于探讨变量之间的间接作用机制,本研究通过该分析考察黄斑厚度及视盘区血管密度在 SE 与 MLS 之间的中介调控作用。中介效应分析结果显示,黄斑中央凹、内环上方、内环下方、内环颞侧、外环上方、外环下方、外环颞侧厚度及视盘区上方、下方、颞侧、平均血管密度在 SE 与 MLS 整体之间存在明显的中介调控作用(均 $P<0.001$)。为验证中介效应的可靠性,本研究采用了 Bootstrap 重复抽样法(重复抽样 5 000 次,设定 95%CI)进行检验,结果显示各中介路径的间接效应 95%CI 均未包含 0,表明中介效应明显且稳定($P<0.001$),见表 7。

表 3 不同程度近视患者黄斑厚度比较

($\bar{x}\pm s$, μm)

区域	低度近视组(26 例 38 眼)	中度近视组(46 例 76 眼)	高度近视组(34 例 62 眼)	F	P
黄斑中央凹	168.17 \pm 17.59	207.39 \pm 14.25 ^a	236.52 \pm 18.76 ^{a,c}	198.520	<0.001
内环					
上方	287.75 \pm 13.72	283.86 \pm 16.36 ^a	278.47 \pm 15.54 ^{a,c}	4.516	0.012
鼻侧	324.04 \pm 18.41	319.04 \pm 23.15	315.39 \pm 17.57	2.137	0.121
下方	308.55 \pm 11.49	274.33 \pm 15.34 ^a	231.62 \pm 14.01 ^{a,c}	369.149	<0.001
颞侧	275.33 \pm 12.39	252.99 \pm 12.98 ^a	221.36 \pm 13.60 ^{a,c}	216.283	<0.001
外环					
上方	312.35 \pm 16.67	301.29 \pm 15.98 ^a	274.65 \pm 20.40 ^{a,c}	63.164	<0.001
鼻侧	304.22 \pm 16.57	301.40 \pm 15.19	298.08 \pm 16.42	1.833	0.163
下方	316.15 \pm 20.08	286.44 \pm 18.32 ^a	255.98 \pm 18.31 ^{a,c}	125.438	<0.001
颞侧	277.78 \pm 12.90	264.66 \pm 14.50 ^a	242.27 \pm 16.33 ^{a,c}	75.001	<0.001

注:低度近视组为 $-3.00 \text{ D} < \text{SE} \leq -0.50 \text{ D}$;中度近视组为 $-6.00 \text{ D} < \text{SE} \leq -3.00 \text{ D}$;高度近视组为 $\text{SE} \leq -6.00 \text{ D}$ 。^a $P<0.05$ vs 低度近视组;

^c $P<0.05$ vs 中度近视组。

表 4 视盘区血管密度和黄斑厚度与近视程度的参数效应

变量	有效自由度	均方和	均方	F	P
视盘区上方血管密度	2	9.754	4.877	6.524	0.009
视盘区鼻侧血管密度	2	10.025	5.013	7.354	0.005
视盘区下方血管密度	2	13.885	6.942	7.940	0.003
视盘区颞侧血管密度	2	16.590	8.295	9.827	<0.001
视盘区平均血管密度	2	15.151	7.575	8.340	<0.001
黄斑中央凹厚度	2	8.762	4.381	5.939	0.013
黄斑内环上方厚度	2	7.287	3.644	4.054	0.024
黄斑内环下方厚度	2	7.704	3.852	4.755	0.018
黄斑内环颞侧厚度	2	8.478	4.239	5.751	0.011
黄斑外环上方厚度	2	6.296	3.148	3.834	0.028
黄斑外环下方厚度	2	5.854	2.927	2.935	0.037
黄斑外环颞侧厚度	2	5.467	2.733	2.142	0.042

表5 不同程度近视患者微视野相关指标对比

指标	低度近视组(26例38眼)	中度近视组(46例76眼)	高度近视组(34例62眼)	F	P
2°固视率(%)	92.93±10.34	87.60±7.72 ^a	71.83±7.39 ^{a,c}	96.245	<0.001
4°固视率(%)	96.35±3.74	93.13±3.23 ^a	89.36±7.25 ^{a,c}	23.106	<0.001
MLS(dB)					
中心	26.77±1.14	24.23±1.22 ^a	20.19±1.24 ^{a,c}	384.491	<0.001
颞侧	27.76±1.36	25.63±1.33 ^a	22.78±1.38 ^{a,c}	170.295	<0.001
上方	27.73±1.01	27.19±1.13 ^a	26.40±1.27 ^{a,c}	16.902	<0.001
鼻侧	27.69±1.17	27.70±1.38	27.43±1.27	0.864	0.423
下方	28.05±1.20	27.67±1.28	26.63±1.46 ^{a,c}	16.460	<0.001
整体	27.60±0.47	26.48±0.56 ^a	24.69±0.58 ^{a,c}	364.005	<0.001

注:低度近视组为-3.00 D<SE≤-0.50 D;中度近视组为-6.00 D<SE≤-3.00 D;高度近视组为 SE≤-6.00 D。^a $P<0.05$ vs 低度近视组;

^c $P<0.05$ vs 中度近视组。

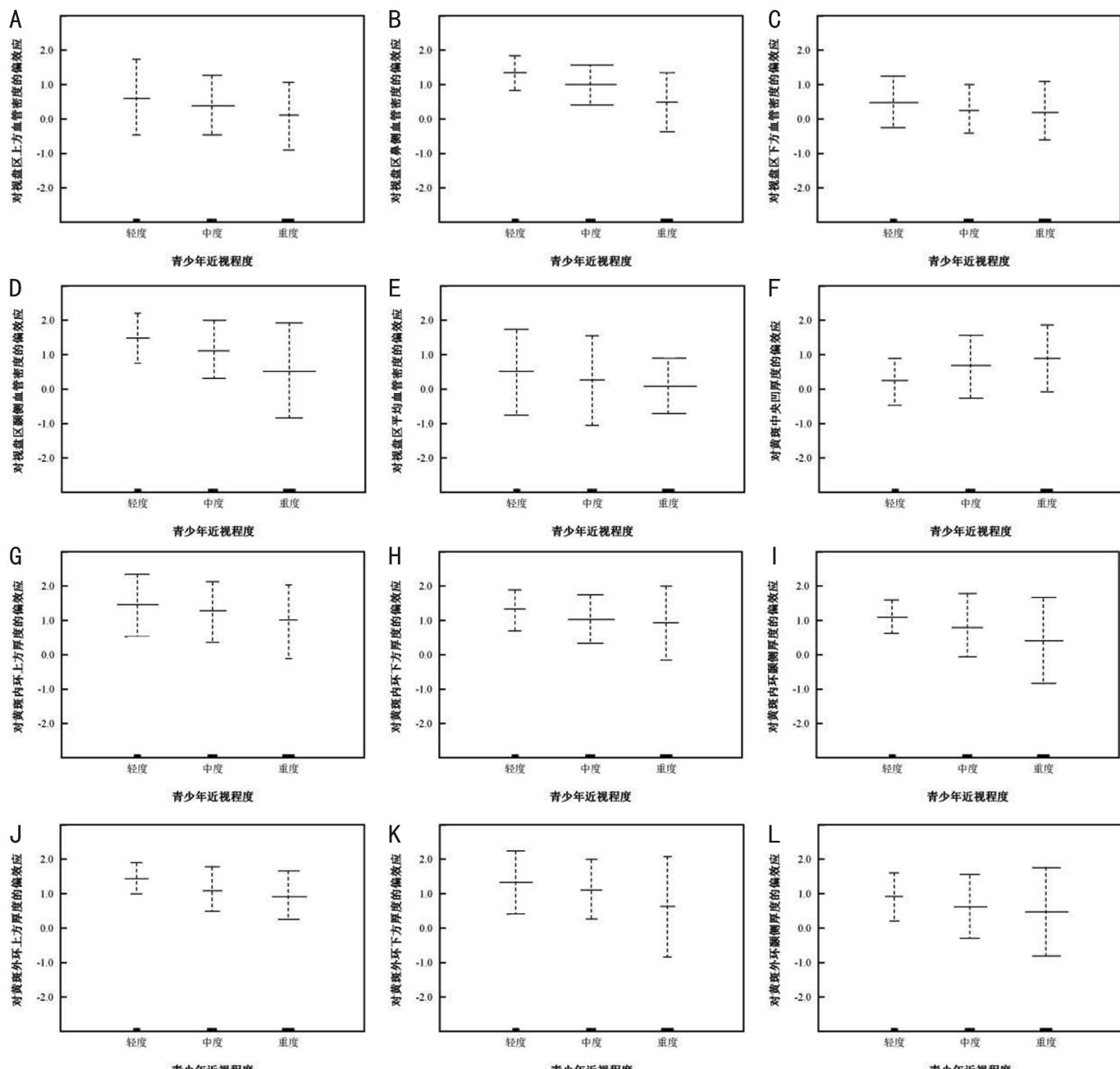


图1 近视程度与视盘区血管密度及黄斑厚度的 GAM 分析 A:视盘区上方血管密度;B:视盘区鼻侧血管密度;C:视盘区下方血管密度;D:视盘区颞侧血管密度;E:视盘区平均血管密度;F:黄斑中央凹厚度;G:黄斑内环上方厚度;H:黄斑内环下方厚度;I:黄斑内环颞侧方厚度;J:黄斑外环上方厚度;K:黄斑外环下方厚度;L:黄斑外环颞侧厚度。

表 6 黄斑厚度与视盘区血管密度的关系

项目	上方		鼻侧		下方	
	r(95%CI)	P	r(95%CI)	P	r(95%CI)	P
黄斑中央凹	-0.751(-0.797--0.615)	0.002	-0.623(-0.765--0.415)	0.046	-0.724(-0.818--0.657)	0.028
黄斑内环						
上方	0.609(0.556-0.723)	0.031	0.352(-0.237-0.532)	0.189	0.649(0.508-0.691)	0.027
下方	0.685(0.654-0.800)	0.019	0.430(-0.229-0.599)	0.067	0.742(0.617-0.783)	0.010
颞侧	0.552(0.490-0.671)	0.039	0.343(-0.128-0.525)	0.238	0.588(0.453-0.642)	0.036
黄斑外环						
上方	0.751(0.709-0.847)	0.008	0.508(0.315-0.662)	0.044	0.808(0.657-0.848)	0.001
下方	0.642(0.619-0.759)	0.029	0.497(0.302-0.652)	0.045	0.705(0.547-0.739)	0.012
颞侧	0.482(0.419-0.610)	0.045	0.330(-0.114-0.513)	0.476	0.521(0.376-0.575)	0.041
项目	颞侧		平均			
	r(95%CI)	P	r(95%CI)	P		
黄斑中央凹	-0.875(-0.905--0.834)	<0.001	-0.826(-0.913--0.758)	<0.001		
黄斑内环						
上方	0.765(0.712-0.808)	0.006	0.659(0.582-0.796)	0.026		
下方	0.883(0.859-0.900)	<0.001	0.733(0.510-0.849)	0.008		
颞侧	0.650(0.582-0.709)	0.026	0.605(0.576-0.794)	0.035		
黄斑外环						
上方	0.897(0.815-0.911)	<0.001	0.776(0.589-0.863)	<0.001		
下方	0.852(0.804-0.905)	<0.001	0.714(0.650-0.892)	0.010		
颞侧	0.626(0.556-0.689)	0.030	0.565(0.437-0.693)	0.038		

表 7 黄斑厚度和视盘区血管密度在 SE 及 MLS 整体之间的中介效应

项目	SE 与 MLS 整体	
	中介效应(95%CI)	P
黄斑厚度		
黄斑中央凹	0.293(0.104-0.384)	<0.001
黄斑内环上方	0.209(0.116-0.361)	<0.001
黄斑内环下方	0.182(0.131-0.242)	<0.001
黄斑内环颞侧	0.254(0.147-0.333)	<0.001
黄斑外环上方	0.198(0.163-0.284)	<0.001
黄斑外环下方	0.181(0.128-0.298)	<0.001
黄斑外环颞侧	0.105(0.069-0.273)	<0.001
视盘区血管密度		
上方	0.211(0.123-0.362)	<0.001
鼻侧	0.041(-0.029-0.179)	0.582
下方	0.187(0.115-0.302)	<0.001
颞侧	0.196(0.110-0.251)	<0.001
平均	0.083(0.039-0.134)	<0.001

3 讨论

青少年近视患病率的攀升已成为全球性公共卫生问题,其高度近视低龄化引发的不可逆眼底病变风险备受关注^[11]。深入探究青少年近视相关眼部结构变化,对早期干预具有关键意义。部分研究表明,视盘区的血流灌注状态可维系视网膜的代谢需求,而黄斑区的厚度改变则可以直观体现神经细胞与纤维层的结构完整性^[12-13]。Vahedi 等^[14]研究指出,视盘血管密度的异常变化可引起黄斑亚区厚度发生改变。但针对不同近视程度青少年的视盘血管密度差异及其与黄斑亚区厚度的相关性研究仍较少。

因此,本研究基于 OCTA 技术,分析不同程度近视青少年患者视盘区血管密度与黄斑厚度的差异,及与微视野敏感度的内在联系,旨在为近视相关眼底病变的早期诊断、病情进展监测提供影像学依据。

本研究结果表明,与低度近视组相比,中度近视组视盘区上方、鼻侧、下方、颞侧及平均血管密度分别下降了 5.85%、5.70%、6.62%、4.49%、5.67%,高度近视组则分别下降了 10.59%、9.21%、12.60%、10.38%、10.75%,这表明视盘区血管密度的变化与近视程度存在一定的关联。这一结果与曾诚杰等^[15]的研究结论一致,其研究提出随着 AL 增加引发的巩膜扩张会对血管产生牵张力,导致血管壁应力增加,可引起血管收缩、管径变细,进而使血管密度降低。同时,Benavente-Perez^[5]在综述中也证实了近视患者视网膜血管参与病变进程,高度近视患者视盘周围毛细血管密度明显降低。但与 Fuganti 等^[7]的研究存在一定差异,该研究发现中度近视患者存在血管代偿性扩张导致血管密度升高的现象。分析本研究结果与其差异的原因可能在于:(1)样本纳入标准不同,Fuganti 等^[7]的研究未严格限定青少年群体,而本研究聚焦 10-19 岁青少年,该年龄段眼部结构仍处于发育阶段,血管代偿能力与成人存在差异;(2)检测区域不同,Fuganti 等^[7]重点分析脉络膜血管指标,而本研究针对视盘区浅层血管密度,血管层级的差异可能导致结果不同。

此外,高度近视患者眼部血液循环可能发生改变,局部缺氧可激活缺氧诱导因子-1α 信号通路,调控血管内皮生长因子等细胞因子表达,初期血管内皮生长因子升高可促进血管增生代偿,后期持续缺氧则导致血管内皮细胞功能紊乱、凋亡增加,最终引发血管密度下降^[16]。除了视盘区血管密度的改变,黄斑区厚度的变化也是青少年近视相

关眼部结构研究中的另一核心关注点。本研究结果显示,与低度近视组相比,中度近视组、高度近视组患者的黄斑中央凹厚度明显升高(低度近视组 $168.17 \pm 17.59 \mu\text{m}$, 中度近视组 $207.39 \pm 14.25 \mu\text{m}$, 高度近视组 $236.52 \pm 18.76 \mu\text{m}$), 这与 Zhang 等^[17] 的研究结果一致, 其研究指出, 高度近视会导致患者 AL 增加, 对视网膜产生纵向牵拉, 使得中央凹区域的神经上皮层发生拉伸、变薄, 而周围组织向中央凹聚集, 从而导致黄斑中央凹厚度相对增加。同时, Zhang 等^[18] 的研究也证实, 近视进展会导致黄斑其余亚区域厚度降低, 与本研究中颞侧及上下方周边区域结构性改变更为明显的结论相符。但 Panda-Jonas 等^[19] 的研究认为 AL 与黄斑区厚度无关, 这一差异可能源于检测技术不同, Panda-Jonas 等^[19] 采用传统光学相干断层扫描, 对黄斑亚区的划分不够精细; 而本研究采用的光谱域 OCTA, 具有更高的分辨率, 可精准量化黄斑各亚区厚度, 且严格排除了病理性眼底改变的患者, 减少了混杂因素的干扰。

据报道, 在近视患者黄斑区出现明显的解剖结构改变之前, 视网膜光敏感度就已经出现了明显下降, 并随着 SE 增加和 AL 延长而进行性下降^[20]。本研究发现中度近视组、高度近视组微视野相关指标明显下降, 且视盘区血管密度与黄斑厚度在 SE 与整体 MLS 间存在中介调控作用。这与 Zhong 等^[21] 的研究结论一致, 其研究证实高度近视患者视盘周围血管密度与视野平均敏感度呈正相关。同时, Song 等^[22] 的研究也指出黄斑结构与视功能异常密切相关, 血管密度下降影响视网膜血液供应, 黄斑厚度改变损伤感光细胞功能, 二者共同导致视觉功能下降。视盘区血管密度下降影响视网膜的血液供应和营养传输, 黄斑厚度的改变直接影响感光细胞的功能, 二者共同作用导致视网膜光敏感度降低, 固视能力下降, 本研究结果与其一致^[23-24]。目前尚未有研究系统揭示视盘区血管密度与黄斑厚度在近视程度与微视野敏感度之间的中介机制, 本研究对该机制进行了初步研究, 为理解近视导致视觉功能下降的复杂过程提供一定研究依据。

GAM 分析显示, 青少年近视程度与视盘区各区域血管密度及黄斑区内环上方、内环下方、内环颞侧、外环上方、外环下方及外环颞侧厚度呈负相关, 与黄斑中央凹厚度呈正相关。这表明近视加重伴随视盘血管密度和黄斑周边厚度下降、中央凹增厚。Pearson 相关性分析发现, 视盘区上方、下方、颞侧、平均血管密度与黄斑中央凹厚度呈负相关, 与黄斑内环上方、下方、颞侧厚度及黄斑外环上方、下方、颞侧厚度呈正相关; 视盘区鼻侧血管密度与黄斑中央凹厚度呈负相关, 与黄斑外环上方、下方厚度呈正相关。这提示视盘血管可通过血流灌注维系黄斑周边结构, 其密度降低可致周边厚度下降, 中央凹则以代偿性增厚适应缺血。表明视盘血管密度与黄斑不同区域厚度存在特异性关联, 为相关眼病研究与临床评估提供了关键依据。有研究发现, 近视程度加重会导致 AL 增加, 从而引起视盘区血管密度降低和黄斑厚度改变, 并进一步影响视网膜的血液供应、营养代谢和神经传导功能, 最终导致视网膜光敏感度下降^[25-26]。本研究发现黄斑厚度、视盘区血管密度在 SE 及 MLS 整体之间存在明显的中介调控作用。这一结果表明, 近视程度对 MLS 的影响, 不仅存在直接作

用, 还通过改变黄斑厚度和视盘区血管密度产生间接影响。这一中介机制的明确, 为理解近视导致视觉功能下降的复杂过程提供了更完整的理论框架。在临床应用中, 医生可以通过监测黄斑厚度和视盘区血管密度等指标, 更准确地评估近视患者视网膜功能状态, 预测疾病进展, 为患者制定针对性的营养补充方案或视力训练计划。

本研究创新点在于聚焦青少年群体, 基于 OCTA 技术结合 GAM 与中介效应分析, 首次量化视盘区血管密度与黄斑各亚区厚度的相关性及二者在近视程度与微视野敏感度间的中介作用; 在临床应用上, 可将上述指标作为近视眼底病变早期预警与病情监测依据, 助力制定个性化防控方案, 同时为相关临床研究提供参考。本研究存在一定局限性: 研究样本仅来源于单一医院, 结果的普适性及外推性受限; 本研究为横断面研究, 仅能揭示变量间的相关性, 无法明确因果关系。未来将扩大样本量, 开展多中心、跨地域的临床研究, 增强研究结果的可靠性与普适性。同时, 设计纵向队列研究, 观察两者动态变化, 明确其与近视进展的因果关系, 为近视防控提供更精准的理论依据与干预策略。

综上所述, 随着青少年患者近视程度的加深, 视盘周围血管密度及黄斑厚度均发生明显变化, 且两者在 SE 与 MLS 之间存在中介调控机制。这表明视盘区血管密度和黄斑厚度在近视发展过程中的重要作用, 还为近视相关眼底病变的早期发现、疾病进展评估提供了新的影像学指标, 为近视防控策略的制定提供了重要的理论依据。

利益冲突声明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 韩丽芳论文选题与修改, 初稿撰写; 程材文献检索, 数据分析。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

- [1] Liang JH, Pu YQ, Chen JQ, et al. Global prevalence, trend and projection of myopia in children and adolescents from 1990 to 2050: a comprehensive systematic review and meta-analysis. Br J Ophthalmol, 2025, 109(3): 362-371.
- [2] Zhu ZT, Chen YX, Tan Z, et al. Interventions recommended for myopia prevention and control among children and adolescents in China: a systematic review. Br J Ophthalmol, 2023, 107(2): 160-166.
- [3] 曾诚杰, 杨前, 孟祥俊. 青少年眼轴长度与眼部损害的相关性研究进展. 国际眼科杂志, 2025, 25(8): 1291-1295.
- [4] 郭大佑, 刘开元, 章慧英, 等. 基于 GPU 高速并行计算实现逆信噪比-复值退相关 OCTA 实时成像. 中国激光, 2024, 51(9): 178-188.
- [5] Benavente-Perez A. Evidence of vascular involvement in myopia: a review. Front Med, 2023, 10: 1112996.
- [6] Liu XT, Zhang F, Wang YL, et al. Associations between optic disc characteristics and macular choroidal microvasculature in young patients with high myopia. Clin Exp Ophthalmol, 2021, 49(6): 560-569.
- [7] Fuganti RM, Campiolo F, Mansour A, et al. Analysis of choroidal markers of activity in pachychoroid disease spectrum. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2025, 263(4): 973-984.
- [8] Ptito M, Bleau M, Bouskila J. The retina: a window into the brain. Cells, 2021, 10(12): 3269.
- [9] Yang X, Zhang JM, Liang YY. Correlation between choroidal thickness and the degree of myopia. Technol Health Care, 2024, 32(6): 5065-5080.

- [10] Sedaghat MR, Momeni-Moghaddam H, Azimi A, et al. Corneal biomechanical properties in varying severities of myopia. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 8:595330.
- [11] Shah R, Vlasak N, Evans BJW. High myopia: Reviews of myopia control strategies and myopia complications. *Ophthalmic Physiologic Optic*, 2024, 44(6):1248–1260.
- [12] 余慧敏, 孙旭芳. 光学相干断层扫描血管成像量化指标在眼底疾病中的应用. *眼科新进展*, 2021, 41(3):276–281.
- [13] Lee SS, Lingham G, Alonso-Caneiro D, et al. Macular thickness profile and its association with best-corrected visual acuity in healthy young adults. *Trans Vis Sci Tech*, 2021, 10(3):8.
- [14] Vahedi H, Abdollahi M, Moshfeghinia R, et al. Retinal thickness and vascular density changes in Keratoconus: a systematic review and meta-analysis. *Heliyon*, 2025, 11(2):e42099.
- [15] 曾诚杰, 杨前, 孟祥俊. 青少年眼轴长度与眼部损害的相关性研究进展. *国际眼科杂志*, 2025, 25(8):1291–1295.
- [16] Lin LL, Zhang XH, Huang CT, et al. Evaluation of retinal vascular density and related factors using OCTA in children and adolescents with myopia without maculopathy. *J Int Med Res*, 2023, 51(1):3000605221150136.
- [17] Zhang XY, Tian QM, Wu QX, et al. Thickness, vessel density of retina and choroid on OCTA in young adults (18–24 years old). *Microvasc Res*, 2021, 136:104169.
- [18] Zhang JS, Li J, Wang JD, et al. The association of myopia progression with changes in retinal thickness among primary school students with myopia. *J Ophthalmol*, 2024, 2024:1055700.
- [19] Panda-Jonas S, Holbach L, Jonas JB. Choriocapillaris thickness and density in axially elongated eyes. *Acta Ophthalmol*, 2021, 99(1):104–110.
- [20] 夏阳, 蔺云霞, 徐玲. 无黄斑病变近视患者黄斑区视网膜结构与视功能改变的相关性. *眼科新进展*, 2020, 40(5):457–460, 465.
- [21] Zhong H, Dong QQ, Cun Q, et al. Peripapillary vessel density correlates with visual field mean sensitivity in highly myopic eyes. *J Transl Med*, 2022, 20(1):119.
- [22] Song WK, Kim KE, Yoon JY, et al. Association of macular structure, function, and vessel density with foveal threshold in advanced glaucoma. *Sci Rep*, 2022, 12:19771.
- [23] Matos AMF, Defina RLS, Costa-Cunha LVF, et al. Correlation between retinal sensitivity assessed by microperimetry and structural abnormalities on optical coherence tomography after successful epiretinal membrane surgery. *Int J Retina Vitreous*, 2024, 10(1):24.
- [24] Panda-Jonas S, Jonas JB, Jonas RA. Photoreceptor density in relation to axial length and retinal location in human eyes. *Sci Rep*, 2022, 12:21371.
- [25] Zeng C, Tang C, Tan YX, et al. Compartmental analysis of retinal vascular parameters and thickness in myopic eyes using SS-OCTA. *Front Med*, 2024, 11:1521710.
- [26] Wang YX, Pan Z, Xue CC, et al. Macular outer nuclear layer, ellipsoid zone and outer photoreceptor segment band thickness, axial length and other determinants. *Sci Rep*, 2023, 13(1):5386.