

基于 SS-OCTA 探讨眼轴 对全周脉络膜厚度及血流密度的影响

刘雪芬^{1,2,3,4}, 杨儒^{1,2,3}, 王淑霞^{1,2,3}, 郝海涛^{1,2,3}, 梁璐^{1,2,3}, 刘畅⁵, 龚蕤^{1,2}, 姜双^{1,2,3}

(1. 锦州医科大学第三临床医学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 锦州医科大学附属第三医院眼科, 辽宁 锦州 121002;

3. 锦州医科大学儿童青少年健康促进协同创新中心, 辽宁 锦州 121001;

4. 广州卫生职业技术学院临床医学院, 广东 广州 510500; 5. 锦州市中心医院眼科, 辽宁 锦州 121000)

摘要: **目的** 比较不同眼轴的全周 24 mm×20 mm 范围 3×3 网格中 9 个区域的脉络膜厚度(choroidal thickness, ChT)及血流密度的差异,探讨眼轴长度(axial length, AL)对全周脉络膜厚度及血流的影响。**方法** 横断面研究,选取新疆裕民小中高 6~18 岁儿童青少年 843 人,按照 AL 分 4 组:短眼轴组,≤22 mm(112 眼);正常眼轴组,22 mm<AL≤24 mm(346 眼);较长眼轴组,24 mm<AL≤26 mm(232 眼);长眼轴组,>26 mm(153 眼)。采用超广角 SS-OCTA 测量全周 24 mm×20 mm 范围的脉络膜指标,包括 ChT、脉络膜毛细血管血流密度(choroidal capillary perfusion, CCP)、脉络膜血管指数(choroidal vascular index, CVI)、脉络膜血管体积比(choroidal vascular volume ratio, CVV)、脉络膜基质指数(choroidal stromal index, CSI)、脉络膜基质体积比(choroidal stroma volume ratio, CSV),按区域划分为颞上、上方、鼻上、颞侧、黄斑中央区、鼻侧、颞下、下方及鼻下等 9 个区域,对比 4 组各项指标各区域的差异以及与 AL 的相关性。**结果** 4 组颞上、上方、鼻上、颞侧、黄斑中央区、鼻侧、颞下、下方和鼻下等 9 个区域(全周 24 mm×20 mm)的 ChT、CVI、CVV 和 CSV 呈显著差异,并随着 AL 的增加而下降,相反各区域 CSI 随眼轴的增长而增加($P<0.001$),除上方区域的 CCP 存在显著差异外($P=0.006$),其他 8 个区域的 CCP 无明显差异($P>0.001$)。两两比较显示:在长眼轴组中,9 个区域的 ChT、CVV 均低于短眼轴组、正常眼轴组和较长眼轴组(P 均 <0.001);9 个区域的 CSI 均高于短眼轴组、正常眼轴组、较长眼轴组(P 均 <0.001);长眼轴组 9 个区域的 CVI、CSV 均低于短眼轴组、正常眼轴组;此外,9 个区域的 ChT、CVV、CVI、CSV 均与眼轴呈负相关($P<0.001$),CSI 的 9 个区域和上方区域的 CCP 与眼轴呈正相关($P<0.001$),其中黄斑中央区 ChT 相关性最强($r_s=-0.597$, $P<0.001$),上方区域 CCP 相关性最弱($r_s=1.70$, $P<0.001$)。**结论** 随着 AL 增加,ChT 变薄存在区域差异,且在黄斑区最为明显;脉络膜血流密度降低也存在区域差异,周边部降低最为明显。同时黄斑中央区 ChT 可能有望作为近视进展的早期预警或近视筛查的指标之一。

关键词: SS-OCTA;眼轴;脉络膜厚度;脉络膜血流

中图分类号:R773.4

文献标志码:A

Impact of axial length on circumferential choroidal thickness and vessel density using SS-OCTA

LIU Xuefen^{1,2,3,4}, YANG Ru^{1,2,3}, WANG Shuxia^{1,2,3}, HAO Haitao^{1,2,3},
LIANG Lu^{1,2,3}, LIU Chang⁵, GONG Rui^{1,2}, JIANG Shuang^{1,2,3}

(1. The Third of Clinical Medical, Jinzhou Medical University, Jinzhou 121001, Liaoning, China;

2. Department of Ophthalmology, The Third Affiliated Hospital of Jinzhou Medical University, Jinzhou 121002, Liaoning, China;

3. Collaborative Innovation Center for Children and Adolescents Health Promotion, Jinzhou Medical University,

Jinzhou 121001, Liaoning, China; 4. Department of Clinical Medical, Guangzhou Health Science College, Guangzhou 510500,

Guangdong, China; 5. Department of Ophthalmology, Jinzhou Central Hospital, Jinzhou 121000, Liaoning, China)

收稿日期:2025-02-16

基金项目:辽宁省科技厅第二批揭榜挂帅项目(2022JH1/10800071);辽宁省教育厅科研平台建设项目(LJ232410160047);辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJKFZ20220248)

通信作者:龚蕤。E-mail:ruigongc@163.com

Abstract: Objective Examine the variations in choroidal thickness (ChT) and blood flow density across nine regions of a 3×3 grid within a 24 mm×20 mm area encircling the entire circumference of the eye, considering differing axial lengths (AL), and analyze the impact of AL on the ChT and blood flow around the complete circumference of the eye. **Methods** This cross-sectional study included 843 children and adolescents aged 6-18 years from elementary, secondary, and high schools in Yumin County, Xinjiang. Participants were divided into four groups based on AL: Short AL, ≤22 mm (112 eyes); Normal AL: 22 mm<L≤24 mm (346 eyes); Moderately long AL: 24 mm<AL≤26 mm (232 eyes); Long AL: >26 mm (153 eyes). Employing ultra-widefield SS-OCTA to assess choroidal parameters within a 24 mm×20 mm circumferential field, encompassing choroidal thickness (ChT), choroidal capillary perfusion (CCP), choroidal vascular index (CVI), choroidal vascular volume ratio (CVV), choroidal stromal index (CSI), and choroidal stroma volume ratio (CSV). The region is segmented into nine areas; superior temporal, superior, superior nasal, temporal, central macular, nasal, inferior temporal, inferior, and inferior nasal. The variations in each indicator between regions and their link with AL are analyzed among four groups. **Results** The ChT, CVI, CVV, and CSV metrics across the four groups of nine regions within the full-field scan (24 mm×20 mm) exhibited significant variations and diminished with increasing AL. In contrast, CSI escalated with eye AL across all locations ($P<0.001$), with the exception of the superior region, where CCP shown a significant difference ($P=0.006$), whereas the other eight regions displayed no significant variations in CCP ($P>0.001$). Pairwise comparisons revealed that in the long AL, the ChT, and CVV values across all nine regions were significantly lower than those in the short AL, normal AL, and moderately long AL (all $P<0.05$). Conversely, the CSI values in all nine regions were significantly higher than those in the short AL, normal AL, and moderately long AL (all $P<0.05$). The CVI and CSV values in the nine regions of the long AL were lower in the short AL, normal AL. Furthermore, ChT, CVV, CVI, and CSV in all nine regions exhibited a negative correlation with AL ($P<0.001$), whereas CSI in all nine regions and the superior region of CCP demonstrated a positive correlation with AL ($P<0.001$). The correlation was strongest for ChT in the macular central region ($r_s = -0.597$, $P<0.001$), and weakest for CCP in the superior region ($r_s = 1.70$, $P<0.001$). **Conclusion** As AL increases, ChT thinning demonstrates regional variations, with the most significant alterations noted in the macular area. Likewise, diminished choroidal blood flow density exhibits regional disparities, with the most pronounced reductions noted in the peripheral regions. Furthermore, choroidal thickness in the central retinal region may function as an early warning sign for myopia progression or as a screening marker for myopia.

Keywords: Swept-source optical coherence tomography angiography; Axial length; Choroidal thickness; Choroidal blood flow

近视作为一种常见的屈光不正,其发病率在全球范围内持续上升,已成为影响公众健康的重要问题。根据目前的近视流行病学预测,到2050年,全球近视患者人数将达到47.58亿,占全球总人口的近一半,其中约9.38亿人将发展为“高度近视”^[1]。近视不仅影响儿童青少年的学习,限制学生未来的就业方向,降低日常生活质量,还会增加国家的经济负担。由于近视的发病机制尚未完全明了,特别是对近视引发的早期眼底病变了解不足,因此亟需及时识别近视早期眼底变化,并采取有效的预防措施,以减少近视导致的不可逆眼底损伤。研究表明,随着眼轴长度(axial length, AL)的增加,视网膜会变薄,导致眼底退化和视力障碍^[2]。得益于眼底影像仪器的发展,研究发现除了视网膜结构的变化,脉络膜在近视的发生发

展过程中也有相应的变化。脉络膜可以为外层视网膜提供氧气和营养,并清除代谢产物和废物,因此可能在眼底退化和病理性近视的进程中起着直接作用^[3]。然而,以往主要集中在黄斑6 mm×6 mm范围或单个测量点,这可能不足以揭示脉络膜整体状态的变化^[4-8]。目前,最新的超广角扫频源光学相干断层扫描血管成像技术(swept-source optical coherence tomography angiography, SS-OCTA)已经取得了显著突破,能够在单次成像中覆盖24 mm×20 mm的广阔范围,同时扫描深度可达6 mm。这项技术不仅能够清晰地呈现脉络膜的整体结构,还能精准捕捉三维血流动态,量化血管和血流动力学信息,提供详细而准确的脉络膜图像^[4,9]。该技术也许能揭示近视进展中全周大范围的脉络膜厚度(choroidal thickness, ChT)与血流

密度的差异特征,尤其可弥补当前关于周边脉络膜研究的空白。因此本研究采用最新超广域 SS-OCTA,纳入比以往多 2~3 倍的儿童青少年人群,研究不同眼轴对 24 mm×20 mm 的 9 个区域 ChT 及脉络膜大中血管层血流密度 (large-sized and medium-sized vessels of the choroid, LMVC): 包含脉络膜血管指数 (choroidal vascular index, CVI)、脉络膜血管体积比 (choroidal vascular volume ratio, CVV)、脉络膜基质指数 (choroidal stromal index, CSI)、脉络膜基质体积比 (choroidal stroma volume ratio, CSV)) 的变化并探讨眼轴与各区域脉络膜参数的相关性,为明确 ChT 和血管密度的早期改变以及预防近视的发展提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2023 年 9 月至 2024 年 9 月新疆裕民校园筛查的儿童 843 例(共 843 只眼;选取双眼中 octa 图片质量较好一眼,若双眼图片质量一致,则选择右眼),其中男 402 例、女 441 例,6~18 (12.19±3.52) 岁。将患者按照 AL 分为 4 组:短眼轴组,≤22 mm (112 眼);正常眼轴组,22 mm<AL≤24 mm (346 眼);较长眼轴组,24 mm<AL≤26 mm (232 眼);长眼轴组,>26 mm (153 眼)。

纳入标准:①6~18 岁儿童青少年;②最佳矫正视力≥0.8,屈光介质清楚;③双眼固视良好,能够配合完成所有检查;④OCTA 图像质量较好,信号强度>7,OCT 检查和眼底检查眼底情况正常。

排除标准:①正在使用角膜塑形镜,多点离焦眼镜,红光治疗以及药物等对 ChT、血流有影响的产品;②存在影响眼底血液循环的疾病,如糖尿病等;③眼底存在病理性改变,如黄斑裂孔、脉络膜新生血管等;④无法配合检查。本研究经锦州医科大学伦理委员会审核批准(JZMULL2023303),所有入组人群或监护人均签署知情同意。

1.2 方法

1.2.1 常规检查

各组的患者常规进行视力、电脑验光、裂隙灯显微镜、眼底检查以及 IOLMaster500 (Carl Zeiss 公司)测量眼轴。

1.2.2 SS-OCTA 检查

1.2.2.1 SS-OCTA 图像获取

OCTA 设备为(BM-400K BMizar,北京图湃科技有限公司)(图 1)。该设备具有波长 1 050 nm 的扫描光源,扫描速率为 200 000 A 扫描/s,每个光学断层扫描体积为 2 560 像素深×1 536 像素宽×1 280 次 B 扫描,对应于深 6 mm×宽 24 mm×范围 20 mm。该设备通过算法识别亮度超过阈值的区域并标记为血管,再利用量化软件进行精确计算。具体操作步骤:受试者取坐位于仪器前,眼睛正视前方,检查者通过鼠标操纵屏幕十字光圈,使光圈正对受试者瞳孔中央,同时调整好焦距,嘱受试者闭眼休息勿动,并告知待会开始拍摄后勿眨眼,休息 5 s 后睁眼,点击“扫描”,期间需维持光圈在瞳孔中央,可操纵鼠标带动光圈一直跟随受试者的瞳孔中央,以最大限度减少采集过程中因患者固视改变或频繁眨眼所产生的图像伪迹。本研究采用设备自带的“24 mm×20 mm”扫描模式,以确保成像范围能够满足研究需求,并选择设备自带的 3×3 网格分区:颞上、上、鼻上、颞、黄斑中央区、鼻、颞下、下和鼻下,图像质量通过系统内置软件可自动评分(8 分及以上的为质量合格)。见图 2。检查均由经验丰富的操作者完成。



图 1 OCTA 设备(BM-400K BMizar,北京图湃科技有限公司)
Figure 1 OCTA Device (BM-400K BMizar; TowardPi Medical Technology Co., Ltd., Beijing, China)

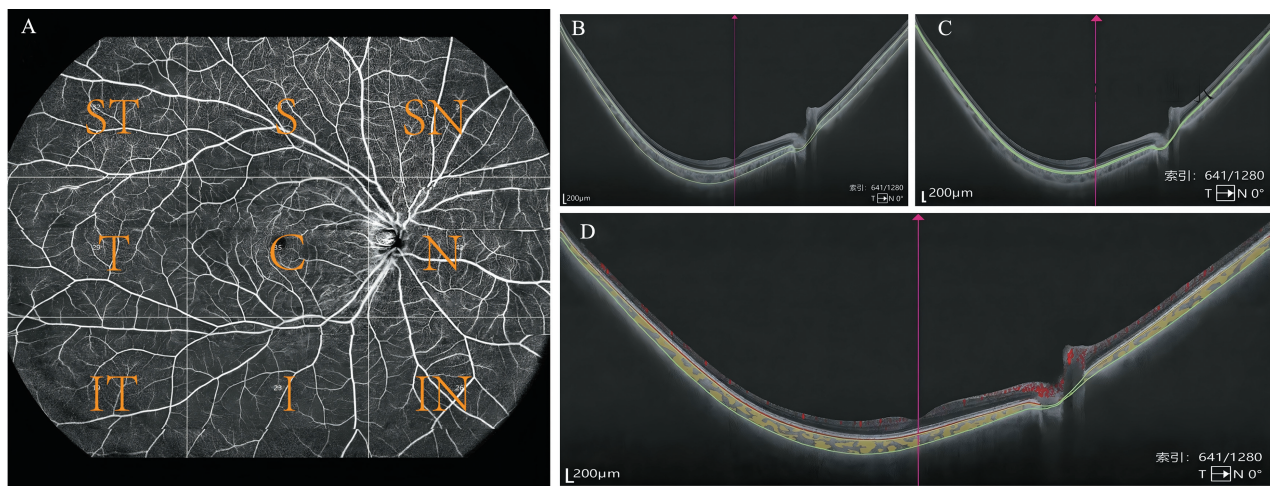


图2 OCTA 扫描示意图

A: OCTA 图像显示 3×3 网格分区图, 由 9 个矩形组成, ST 颞上、S 上方、SN 鼻上、T 颞侧、C 黄斑中央区、N 鼻侧、IT 颞下、I 下方、IN 鼻下, 总面积为 $24 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$; B: 代表性的扫描显示 ChT 的边界 Bruch 膜下 $29 \mu\text{m}$ 至脉络膜与巩膜的交界处; C: 代表性的扫描显示 CCP 的边界从 Bruch 膜延伸到 Bruch 膜以下 $29 \mu\text{m}$ 处; D: 代表性的扫描显示 LMVC (Large-sized and medium-sized vessels of the choroid) 的边界从 Bruch 膜下 $29 \mu\text{m}$ 延伸到脉络膜与巩膜的交界处。

Figure 2 Schematic Diagram of OCTA Scanning

A: The OCTA image displays a 3×3 grid partition diagram composed of 9 rectangles, corresponding to the following regions; ST (tempo-superior), S (superior), SN (nasal-superior), T (temporal), C (macula), N (nasal), IT (tempo-inferior), I (inferior), and IN (nasal-inferior), with a total area of $24 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$; B: The representative scan shows the boundaries of ChT, extending from $29 \mu\text{m}$ below Bruch's membrane to the choroid-scleral junction; C: The representative scan shows the boundaries of CCP, spanning from Bruch's membrane to $29 \mu\text{m}$ below it; D: The representative scan shows the boundaries of LMVC (Large-sized and medium-sized vessels of the choroid), extending from $29 \mu\text{m}$ below Bruch's membrane to the choroid-scleral junction.

1.2.2.2 SS-OCTA 观察指标

ChT 定位于 Bruch 膜下 $29 \mu\text{m}$ 至 脉络膜与 巩膜的交界处; CCP 定位于 Bruch 膜至 Bruch 膜下 $29 \mu\text{m}$ 的脉络膜; LMVC 定位于 Bruch 膜至 脉络膜与 巩膜的交界处, 包含 CVV、CVI、CSV、CSI (图 2)。其中 CVI 为指定区域内脉络膜血管体积与脉络膜体积的比值。可视为三维血管密度的量化指标, 单位为%, 此数值越大, 血管越密集。CVV 为指定区域内脉络膜血管的体积与该区域面积比值, 单位为%, 此数值越大, 血管量越多。CSI 为指定区域内脉络膜基质体积与脉络膜体积的比值, 单位为%, 此数值越大, 基质越密集。CSV 为指定区域内脉络膜基质的体积与该区域面积比值, 单位为%, 此数值越大, 基质量越多 (图 3)。研究数据通过仪器的内置软件导出, 注左眼数据导出需翻转。

1.3 统计学处理

采用 SPSS27.0 统计学软件。分类变量采用 $n(\%)$ 表示, 组间比较采用 χ^2 检验; 符合正态或近似正态分布的变量以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 组间比较采用单因素方差分析; 偏态分布则以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示, 组间比较采用 Kruskal-Wallis H 检验, 事后比较采用 Games-Howell, 且采用 Bonferroni 法校正; 采用 Spearman 秩相关分析眼轴与各个区域 ChT、血流密度的相关性。检验水准 $\alpha = 0.05$ 。

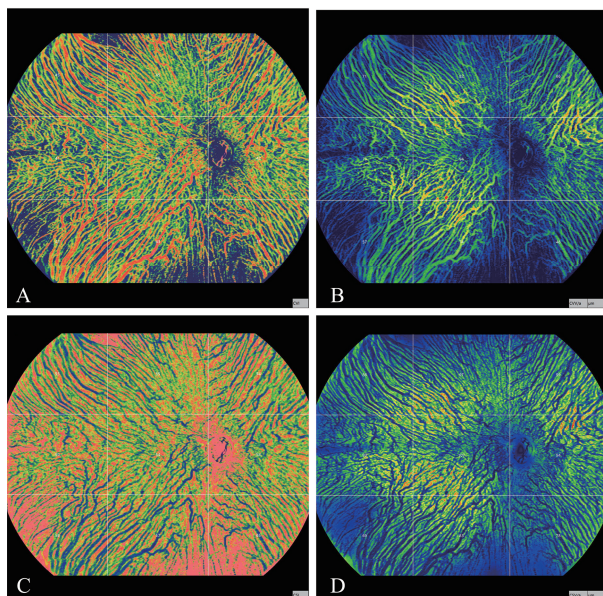


图3 OCTA 扫描彩色图显示 CVI (A)、CVV (B)、CSI (C)、CSV (D)

Figure 3 OCTA scan color maps displaying CVI (A), CVV (B), CSI (C), and CSV (D)

2 结果

2.1 基本资料

本研究共纳入 843 例 843 只眼, 其中男性占

47.69%,女性占 52.31%;各组间的年龄、性别、种族,差异无统计学意义(P 均 >0.05)(表 1)。

2.2 各组眼轴与 9 个区域的 ChT、CCP、LMVC 的差异分析

2.2.1 各组 ChT 比较

各组 ChT 随 AL 依次变薄,且四组颞上、上方、鼻上、颞侧、黄斑中央区、鼻侧、颞下、下方和鼻下等 9 个区域的 ChT 差异均有统计学意义(P 均 <0.001)。长眼轴组 ChT 厚度依次为:颞侧 $>$ 黄斑中

央区 $>$ 颞上 $=$ 鼻上 $>$ 上方 $>$ 鼻侧 $>$ 颞下 $>$ 下方 $>$ 鼻下,其他 3 组变化近似;两两比较分析显示,长眼轴组 9 个区域的 ChT 均低于短眼轴组、正常眼轴组、较长眼轴组(均 $P<0.05$)。较长眼轴组 9 个区域的 ChT 均低于正常眼轴组(均 $P<0.05$),此外较长眼轴组除鼻上和鼻下外其他各区域的 ChT 均降低,差异有统计学意义($P<0.05$);而正常眼轴组与短眼轴组各区域 ChT 的两两比较差异无统计学意义($P>0.05$),见表 2。

表 1 各组基本资料比较

Table 1 Comparison of the basic information among the four groups

组别	短眼轴组 ($n=112$)	正常眼轴组 ($n=346$)	较长眼轴组 ($n=232$)	长眼轴组 ($n=153$)	F/χ^2	P
性别					4.159	0.245
男($n=402$)	45(5)	166(20)	120(14)	71(9)		
女($n=441$)	67(8)	180(21)	112(13)	82(10)		
年龄/岁	11.93 \pm 3.84	11.95 \pm 3.71	12.34 \pm 3.65	11.35 \pm 3.71	0.802	0.493
民族					9.930	0.128
哈萨克族($n=414$)	56(7)	179(21)	110(13)	69(8)		
汉族($n=397$)	47(6)	157(19)	116(14)	77(9)		
其他($n=32$)	9(1)	10(1)	6(0.5)	7(0.5)		
等效球镜/D	0.90 \pm 2.05	-0.06 \pm 0.75	-1.93 \pm 1.76	-6.50 \pm 1.71	803.55	<0.0001

表 2 四组 ChT 比较/ μm

Table 2 Comparison of ChT among the four groups/ μm

部位	短眼轴组 ($n=112$)	正常眼轴组 ($n=346$)	较长眼轴组 ($n=232$)	长眼轴组 ($n=153$)	H	P
黄斑中央区	299.00 (249.25,332.00)	281.00 (243.00,321.00)	241.50 (203.00,286.75) ^{ab}	185.00 (157.50,206.50) ^{abc}	311.408	<0.001
颞上	238.50 (212.50,271.50)	229.00 (204.00,262.00)	204.00 (176.50,240.25) ^{ab}	179.00 (165.00,193.00) ^{abc}	199.002	<0.001
上	256.50 (211.25,289.75)	243.00 (208.00,276.00)	205.00 (173.25,256.25) ^{ab}	173.00 (147.00,190.00) ^{abc}	228.022	<0.001
鼻上	209.00 (184.00,259.00)	215.00 (187.00,251.25)	206.00 (174.00,239.25) ^b	179.00 (157.00,204.00) ^{abc}	72.923	<0.001
颞侧	259.00 (231.25,293.50)	256.00 (226.75,285.25)	226.50 (192.00,257.75) ^{ab}	196.00 (174.00,215.50) ^{abc}	234.017	<0.001
鼻侧	210.50 (176.00,237.25)	205.00 (179.00,233.25)	192.00 (165.00,226.50) ^{ab}	168.00 (153.50,192.00) ^{abc}	92.969	<0.001
颞下	213.00 (188.00,238.75)	207.50 (178.00,238.00)	186.00 (158.00,214.75) ^{ab}	157.00 (130.00,175.00) ^{abc}	183.335	<0.001
下	189.00 (157.00,219.00)	194.00 (166.75,223.00)	162.50 (129.00,199.00) ^{ab}	128.00 (108.50,148.00) ^{abc}	221.848	<0.001
鼻下	135.00 (123.00,161.00)	141.00 (123.75,161.00)	131.00 (111.00,157.75) ^b	111.00 (100.00,135.50) ^{abc}	87.738	<0.001

注:^a $P<0.05$ vs. 短眼轴组;^b $P<0.05$ vs. 正常眼轴组;^c $P<0.05$ vs. 较长眼轴组。

2.2.2 各组 CCP 比较

各组的 CCP 的上方区域随 AL 略升高,差异有统计学意义($P=0.006$),其他区域则差异无统计学意义(P 均 >0.05)。两两比较分析显示,长眼轴组上

方区域的 CCP 略高于短眼轴组、正常眼轴组($P<0.05$),其他两两比较则差异无统计学意义($P>0.05$),见表 3。

表3 各组 CCP 比较/%
Table 3 Comparison of CCP among the four groups/%

部位	短眼轴组 (n=112)	正常眼轴组 (n=346)	较长眼轴组 (n=232)	长眼轴组 n=(153)	H	P
黄斑中央区	48.00 (47.00,48.00)	48.00 (47.00,48.00)	48.00 (47.00,49.00)	48.00 (47.00,48.00)	2.819	0.420
颞上	51.00 (50.00,52.00)	51.00 (49.00,52.00)	51.00 (49.25,52.00)	51.00 (50.00,52.00)	5.030	0.170
上	49.00 (48.00,49.00)	49.00 (48.00,49.00)	49.00 (48.00,49.00)	49.00 (48.50,50.00) ^{ab}	12.614	0.006
鼻上	51.00 (50.00,52.00)	51.00 (49.00,52.00)	51.00 (49.00,52.00)	51.00 (49.00,52.00)	6.016	0.111
颞侧	48.00 (47.00,48.00)	48.00 (46.00,48.00)	47.00 (46.00,48.00)	48.00 (47.00,49.00)	7.400	0.060
鼻侧	49.00 (48.00,50.00)	49.00 (47.00,50.00)	49.00 (47.00,50.00)	49.00 (47.50,49.00)	1.862	0.601
颞下	46.00 (43.00,48.00)	46.00 (41.00,49.00)	46.00 (42.00,48.00)	46.00 (43.00,48.00)	0.210	0.976
下	49.00 (47.00,50.00)	49.00 (47.00,50.00)	48.50 (47.00,50.00)	49.00 (47.00,50.00)	0.734	0.865
鼻下	48.00 (45.00,49.00)	48.00 (45.00,50.00)	48.00 (45.00,50.00)	47.00 (45.00,50.00)	0.713	0.870

注:^a $P<0.05$ vs. 短眼轴组;^b $P<0.05$ vs. 正常眼轴组;^c $P<0.05$ vs. 较长眼轴组。

2.2.3 各组 LMVC (包含: CVV、CVI、CSV、CSI) 比较

2.2.3.1 各组 CVV 比较

各组 CVV 随 AL 依次降低,且各组颞上、上方、鼻上、颞侧、黄斑中央区、鼻侧、颞下、下方和鼻下等 9 个区域的 CVV 差异均有统计学意义 ($P<0.001$)。长眼轴组 CVV 依次为:黄斑中央区>颞侧>颞上>上方>鼻上>鼻侧>颞下>下方>鼻下,其他 3 组变化近

似;两两比较分析显示,长眼轴组 9 个区域的 CVV 均低于短眼轴组、正常眼轴组、较长眼轴组 (均 $P<0.05$)。同样的较长眼轴组除鼻上,鼻下外,其他区域的 CVV 均低于短眼轴组 (均 $P<0.05$)。此外较长眼轴组除鼻上,鼻侧,鼻下区域外,其他区域的 CVV 均低于正常眼轴组 ($P<0.05$);而正常眼轴组与短眼轴组各区域 CVV 的两两比较差异无统计学意义 ($P>0.05$),见表 4。

表4 四组 CVV 比较/%
Table 4 Comparison of choroidal vascular volume ratio among the four groups/%

部位	短眼轴组 (n=112)	正常眼轴组 (n=346)	较长眼轴组 (n=232)	长眼轴组 (n=153)	H	P
黄斑中央区	125.00 (105.25,142.00)	119.00 (102.00,137.00)	105.00 (88.25,123.75) ^{ab}	81.00 (64.00,100.00) ^{abc}	183.620	<0.001
颞上	96.50 (78.25,114.75)	93.00 (79.00,108.00)	82.00 (67.00,98.00) ^{ab}	70.00 (60.00,80.50) ^{abc}	147.404	<0.001
上	106.00 (82.00,123.00)	98.00 (77.75,115.00)	83.00 (66.00,106.75) ^{ab}	68.00 (50.00,80.00) ^{abc}	149.031	<0.001
鼻上	82.00 (68.25,109.00)	85.00 (67.00,102.25)	79.00 (60.00,99.00)	67.00 (55.50,86.50) ^{abc}	28.462	<0.001
颞侧	100.00 (88.00,118.75)	98.00 (84.00,111.00)	86.00 (70.25,100.00) ^{ab}	71.00 (59.00,80.00) ^{abc}	199.586	<0.001
鼻侧	83.00 (62.00,95.75)	76.00 (62.75,92.00)	71.50 (55.00,92.00) ^a	63.00 (51.50,77.00) ^{abc}	48.162	<0.001
颞下	81.50 (71.00,94.00)	77.00 (61.75,94.00)	67.00 (52.25,84.00) ^{ab}	54.00 (42.50,66.50) ^{abc}	124.223	<0.001
下	74.00 (58.25,94.25)	77.00 (60.00,94.25)	65.00 (45.00,82.00) ^{ab}	49.00 (33.50,63.00) ^{abc}	130.863	<0.001
鼻下	39.50 (33.00,53.75)	41.00 (26.00,53.00)	36.00 (26.00,52.00)	31.00 (20.50,43.00) ^{abc}	35.174	<0.001

注:^a $P<0.05$ vs. 短眼轴组;^b $P<0.05$ vs. 正常眼轴组;^c $P<0.05$ vs. 较长眼轴组。

2.2.3.2 各组 CVI 比较

各组 CVI 随 AL 依次降低,且各组颞上、上方、鼻上、颞侧、黄斑中央区、鼻侧、颞下、下方和鼻下等 9 个区域的 CVI 均有统计学差异(均 $P < 0.001$)。长眼轴组 CVI 依次为:黄斑中央区>颞上=上方>鼻上>颞下>鼻侧=颞侧>下方>鼻下,其他 3 组变化近似;两两比较分析显示,长眼轴组 9 个区域的 CVI 均低于短眼轴组、正常眼轴组(均 $P <$

0.05),而长眼轴组除黄斑中央区外,其他 8 个区域的 CVI 均低于较长眼轴组(均 $P < 0.05$);同样的较长眼轴组除颞上,鼻上,黄斑中央区外,其他 6 个区域 CVI 均低于短眼轴组(均 $P < 0.05$),此外较长眼轴组除颞上,鼻上,鼻侧外,其他 6 个区域 CVI 均低于正常眼轴组($P < 0.05$);而正常眼轴组与短眼轴组各区域 CVI 的两两比较差异无统计学意义($P > 0.05$),见表 5。

表 5 各组 CVI 比较/%
Table 5 Comparison of CVI among the four groups/%

部位	短眼轴组 (n=112)	正常眼轴组 (n=346)	较长眼轴组 (n=232)	长眼轴组 (n=153)	H	P
黄斑中央区	46.00 (44.00,48.00)	47.00 (45.00,48.00)	46.00 (44.00,48.00) ^b	45.00 (41.00,47.00) ^{ab}	32.459	<0.001
颞上	45.00 (43.00,47.00)	45.00 (43.00,47.00)	45.00 (42.00,47.00)	42.00 (39.00,45.00) ^{abc}	61.337	<0.001
上	45.00 (43.00,47.00)	45.00 (42.00,47.00)	44.00 (39.00,47.00) ^{ab}	42.00 (35.00,45.00) ^{abc}	60.038	<0.001
鼻上	44.00 (41.00,47.00)	44.00 (41.00,47.00)	43.00 (38.00,47.00)	41.00 (38.00,45.00) ^{abc}	29.067	<0.001
颞侧	43.50 (42.00,45.00)	43.00 (41.00,45.00)	41.00 (38.00,44.00) ^{ab}	38.00 (35.00,41.00) ^{abc}	155.007	<0.001
鼻侧	43.00 (38.00,45.00)	42.00 (38.00,44.00)	41.00 (36.00,44.00) ^a	38.00 (34.00,42.00) ^{abc}	45.821	<0.001
颞下	44.00 (41.00,47.00)	43.00 (39.00,46.00)	41.00 (37.00,45.00) ^{ab}	39.00 (32.00,42.00) ^{abc}	77.975	<0.001
下	45.00 (41.75,48.00)	45.00 (40.00,48.00)	43.00 (33.75,47.00) ^{ab}	36.00 (29.00,43.00) ^{abc}	102.368	<0.001
鼻下	35.00 (30.00,39.00)	33.50 (25.00,39.00)	30.00 (23.00,37.00) ^{ab}	25.00 (19.00,31.00) ^{abc}	75.242	<0.001

注:^a $P < 0.05$ vs. 短眼轴组;^b $P < 0.05$ vs. 正常眼轴组;^c $P < 0.05$ vs. 较长眼轴组。

2.2.3.3 各组 CSV 比较

各组 CSV 随 AL 依次降低,且各组颞上、上方、鼻上、颞侧、黄斑中央区、鼻侧、颞下、下方和鼻下等 9 个区域的 CSI 均有统计学差异(均 $P < 0.001$)。长眼轴组 CSV 依次为:颞侧>鼻上>黄斑中央区>颞上=鼻侧上方>颞下>下方=鼻下,其他 3 组变化近似;两两比较分析显示,长眼轴组 9 个区域的 CSV 均低

于短眼轴组、正常眼轴组、较长眼轴组(均 $P < 0.05$);同样的较长眼轴组除鼻侧,鼻下区域外,其他 7 个区域 CSV 均低于短眼轴组(均 $P < 0.05$)。此外较长眼轴组除鼻上,鼻侧区域外,其他 7 个区域 CSV 均低于正常眼轴组($P < 0.05$);而正常眼轴组与短眼轴组各区域 CSV 的两两比较差异无统计学意义($P > 0.05$),见表 6。

表 6 四组 CSV 比较/%
Table 6 Comparison of CSV among the four groups/%

部位	短眼轴组 (n=112)	正常眼轴组 (n=346)	较长眼轴组 (n=232)	长眼轴组 (n=153)	H	P
黄斑中央区	141.50 (116.00,170.00)	130.00 (111.75,151.00)	111.50 (95.00,134.50) ^{ab}	88.00 (74.50,104.00) ^{abc}	240.037	<0.001
颞上	110.50 (99.00,121.00)	105.00 (93.00,119.00)	94.00 (82.00,106.75) ^{ab}	84.00 (75.00,92.00) ^{abc}	209.205	<0.001
上	121.00 (101.00,142.00)	113.00 (98.00,127.25)	93.00 (83.00,116.00) ^{ab}	83.00 (73.00,93.00) ^{abc}	215.612	<0.001
鼻上	102.00 (91.25,124.00)	102.00 (89.00,117.00)	96.00 (83.00,112.75) ^a	90.00 (79.00,105.00) ^{abc}	39.807	<0.001

续表

部位	短眼轴组 (n=112)	正常眼轴组 (n=346)	较长眼轴组 (n=232)	长眼轴组 (n=153)	H	P
颞侧	127.00 (112.00,145.00)	123.00 (112.00,141.00)	111.00 (99.00,128.75) ^{ab}	99.00 (88.50,111.00) ^{abc}	189.180	<0.001
鼻侧	99.00 (84.00,116.50)	96.00 (85.00,112.00)	94.00 (82.00,106.00)	84.00 (76.00,95.50) ^{abc}	52.420	<0.001
颞下	97.50 (88.00,115.75)	96.00 (83.00,112.00)	87.00 (75.00,101.00) ^{ab}	75.00 (66.00,86.00) ^{abc}	137.762	<0.001
下	83.00 (69.00,97.75)	85.00 (74.00,97.00)	74.00 (61.00,89.75) ^{ab}	61.00 (51.00,72.00) ^{abc}	181.051	<0.001
鼻下	65.00 (58.25,83.25)	70.50 (63.00,81.00)	68.00 (59.00,76.00) ^b	61.00 (53.50,71.00) ^{abc}	46.089	<0.001

注:^aP<0.05 vs. 短眼轴组;^bP<0.05 vs. 正常眼轴组;^cP<0.05 vs. 较长眼轴组。

2.2.3.4 各组 CSI 比较

各组 CSI 随 AL 依次降低,且各组颞上、上方、鼻上、颞侧、黄斑中央区、鼻侧、颞下、下方和鼻下等 9 个区域的 CSI 均差异有统计学意义(均 $P < 0.001$)。长眼轴组 CSI 依次为:鼻下>下方>颞侧=鼻侧>颞下>鼻上>颞上=上方>黄斑中央区,其他 3 组变化近似;两两比较分析显示,长眼轴组 9 个区

域的 CSI 均高于短眼轴组、正常眼轴组、较长眼轴组(均 $P < 0.05$);同样的较长眼轴组除颞上、鼻上,黄斑中央区外,其他 6 个区域 CSI 均高于短眼轴组(均 $P < 0.05$)。此外较长眼轴组除颞上、鼻上,鼻侧外,其他 6 个区域 CSI 均高于正常眼轴组($P < 0.05$);而正常眼轴组与短眼轴组各区域 CSI 的两两比较差异无统计学意义($P > 0.05$),见表 7。

表 7 各组 CSI 比较/%

Table 7 Comparison of CSI among the four groups/%

部位	短眼轴组 (n=112)	正常眼轴组 (n=346)	较长眼轴组 (n=232)	长眼轴组 (n=153)	H	P
黄斑中央区	54.00 (52.00,56.00)	53.00 (52.00,55.00)	54.00 (52.00,56.00) ^b	55.00 (53.00,59.00) ^{ab}	32.256	<0.001
颞上	55.00 (53.00,57.00)	55.00 (53.00,57.00)	55.00 (53.00,58.00)	58.00 (55.00,61.00) ^{abc}	65.198	<0.001
上	55.00 (53.00,57.00)	55.00 (53.00,58.00)	56.00 (53.00,61.00) ^{ab}	58.00 (55.00,65.50) ^{abc}	61.891	<0.001
鼻上	56.00 (53.00,59.00)	56.00 (53.00,59.00)	57.00 (53.00,62.00)	59.00 (55.00,62.00) ^{abc}	29.709	<0.001
颞侧	56.50 (55.00,58.00)	57.00 (55.00,59.25)	59.00 (56.00,62.00) ^{ab}	62.00 (59.00,65.00) ^{abc}	154.804	<0.001
鼻侧	57.00 (55.00,62.00)	58.00 (56.00,62.00)	59.00 (56.00,64.00) ^a	62.00 (58.00,66.00) ^{abc}	44.864	<0.001
颞下	56.00 (53.00,59.00)	57.00 (54.00,61.00)	59.00 (55.00,63.00) ^{ab}	61.00 (58.00,68.50) ^{abc}	78.335	<0.001
下	55.00 (52.00,58.75)	55.00 (52.00,60.00)	57.00 (53.00,66.75) ^{ab}	64.00 (57.00,71.50) ^{abc}	102.465	<0.001
鼻下	65.00 (61.00,70.00)	66.50 (61.00,75.00)	69.50 (62.25,76.75) ^{ab}	75.00 (68.50,81.00) ^{abc}	74.981	<0.001

注:^aP<0.05 vs. 短眼轴组;^bP<0.05 vs. 正常眼轴组;^cP<0.05 vs. 较长眼轴组。

2.3 眼轴与各区域 ChT、CCP、LMVC 的相关性

2.3.1 眼轴与各区域 ChT 的相关性

AL 与 9 个区域的 ChT 均呈负相关,且相关性依

次为黄斑中央区>颞侧>上方>颞上>颞下=下方>鼻侧>鼻上=鼻下。综上,AL 与 ChT 呈负相关,且黄斑中央区的相关性最强($r_s = -0.597$, $P < 0.001$)。见图 4。

2.3.2 眼轴与各区域 CCP 的相关性

$P < 0.001$)外,但 AL 与其他区域无相关性 ($P >$

AL 与上方区域 CCP 成弱正相关 ($r_s = 0.124$, 0.05)。见图 5。

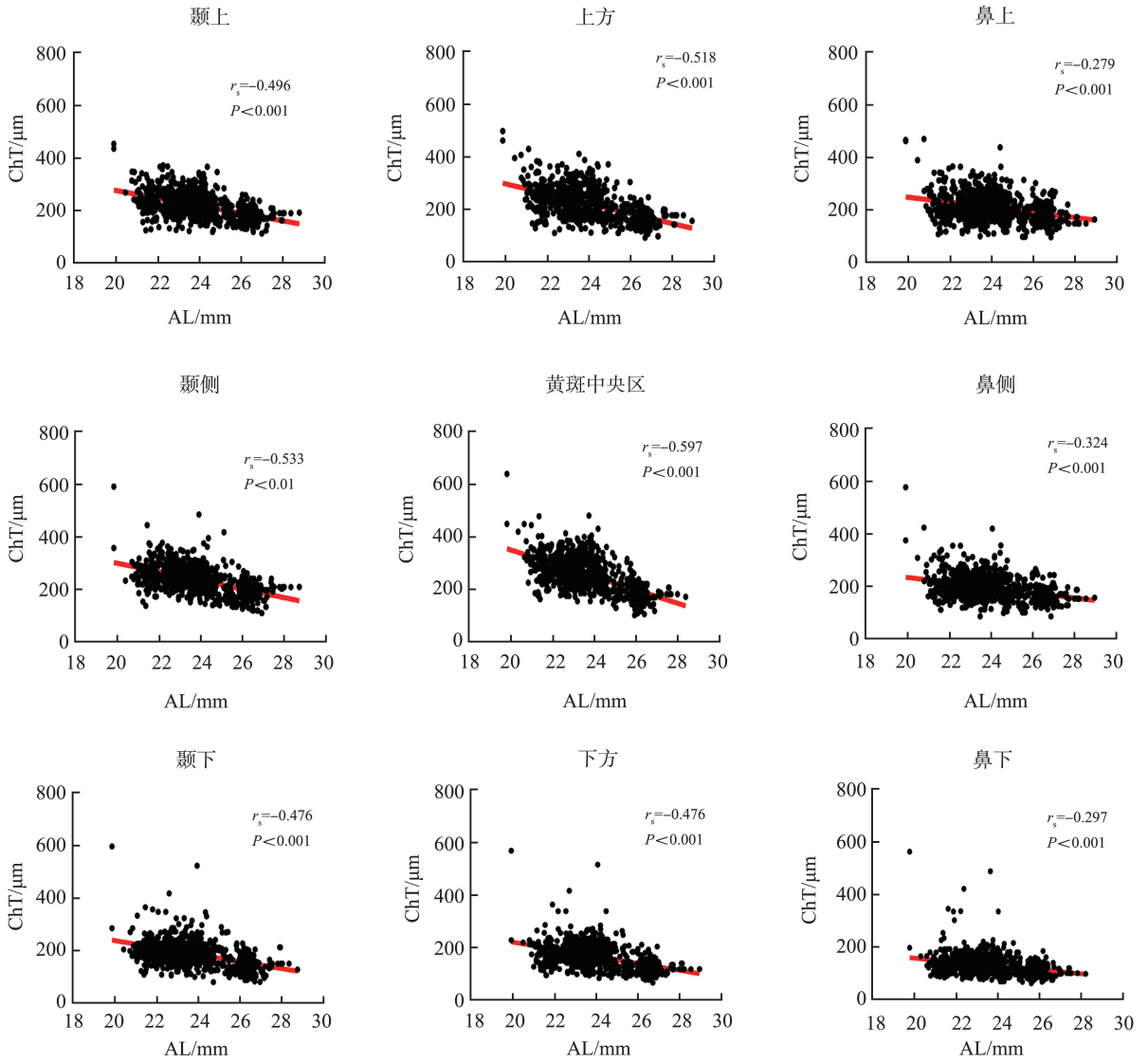
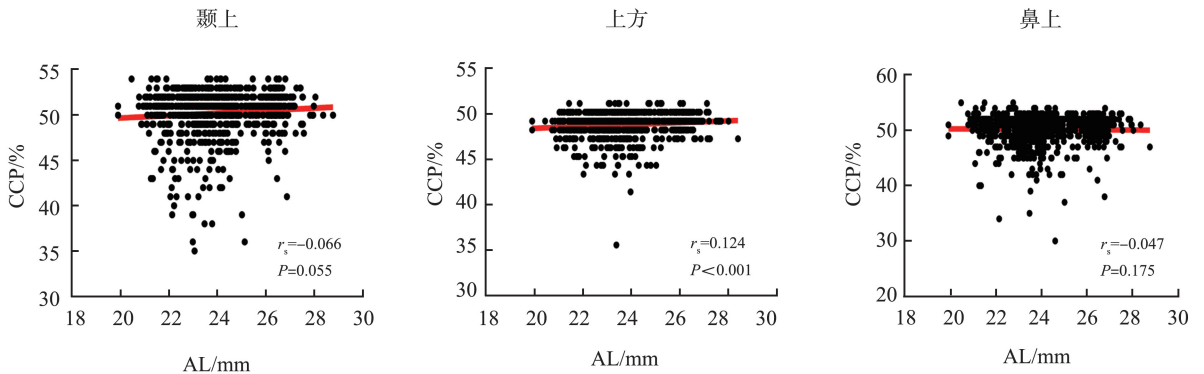


图 4 眼轴与各区域 ChT 的相关性分析散点图

Figure 4 Scatter plot of correlation analysis between axial length and choroidal thickness in different regions



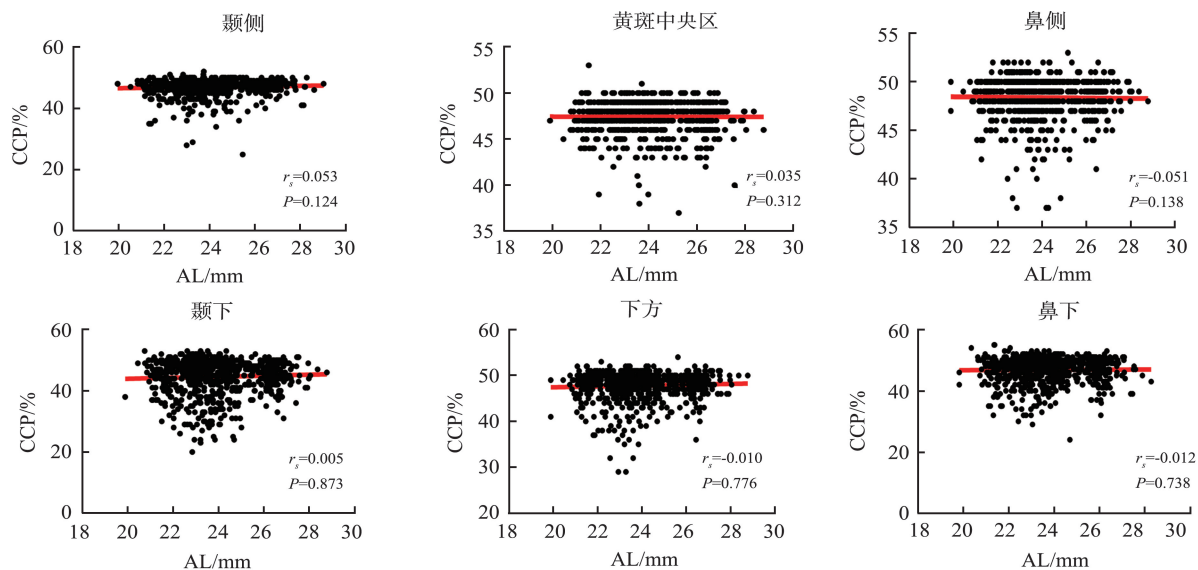


图5 眼轴与各区域 CCP 的相关性

Figure 5 Scatter plot of correlation analysis between axial length and choroidal capillary blood flow density in different regions

2.3.3 眼轴与各区域 LMVC (包含: CVV、CVI、CSV、CSI) 的相关性

2.3.3.1 眼轴与各区域 CVV 的相关性

AL 与 9 个区域的 CVV 均呈负相关,且相关性依次为颞侧>黄斑中央区>上方>颞上>颞下>下方>鼻侧>鼻下>鼻上;综上,AL 与 CVV 呈负相关,且颞侧

区域的相关性最强($r_s = -0.482, P < 0.001$)。见图 6。

2.3.3.2 眼轴与各区域 CVI 的相关性

眼轴与 9 个区域的 CVI 均呈负相关,且相关性依次为颞侧>上方>颞下>鼻下>上方>鼻侧>颞上>黄斑中央区>鼻上;综上,AL 与 CVI 呈负相关,且颞侧区域的相关性最强($r_s = -0.420, P < 0.001$)。见图 7。

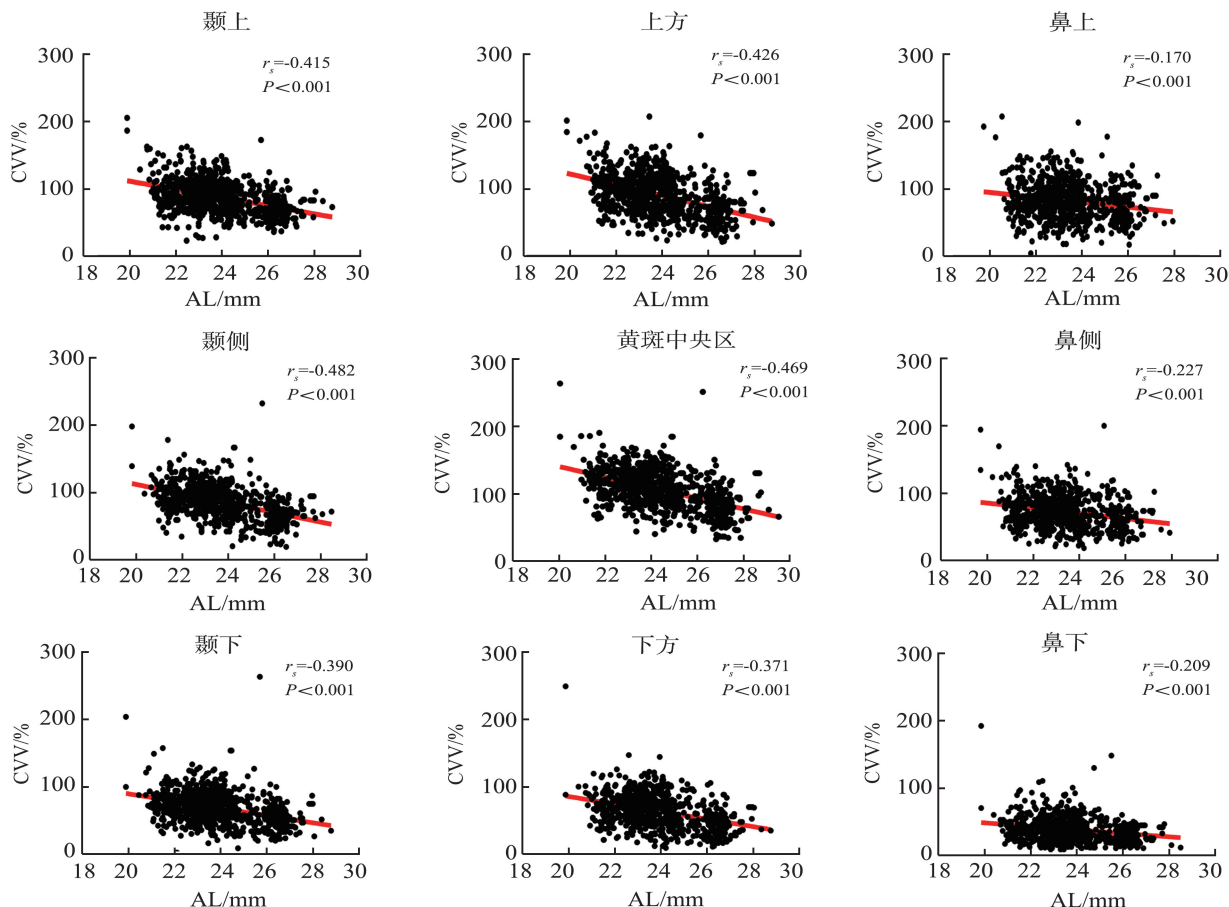


图6 眼轴与各区域 CVV 的相关性

Figure 6 Scatter plot of correlation analysis between axial length and choroidal vascular volume ratio in different regions

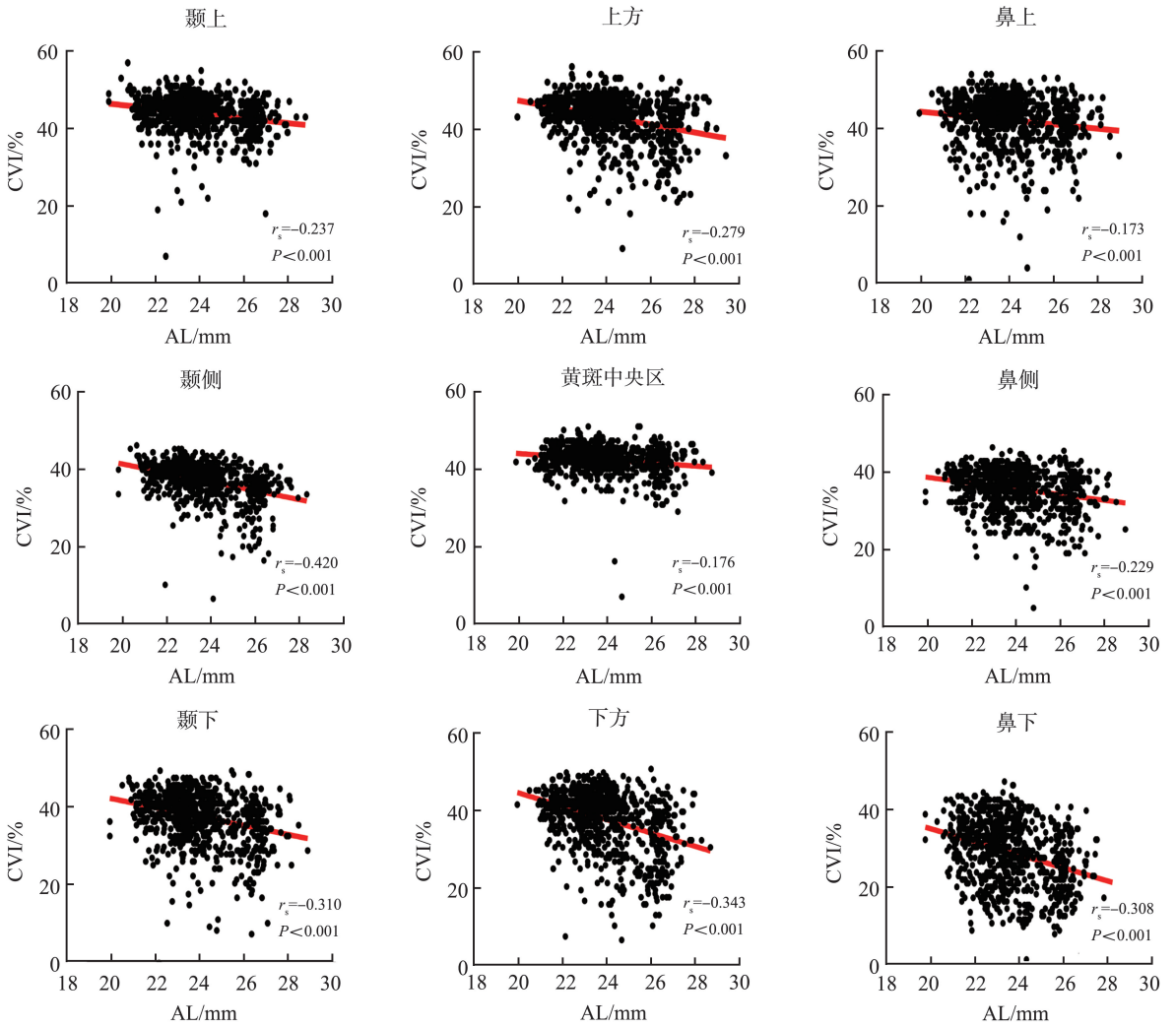


图7 眼轴与各区域 CVI 的相关性

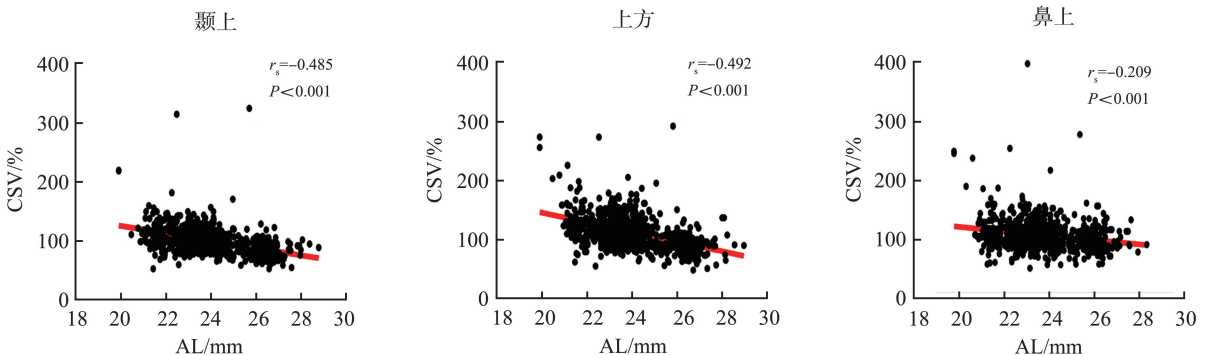
Figure 7 Scatter plot of correlation analysis between axial length and choroidal vascular index in different regions

2.3.3.3 眼轴与各区域 CSV 的相关性

AL 与 9 个区域的 CSV 均呈负相关,且相关性依次为黄斑中央区>上方>颞上>颞侧>下方>颞下>鼻侧>鼻上>鼻下;综上,AL 与 CSV 呈负相关,且黄斑中央区的相关性最强($r_s = -0.512, P < 0.001$)。见图 8。

2.3.3.4 眼轴与各区域 CSI 的相关性

AL 与 9 个区域的 CSI 均呈正相关,且相关性依次为颞侧>下方>颞下>鼻下>上方>颞上>鼻侧>黄斑中央区>鼻上;综上,AL 与 CSI 呈正相关,且颞侧的相关性最强($r_s = 0.420, P < 0.001$)。见图 9。



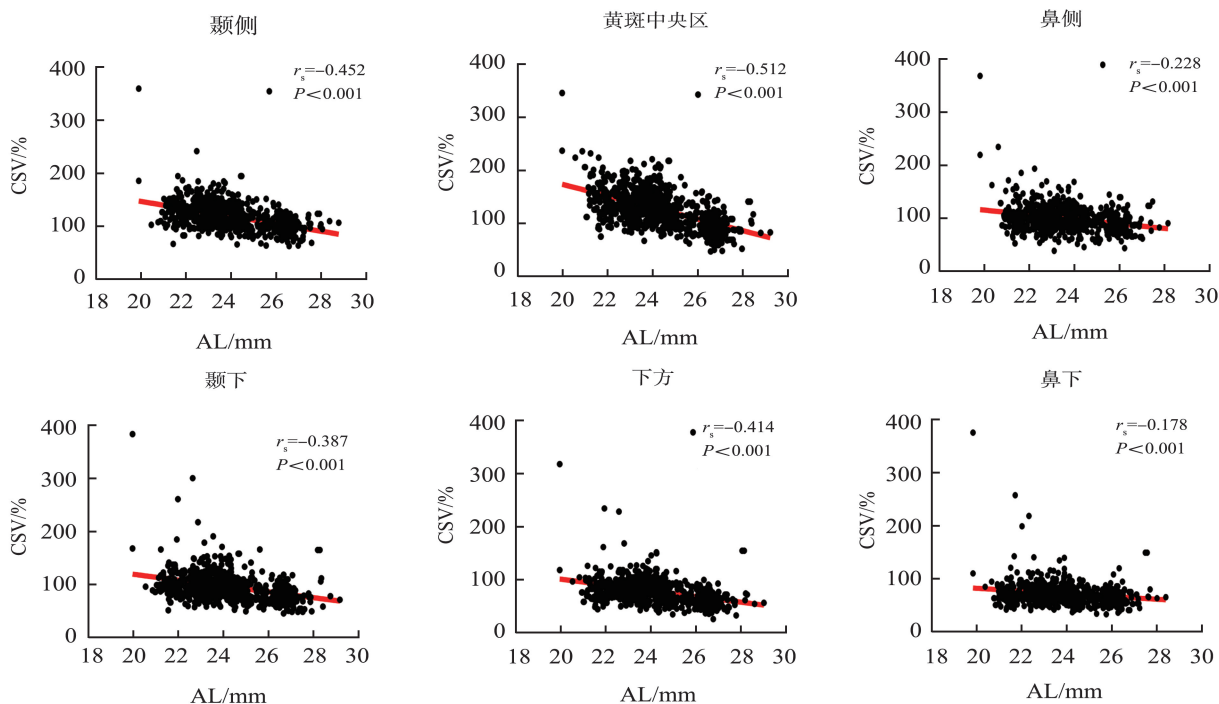


图 8 眼轴与各区域 CSV 的相关性

Figure 8 Scatter plot of correlation analysis between axial length and choroidal stromal volume ratio in different regions

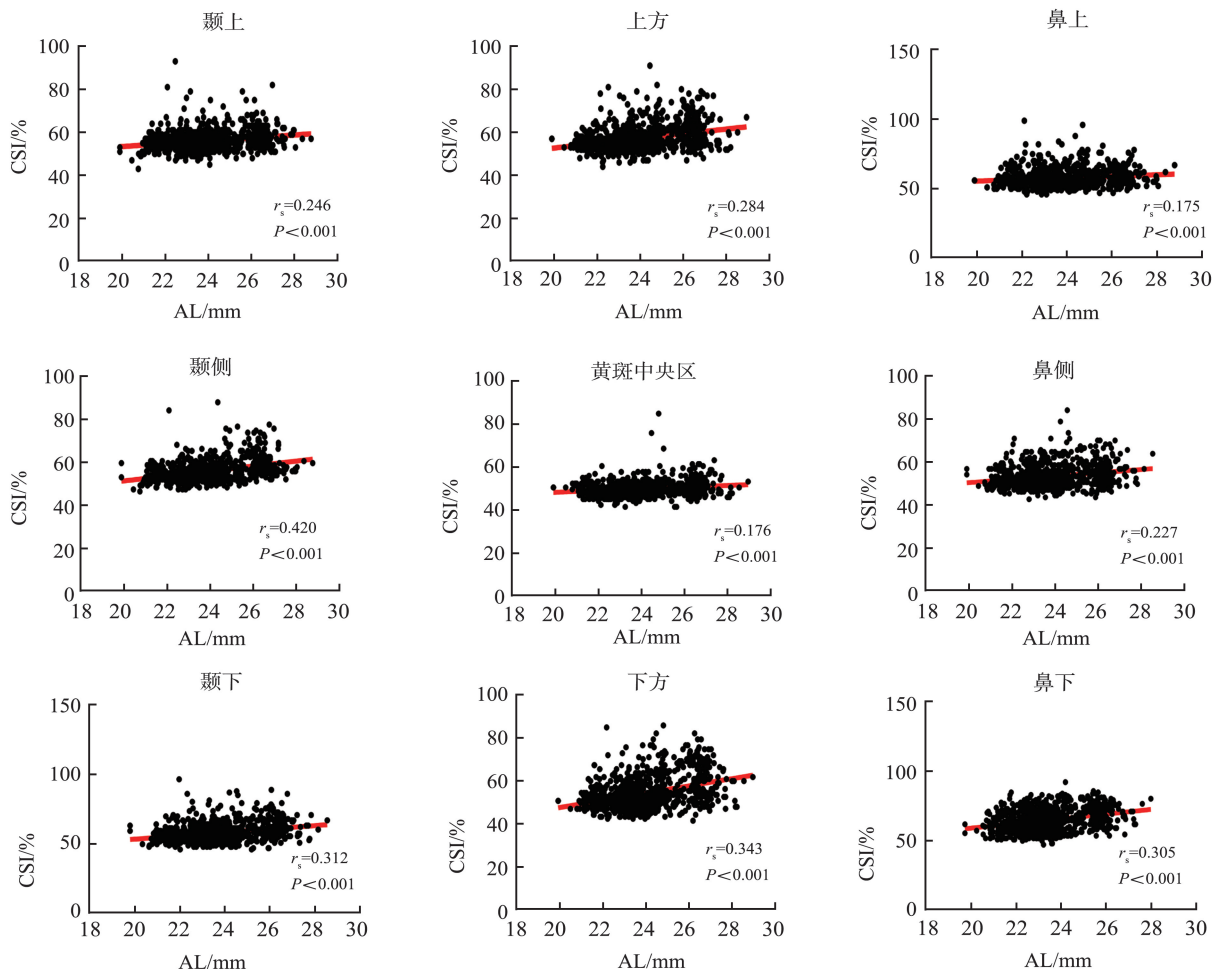


图 9 眼轴与各区域 CSI 的相关性

Figure 9 Scatter plot of correlation analysis between axial length and choroidal stromal index in different regions

3 讨论

脉络膜是眼部血流最为丰富的组织,由基质和血管组成,包含3层:①靠近视网膜的为脉络膜毛细血管层;②靠近巩膜的主要由动脉构成的脉络膜大血管层(Haller血管层),为脉络膜提供充足的血液供应与静脉引流,参与代谢废物的排出;③两者之间是由静脉构成的中小型血管层(Satter血管层),供应CCP血液^[10]。先前的研究主要通过ChT评估脉络膜变化^[11-12]。然而,由于年龄、眼压和其他生理因素的影响,ChT具有很大的变异性^[13]。既往研究大多使用增强深度成像光学相干断层扫描或谱域光学相干断层扫描血管成像(Spectral-domain optical coherence tomography, SD-OCTA)捕获的图像,仅从水平和垂直扫描评估了黄斑中央凹,从而产生了二维数据^[4,14-16],失去了体积特征。因此本研究增加三维的脉络膜血流参数包含CVV、CVI、CSV、CSI,可以更好地用于评估脉络膜结构的变化。本研究利用SS-OCTA定量分析了4组眼轴全周24 mm×20 mm的9个区域ChT和血流密度的分布特征及其变化规律,并探讨了AL与各个区域的ChT及血流密度的相关性,结果表明,随着AL增加,ChT变薄和血流密度降低均存在区域差异,且ChT变薄在黄斑区最为明显,血流密度降低则在周边部最为明显。值得注意的是,黄斑中央区ChT与AL相关性最强($r=-0.597, P<0.001$)。且脉络膜对近视发展的敏感性高于远视。这些发现揭示了轴性近视的脉络膜结构特征性改变,为研究其病理机制提供了重要依据以及黄斑中央区ChT有望作为近视进展的早期预警或近视筛查的指标之一。

本研究中,随着AL的增加,全周各区域的ChT逐渐降低,长眼轴组与其他3组的ChT相比均明显变薄。较长眼轴与短眼轴组、正常眼轴组的ChT相比也明显变薄,但短眼轴组与正常眼轴组的ChT两两比较差异无统计学意义($P>0.001$),这可能意味着ChT在远视中变化较小,而在近视中变化较明显,尤其是高度近视。既往研究表明,脉络膜变薄与眼球生长加速或近视发展有关^[12,17]。此外,本研究发现ChT存在区域特异性差异,正常眼轴组鼻下区域的ChT最薄[141.00(123.75, 161.00) μm],黄斑中央区ChT最厚[281.00(243.00, 321.00) μm],呈从中央到周边逐渐变薄的趋势。这与Rasheed等^[18]和Mohler等^[19]研究结论一致。本研究还发现随着眼轴增长,黄斑中央区ChT变薄程度最大,

推测黄斑区域可能对ChT变化更为敏感。这一现象可能与黄斑区血管分水岭效应有关,由于该区域血流灌注相对不足,在眼轴延长过程中更易发生厚度减少^[20-21]。此外在眼球的周边区域,随着距离中心凹越远,巩膜的厚度可能逐渐增加,这种结构特点使得周边部巩膜能够更好地抵抗由近视引起的生物力学改变,例如眼球的扩张和变薄^[22]。因此,与黄斑中央区相比,远离黄斑中央区的ChT变薄速度相对较慢,这种差异可能与巩膜厚度对脉络膜机械支撑作用的区域性变化有关。也可能与脉络膜非血管平滑肌细胞的收缩有关,该收缩作用能够使脉络膜变薄并抑制其增厚,从而有助于维持黄斑中心凹的位置,这些细胞在黄斑中央凹及其颞侧的分布最为密集,且黄斑区域的光感受器密度也最高,代谢水平较高^[23]。本研究发现,正常眼轴组的ChT黄斑区>颞侧>上方>鼻侧>下方,与Read等^[17]在青少年ChT分区对比结果一致。有学者推测下方脉络膜最薄与眼球的胚胎发育有关^[24],随着眼球的发育或近视的进展,眼球的生长并非均匀对称,而是呈现出局部扩张或变薄的趋势,这种不规则生长导致ChT在不同区域出现显著差异。同时视网膜各区域的代谢需求也存在差异,例如黄斑区由于高密度的感光细胞和活跃的视觉功能,对氧气和营养的需求更高,进一步加剧了脉络膜变化的区域性特征^[25-26]。但仍需进一步研究进行验证。

本研究分析了不同AL的各区域CCP,发现只有上方区域的长眼轴组与短眼轴、正常眼轴组差异有统计学意义,其余均无差异。但陈亚茹等人的研究发现,所有区域的CCP均无统计学差异。Gao等^[27]利用SS-OCTA分析17 mm×17 mm范围的CCP血管密度,也显示CCP在各区域差异均无统计学意义。可见CCP在近视的发生发展中变化较小,脉络膜血流密度对近视的影响主要在大中血管层。但本研究发现上方区域CCP具有统计学意义,与之前研究结果不一致的可能原因是扫描范围不同,本研究扫描范围为24 mm×20 mm,涵盖的区域范围更大,能够获取周边更宽区域的CCP。既往研究发现高度近视伴随一定程度的豹纹状眼底改变的患眼可以观察到明显的脉络膜毛细血管密度下降^[28]。Uematsu等^[29]观察到病理性近视的患者其脉络膜新生血管周围可以发现CCP显著下降。脉络膜毛细血管密度的减少与近视性的黄斑病变有着密切的关系^[30],而本研究发现各区域CCP随眼轴变化几乎不明显,可能与研究人群的选择有关,本研究未纳入眼底病变的人群尤其是病理性近视人群,可能全身

血管状况及眼底血流代偿恢复能力较好^[31-32],未来仍需进一步的研究分析。

Luo等^[33]分析了无眼底病变的不同AL成年人脉络膜,发现眼轴较长眼的CVV、CVI较低,且黄斑鼻象限的CVV和CVI明显低于其他象限。这与本研究的结论一致,表明即使没有黄斑病变,近视眼的大中型血管也可能开始发生变化。本研究还发现长眼轴组各区域的CVV、CVI、CSV低于短眼轴组、正常眼轴组、较长眼轴组,而长眼轴组的CSI则增加,表明在近视发展过程中,脉络膜血管成分的流失可能比基质成分的流失更为显著。这一发现与陈亚茹等^[34]研究结果一致,他们发现7~30岁的近视患者CVV和CVI显著降低,CSV也呈现下降趋势,而CSI则有所增加。这些数据进一步支持了近视进展中脉络膜血管成分受损更为严重的观点。一项79名18~28岁的大学生的研究中发现与正常对照组相比,近视患者眼底周边的颞区、颞下区、下区和鼻下区的脉络膜血管密度显著降低($P<0.05$)^[35]。这些变化可能是近视引起的,诱导近视的视觉信息可通过破坏视网膜多巴胺内稳态,引起脉络膜血流减少使巩膜缺氧,同时缺氧诱导因子-1 α 上调,导致巩膜中大量成纤维细胞转分化为肌成纤维细胞,并伴成纤维细胞I型胶原下调,使巩膜细胞外基质重塑,形成近视。近视发生后ChT和巩膜变薄,进而导致脉络膜血流减少,使巩膜的氧供和营养物质供应不足^[36-38],脉络膜的拉伸和变薄可能导致血管受损并减少血管灌注^[39]。本研究结果表明,眼轴越长,不止黄斑区,其他区域的脉络膜血管参数均会下降(除CSI),可见随着眼球过度拉长,脉络膜中型和大型血管逐渐受损。此外,从4组眼轴各区域的脉络膜数值两两比较中,ChT变薄的区域数比脉络膜血流减少的区域数优先增多,可见随着眼轴的增长,ChT的变薄先于脉络膜血流的减少。可能原因是血管或许具有更好的弹性和适应性。Tang等^[40]研究也证实了这点,其发现在近视的早期阶段,随着AL的延长,巩膜对脉络膜施加轻微的压力,使其变薄。此时ChT变薄,尽管血管变得略微扁平,但脉络膜血流密度不变。随着近视的发展和AL更长,血管不仅变平,而且被拉伸,变得更薄。此时两者都降低,所以血管的扁平化对脉络膜血流密度的影响很小,只有当血管变薄时才会影响脉络膜血流密度。

已有研究通常通过测量黄斑中心凹及其周围3 mm或者6 mm范围的脉络膜来探讨近视与其的关系^[25,41-42]。然而,这种局部测量方式可能存在一定的局限性:①它无法全面反映整个脉络膜区域的厚

度变化;②某些测量位点可能会受到脉络膜-巩膜边界不规则或局部脉络膜病灶的干扰^[43],从而导致测量结果的偏差。为了克服这些局限性,本研究采用了一种更为全面的评估方法,对全周24 mm×20 mm范围内的脉络膜进行分区测量,并系统性地分析其与AL的关系,以期获得更准确、更具代表性的研究结果。本研究显示除CCP与眼轴相关性较弱,且只有上方区域与眼轴成正相关($r_s=0.124$, $P<0.001$),其余区域均无相关性,其他脉络膜参数的九个区域均与眼轴存在相关性。各个区域的ChT、CVV、CVI、CSV与眼轴成负相关关系,且黄斑中央区的ChT与眼轴负相关性最强($r_s=-0.597$, $P<0.001$),鼻上区域的CVV与眼轴的负相关性最弱($r_s=-0.170$, $P<0.001$)。提示ChT可能比脉络膜血流密度在近视中的变化更明显,更能预测近视风险,尤其是黄斑中央区ChT敏感性最强,未来可将黄斑中央区ChT作为近视进展的早期预警指标或近视筛查的指标之一。Ohno-Matsui等^[44]提出,脉络膜血流的减少可能导致脉络膜变薄,并进一步影响巩膜的供氧水平。这种缺氧状态可能引发巩膜肌成纤维细胞的转分化,从而导致巩膜生物力学特性的改变,最终促进病理性近视眼底病变(如后巩膜葡萄肿)的发生。基于这一机制,可以推测ChT不仅可能作为近视进展的生物标志物,还可能通过影响巩膜结构和功能,直接参与近视的病理过程。Gao等^[27]发现大多数区域的脉络膜Sattler和Haller层血管密度与眼轴长度呈负相关。不仅在儿童青少年人群中,发现ChT和血流密度与眼轴成负相关关系,在年轻的近视成年人^[33]或实验动物中也报告了脉络膜参数与眼轴的负相关性^[45-46]。但Lu等^[47]表明,平均年龄为66岁(范围:40~80岁)的近视组中,ChT和AL之间呈负相关,鼻侧ChT和AL之间的负相关性最高。结论不一致的原因可能是人群不同。而一项针对756例6~18岁中国儿童开展的为期一年的纵向研究发现,在近视早期阶段,ChT的变化与AL之间并未表现出显著的相关性^[12]。研究者认为,这可能是因为在近视初期,脉络膜的生理性生长能够在一定程度上抵消因眼轴伸长导致的脉络膜变薄,从而维持其厚度的相对稳定。然而,随着近视的进一步发展,这种补偿效应可能逐渐减弱甚至消失,导致ChT与AL之间的关系变得更加显著。因此近视发展过程中脉络膜的动态变化具有复杂性,但本研究是横断面研究,未来将增加纵向研究以验证和弥补这项研究的局限性。

本研究还发现CVV、CVI、CSI均为颞侧区域与

眼轴的相关性最强,而 CSV 则是黄斑中央区与眼轴相关性最强,其次是颞侧。可见相比于 ChT 在黄斑中央区最敏感,脉络膜血流则是多在颞侧部。据推测,脉络膜非血管平滑肌细胞和固有的脉络膜神经元参与脉络膜调节,且在脉络膜的颞部和中心凹内数量最多^[3,23,48],调节了脉络膜血流变化。此外还发现不同眼轴组之间年龄差异无统计学意义($\chi^2 = 0.802, P = 0.493$)。这一现象可能是由于处于筛查环境中就读年级低者因检查配合度不足,就读年级高者因学业繁重影响 SS-OCTA 检查的参与率导致纳入研究的样本年龄分布存在偏倚。未来的临床纵向研究需注意年龄偏倚导致的误差。

本研究存在一定的局限性。①样本年龄分布存在偏倚,未来的研究需注意年龄偏倚导致的误差。并且研究仅纳入了 6~18 岁的儿童青少年群体,其结果可能无法完全推广至其他年龄段的近视人群。为了验证研究结论的普适性,未来需要通过多中心、大样本的研究进一步加以验证。②由于本研究属于横断面设计,无法纵向观察 ChT 和血流变化的动态趋势,也难以确定脉络膜各区域厚度、血流与 AL 之间的因果关系。因此,未来将开展纵向研究,以期为近视的预防和治疗提供更坚实的科学依据。

综上所述,SS-OCTA 技术对脉络膜具有较高的分辨率,能够有效量化 ChT 和血流。全周各区域 ChT、血流密度存在区域差异。眼轴增长伴随着脉络膜中央和周边区域的厚度血流密度的减少。脉络膜的改变在黄斑中央区较明显,血流的改变主要发生在脉络膜大中血管层,且周边区域较明显,同时黄斑中央区 ChT 可能有望作为近视进展的早期预警或近视筛查的指标之一。

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[J]. *Ophthalmology*, 2016, 123(5): 1036-1042.

[2] Bai Y, Sui JY, Li HR, et al. Relationship between the structure and microcirculation of the optic disc region and myopic traction maculopathy in highly myopic eyes[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2024, 262(3): 801-811.

[3] Nickla DL, Wallman J. The multifunctional choroid[J]. *Prog Retin Eye Res*, 2010, 29(2): 144-168.

[4] Yang JY, Wang EQ, Yuan MZ, et al. Three-dimensional

choroidal vascularity index in acute central serous chorioretinopathy using swept-source optical coherence tomography[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2020, 258(2): 241-247.

[5] Zhou H, Dai YN, Shi YY, et al. Age-related changes in choroidal thickness and the volume of vessels and stroma using swept-source OCT and fully automated algorithms[J]. *Ophthalmol Retina*, 2020, 4(2): 204-215.

[6] 张金玲, 廖宇洁, 于晓彦, 等. 不同屈光状态儿童青少年黄斑中心凹下脉络膜厚度变化分析[J]. *眼科新进展*, 2024, 44(11): 883-886.

ZHANG Jinling, LIAO Yujie, YU Xiaoyan, et al. Changes in the subfoveal choroidal thickness of children and adolescents with different refractive states[J]. *Recent Advances in Ophthalmology*, 2024, 44(11): 883-886.

[7] 朱锦亭, 冯洁. 光学相关断层扫描血管成像术评估成年近视患者黄斑区视网膜血流密度和视网膜厚度[J]. *中国临床研究*, 2024, 37(12): 1895-1899.

ZHU Jinting, FENG Jie. Evaluation of macular retinal blood flow density and retinal thickness in adult myopia patients by optical coherence tomography angiography[J]. *Chinese Journal of Clinical Research*, 2024, 37(12): 1895-1899.

[8] Zhu HL, Liu CY, Gao MJ, et al. Choroidal thickness in relation to diopter and axial length among myopic children[J]. *Front Med*, 2023, 10: 1241352. doi: 10.3389/fmed.2023.1241352

[9] Yang ZY, Jing RH, Wu YD, et al. Swept-source OCT angiography-derived regional normative data of peripapillary vessel density in healthy populations[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2025, 14(8): 5. doi: 10.1167/tvst.14.8.5

[10] Borrelli E, Sarraf D, Freund KB, et al. OCT angiography and evaluation of the choroid and choroidal vascular disorders[J]. *Prog Retin Eye Res*, 2018, 67: 30-55. doi: 10.1016/j.preteyeres.2018.07.002

[11] 韦朋, 房祥杰, 张娟美, 等. 不同屈光状态下儿童青少年黄斑区脉络膜厚度的研究[J]. *山东医学高等专科学校学报*, 2025, 47(2): 33-35.

[12] Paritala A, Balaji JJ, Gopalakrishnan A, et al. Profile of peripheral refraction, choroidal thickness, and its correlation with refraction among children with myopia[J]. *Indian J Ophthalmol*, 2025, 73(8): 1159-1165.

[13] Agrawal R, Gupta P, Tan KA, et al. Choroidal vascularity index as a measure of vascular status of the choroid: Measurements in healthy eyes from a population-based study[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 21090. doi: 10.1038/srep21090

- [14] Ratra D, Tan R, Jaishankar D, et al. Choroidal structural changes and vascularity index in stargardt disease on swept source optical coherence tomography[J]. *Retina*, 2018, 38(12): 2395-2400.
- [15] Shen C, Li Y, Wang Q, et al. Choroidal vascular changes in retinitis pigmentosa patients detected by optical coherence tomography angiography[J]. *BMC Ophthalmol*, 2020, 20(1): 384. doi: 10.1186/s12886-020-01640-5
- [16] Wu H, Zhang GY, Shen MX, 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. doi: 10.1167/iovs.62.1.8
- [17] Read SA, Alonso-Caneiro D, Vincent SJ, et al. Longitudinal changes in choroidal thickness and eye growth in childhood[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015, 56(5): 3103-3112.
- [18] Rasheed MA, Singh SR, Invernizzi A, et al. Wide-field choroidal thickness profile in healthy eyes[J]. *Sci Rep*, 2018, 8: 17166. doi: 10.1038/s41598-018-35640-9
- [19] Mohler KJ, Draxinger W, Klein T, et al. Combined 60° wide-field choroidal thickness maps and high-definition en face vasculature visualization using swept-source megahertz OCT at 1050 nm[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015, 56(11): 6284-6293. doi: 10.1167/iovs.15-16670
- [20] 朱凯敏. 儿童屈光不正与脉络膜厚度和血流的研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [21] 唐冲, 计岩, 黄凡凡, 等. 基于 SS-OCTA 的成年近视患者黄斑区脉络膜厚度和血流特点的观察[J]. *重庆医科大学学报*, 2025, 50(1): 80-87.
TANG Chong, JI Yan, HUANG Fanfan, et al. Features of choroidal thickness and choroidal vascularity in the macular region of adult patients with myopia based on swept-source optical coherence tomography[J]. *Journal of Chongqing Medical University*, 2025, 50(1): 80-87.
- [22] Ellabban AA, Tsujikawa A, Matsumoto A, et al. Three-dimensional tomographic features of dome-shaped macula by swept-source optical coherence tomography[J]. *Am J Ophthalmol*, 2013, 155(2): 320-328.
- [23] May CA. Non-vascular smooth muscle cells in the human choroid: distribution, development and further characterization[J]. *J Anat*, 2005, 207(4): 381-390.
- [24] Stoll C, Alembik Y, Dott B, et al. Epidemiology of congenital eye malformations in 131, 760 consecutive births[J]. *Ophthalmic Paediatr Genet*, 1992, 13(3): 179-186.
- [25] Gupta P, Thakku SG, Saw SM, 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. doi: 10.1016/j.ajo.2017.02.001
- [26] Read SA, Collins MJ, Vincent SJ, et al. Choroidal thickness in myopic and nonmyopic children assessed with enhanced depth imaging optical coherence tomography[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2013, 54(12): 7578-7586.
- [27] Gao J, Rao CH, Li F, et al. Ultra-widefield swept-source optical coherence tomography angiography in the assessment of choroidal changes in young adults with myopia[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2022, 11(12): 14. doi: 10.1167/tvst.11.12.14
- [28] 卢运庆. 不同级别近视性豹纹状眼底对视网膜脉络膜的影响及相关因素研究[D]. 昆明: 昆明医科大学, 2022.
- [29] Uematsu S, Sakaguchi H, Sayanagi K, et al. Association between choriocapillaris flow deficit and choroidal neovascularization activity in eyes with myopic choroidal neovascularization[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 21947. doi: 10.1038/s41598-021-01557-z
- [30] Faes L, Bodmer NS, Locher S, et al. Test performance of optical coherence tomography angiography in detecting retinal diseases: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eye (Lond)*, 2019, 33(8): 1327-1338.
- [31] Fan H, Chen HY, Ma HJ, et al. Reduced macular vascular density in myopic eyes[J]. *Chin Med J*, 2017, 130(4): 445-451.
- [32] Ikuno Y. Overview of the complications of high myopia[J]. *Retina*, 2017, 37(12): 2347-2351.
- [33] 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[J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 916323. doi: 10.3389/fphys.2022.916323
- [34] 陈亚茹, 徐梦月, 刘艳, 等. 扫频 OCTA 观察不同眼轴近视患者视网膜-脉络膜血流及厚度的变化[J]. *右江民族医学院学报*, 2024, 46(4): 525-537.
CHEN Yaru, XU Mengyue, LIU Yan, et al. SS-OCTA for observing retinal and choroidal blood flow and thickness changes in myopic patients with different axial lengths[J]. *Journal of Youjiang Medical University for Nationalities*, 2024, 46(4): 525-537.
- [35] Zhang WR, Li C, Gong YB, et al. Advanced ultrawide-field optical coherence tomography angiography identifies previously undetectable changes in biomechanics-related parameters in nonpathological myopic fundus[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 920197. doi: 10.3389/fbioe.2022.920197
- [36] Wu H, Chen W, Zhao F, et al. Scleral hypoxia is a target

- for myopia control[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2018, 115(30): E7091-E7100.
- [37] Yin XF, Ge JL. The role of scleral changes in the progression of myopia: a review and future directions[J]. *Clin Ophthalmol*, 2025, 19: 1699-1707. doi: 10.2147/OPTH.S523283
- [38] Huang LX, Zhang JJ, Luo YF. The role of atropine in myopia control: insights into choroidal and scleral mechanisms[J]. *Front Pharmacol*, 2025, 16: 1509196. doi: 10.3389/fphar.2025.1509196
- [39] Khan MH, Lam AKC, Armitage JA, et al. Impact of axial eye size on retinal microvasculature density in the macular region[J]. *J Clin Med*, 2020, 9(8): 2539. doi: 10.3390/jcm9082539
- [40] Tang XC, Liang J, Luo LS, et al. Investigation of choroidal vascular alterations in eyes with myopia using ultrawidefield optical coherence tomography angiography[J]. *BMJ Open Ophthalmol*, 2024, 9(1): e001839. doi: 10.1136/bmjophth-2024-001839
- [41] Flores-Moreno I, Lugo F, Duker JS, et al. The relationship between axial length and choroidal thickness in eyes with high myopia[J]. *Am J Ophthalmol*, 2013, 155(2): 314-319.
- [42] Gupta P, Saw SM, Cheung CY, et al. Choroidal thickness and high myopia: a case-control study of young Chinese men in Singapore[J]. *Acta Ophthalmol*, 2015, 93(7): 585-592.
- [43] Chung SE, Kang SW, Lee JH, et al. Choroidal thickness in polypoidal choroidal vasculopathy and exudative age-related macular degeneration [J]. *Ophthalmology*, 2011, 118(5): 840-845.
- [44] Ohno-Matsui K, Jonas JB. Posterior staphyloma in pathologic myopia[J]. *Prog Retin Eye Res*, 2019, 70: 99-109. doi: 10.1016/j.preteyeres.2018.12.001
- [45] KhalafAllah MT, El Hamdaoui M, Fuchs PA, et al. Early peripapillary choroidal thinning during myopia development: a potential biomarker for progressive myopia identified in tree shrews[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2025, 66(11): 11. doi: 10.1167/iov.66.11.11
- [46] Hirata A, Negi A. Morphological changes of choriocapillaris in experimentally induced chick myopia[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 1998, 236(2): 132-137.
- [47] Lu HC, Chen HY, Huang CJ, et al. Predicting axial length from choroidal thickness on optical coherence tomography images with machine learning based algorithms[J]. *Front Med*, 2022, 9: 850284. doi: 10.3389/fmed.2022.850284
- [48] Flügel C, Tamm ER, Mayer B, et al. Species differences in choroidal vasodilative innervation: evidence for specific intrinsic nitrergic and VIP-positive neurons in the human eye[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1994, 35(2): 592-599.

(编辑:房红娟)