

OCTA 检测高度近视患者视网膜脉络膜厚度及血流变化的研究进展

张逸非, 都婉红, 赵梅生, 朱 超

引用: 张逸非, 都婉红, 赵梅生, 等. OCTA 检测高度近视患者视网膜脉络膜厚度及血流变化的研究进展. 国际眼科杂志 2023; 23(4):597-601

作者单位: (130000) 中国吉林省长春市, 吉林大学白求恩第二医院眼科

作者简介: 张逸非, 在读硕士研究生, 研究方向: 高度近视并发白内障。

通讯作者: 朱超, 毕业于吉林大学, 博士, 副主任医师, 研究方向: 白内障. zhuchao@mails.jlu.edu.cn

收稿日期: 2022-05-08 修回日期: 2023-03-07

摘要

高度近视是指近视度数在 $-6.00D$ 以上的一种屈光不正状态。由于高度近视常常伴随多种眼底病理性改变, 因此高度近视患者的视功能受到不同程度损害。光学相干断层扫描血管成像(OCTA)作为一种新兴的眼科辅助检查手段, 可以高效、无创地得到视网膜、脉络膜的微血管分层图像, 并对血流信号进行量化分析。自OCTA问世以来, 运用OCTA观察高度近视眼底改变的研究层出不穷。本文通过对OCTA检测高度近视患者视网膜脉络膜厚度及血流变化的研究现状进行综述, 以期揭示高度近视与视网膜脉络膜厚度、血流密度以及中心凹无血管区面积等参数的相关性, 为科研人员深入探索高度近视发生机制, 延缓高度近视发生发展提供思路。

关键词: 高度近视; 光学相干断层扫描血管成像(OCTA); 中心凹无血管区; 视网膜神经纤维层厚度; 脉络膜厚度; 血管密度

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2023.4.13

Research progress of optical coherence tomography angiography in detecting retinal and choroidal thickness and blood flow in patients with high myopia

Yi-Fei Zhang, Wan-Hong Du, Mei-Sheng Zhao, Chao Zhu

Department of Ophthalmology, the Second Norman Bethune Hospital of Jilin University, Changchun 130000, Jilin Province, China

Correspondence to: Chao Zhu. Department of Ophthalmology, the Second Norman Bethune Hospital of Jilin University, Changchun 130000, Jilin Province, China. zhuchao@mails.jlu.edu.cn

Received: 2022-05-08 Accepted: 2023-03-07

Abstract

• High myopia is a state of refractive error with myopia

over $-6.00D$. High myopia is typically accompanied by multiple fundus lesions, thus making patients with high myopia suffer from varying degrees of impairment in visual function. As an emerging auxiliary way in ophthalmology, optical coherence tomography angiography (OCTA) can efficiently and non-invasively obtain microvascular stratified images of the retina and choroid and quantitatively analyze blood flow signals. Since the advent of OCTA, there have been numerous studies observing fundus changes in those with high myopia through OCTA. In this paper, some studies in which OCTA is applied to obtain retinal and choroidal thickness from patients with high myopia are reviewed, with a view to revealing the correlation between high myopia and the parameters such as retinal thickness, choroidal thickness, vessel density and the area of the foveal avascular zone and providing novel ideas to deeply investigate the mechanism of high myopia and delay the occurrence and development of high myopia.

• **KEYWORDS:** high myopia; optical coherence tomography angiography(OCTA); foveal avascular zone; retinal nerve fiber layer thickness; choroid thickness; vascular density

Citation: Zhang YF, Du WH, Zhao MS, *et al.* Research progress of optical coherence tomography angiography in detecting retinal and choroidal thickness and blood flow in patients with high myopia. *Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci)* 2023;23(4):597-601

0 引言

近视是指在调节放松的状态下, 平行光线经眼球屈光系统后聚焦在视网膜之前的一种屈光状态。近些年, 近视逐渐成为威胁全球公共卫生健康的一大问题, 是导致视力损害的主要原因之一。目前, 全球近视患者已超过 14 亿, 其中高度近视患者约 1.63 亿, 约占人口总数的 2.7%^[1-2]。预计至 2050 年, 近视与高度近视患病率将达到 49.8% 和 9.8%^[3]。高度近视是指近视度数在 $-6.00D$ 以上的一种屈光不正状态。高度近视患者除远视力差以外, 常伴有眩光、飞蚊症、夜间视物模糊等症状以及不同程度眼底改变, 如豹纹状眼底、Fuchs 斑、黄斑劈裂、黄斑出血、视网膜下新生血管等。多项研究证明, 高度近视与并发性白内障、视网膜脱离、开角型青光眼、近视性黄斑变性、黄斑裂孔、后巩膜葡萄肿、脉络膜退行性病变等疾病的发生发展密切相关^[4-6]。

光学相干断层扫描血管成像(optical coherence tomography angiography, OCTA)是以 OCT 为基础, 在同一横断面进行多次扫描, 通过监测 OCT 信号变化探测血管

腔中红细胞的运动,将血管信息影像化,最终得到完整的视网膜脉络膜三维血管图像^[7]。作为一种新型的非侵入性眼底血管成像技术,OCTA在多种眼科疾病的诊断及治疗效果检测等方面有其独特的优势,主要体现在以下几个方面:(1)无创性;(2)扫描时间短,仅需5~6s;(3)将眼底血流信号分层成像,实现对视网膜、脉络膜的精确观察;(4)避免染色剂的渗漏、着色等问题;(5)高分辨率^[8]。OCTA以高分辨率识别视网膜脉络膜血流信息,对活体组织视网膜脉络膜微血管循环成像,在观察正常视网膜脉络膜血管改变及各种眼底疾病的管理随访、治疗效果检测等方面具有独特优势。OCTA可实现高度近视患者脉络膜和视网膜毛细血管的可视化,量化视盘和黄斑区神经和血管损伤,对检测高度近视视网膜脉络膜改变具有重要意义。

1 OCTA的诞生和发展

OCTA是一种无创、高效的新兴成像技术,其成像算法则是以OCT为基础建立的。通过探测血管中红细胞的流动,去除静止的组织像素点,得到相关二维图像并在三维层面进行图像合成。OCTA可以将视网膜和脉络膜灌注血管进行三维可视化,并提供定性、定量的信息^[9-10]。1985年,伦琴从事阴极射线研究时发现了X线,打开了医学影像学的大门。1991年,Huang等^[11]使用OCT扫描人眼视盘区及视网膜动静脉,得到了第一张视盘区成像图,并测算了视网膜神经纤维层厚度。1996年,OCT技术投入眼科临床使用,起初为时域OCT(time-domain optical coherence tomography,TD-OCT),但成像速度慢、扫描质量差等缺点使该设备难以推广。后来经过技术的不断更迭,从傅里叶域OCT(fourier-domain OCT,FD-OCT)到光谱域OCT(spectral domain OCT,SD-OCT)和扫描源OCT(swept source OCT,SS-OCT),其扫描速度、分辨率等指标较之前显著提升^[12]。SD-OCT的高扫描速率、高灵敏度特点,让其能够实现对视网膜高分辨率与高精度的三维测量,这为OCTA的产生奠定了基础。2006年,Makita等^[13]利用840nm波段的SD-OCT对受试者的视网膜、脉络膜进行观察,实现了黄斑区视网膜、脉络膜循环的可视化,这是OCTA最早的应用之一。现今,OCTA已成为眼科常用检查设备。相较于传统的荧光素眼底血管造影(fundus fluorescein angiography,FFA)、吲哚菁绿血管造影(indocyanine green angiography,ICGA),OCTA具有无创性、高分辨率、三维成像、定性定量评估等优势^[14]。近几年,OCTA的功能已经从传统的眼底成像发展到眼前节成像,在虹膜血管疾病、角膜血管增生、青光眼等疾病的诊治中发挥重要作用^[15-16]。

2 OCTA在高度近视方面的应用

2.1 视网膜

高度近视所导致的眼轴延长等眼球形态改变会对视网膜形态、厚度以及眼底循环等产生影响,进而导致视网膜功能受损,最佳矫正视力及视觉质量下降。早在20世纪,就有研究人员对高度近视眼球进行组织病理学检查,发现了诸如视网膜脱离、黄斑劈裂、漆裂纹、视网膜下新生血管等多种病理改变^[17]。辅助检查手段的更新使研究者可以进一步了解高度近视的病理变化,OCTA对于各种视网膜参数的获取具有高效性、无创性、可重复性等特点,为研究者观察高度近视眼底结构及微循环的改变提供了不可或缺的帮助。

2.1.1 视网膜中心凹无血管区面积

视网膜分为神经上皮

层和色素上皮层,神经上皮层又可分为9层,其中浅层毛细血管主要分布于神经节细胞层和神经纤维层,深层毛细血管主要分布于内丛状层和内核层,两者均集中在视网膜的内五层,而视网膜外五层中很少有血管分布。视网膜内五层于中心凹处逐渐变薄、消失,留下无血管的区域,称为中心凹无血管区(foveal avascular zone,FAZ)^[18]。FAZ是精细视觉产生的区域,其形态的变化反映了黄斑区缺血的程度^[19]。目前对于视网膜FAZ面积与高度近视之间的相关性并没有一致性的结论。部分研究者认为,高度近视患者浅层毛细血管及深层毛细血管的FAZ面积随着高度近视的发展而增加^[1,20-22],其中,He等^[20]指出FAZ面积增加与高度近视患者黄斑区血流灌注减少具有相关性。分析其原因可能是由于高度近视患者眼轴增长、视网膜厚度变薄、血管管径变窄,视网膜组织对氧气的需求减少,最终导致视网膜FAZ面积增加。Tan等^[23]则认为高度近视患者的FAZ面积与脉络膜厚度明显相关。视网膜黄斑区主要由脉络膜滋养,虽然眼轴长度并未直接影响FAZ面积,但高度近视导致脉络膜厚度变化,进而影响FAZ面积。Ucak等^[24]通过对比高度近视患者和普通人群发现,两组浅层或深层FAZ面积没有显著差异,但高度近视患者浅层和深层毛细血管丛密度明显低于普通人群。Fan等^[25]指出,之所以高度近视与视网膜FAZ面积的相关性的研究结果存在差异,主要是因为不同研究对病理性近视患者的纳入等标准不同,从而可能产生研究结果的差异。

2.1.2 视网膜毛细血管丛密度

OCTA可以自动检测视网膜黄斑区毛细血管丛密度,并将其分为浅层毛细血管丛和深层毛细血管丛,相较于既往的FFA和ICGA,OCTA可以更加精确地分析眼底微循环的改变。目前,多数研究认为高度近视患者浅层和深层毛细血管丛密度较低^[26-31]。Al-Sheikh等^[32]研究发现浅层与深层毛细血管丛密度均随着近视的发展而降低,其原因可能是由于眼轴增长,脉络膜拉伸变薄。正常情况下,脉络膜需要对外层视网膜提供充足的氧气和其所需要的营养物质。然而,当近视引起眼轴增长、视网膜变薄时,脉络膜的血供减少,以维持外部视网膜的氧气需求。Zheng等^[33]研究除了证实高度近视患者视网膜血管密度降低之外,同时还发现视网膜小动脉管径变窄。此外,还有部分研究人员将毛细血管丛分成了浅、中、深3层进行研究。Zhu等^[34]研究采用渐进匹配的方法,将视网膜毛细血管手动分割为浅、中、深3层,并对其定量分析,发现随着近视的进行性加重,中层及深层毛细血管丛血管密度增加,且深层毛细血管丛变化比浅层及中层毛细血管丛的变化更早。

2.1.3 视网膜厚度

许多研究表明,高度近视的发生发展与视网膜厚度有一定的相关性。目前认为眼轴越长,视网膜整体厚度越低,这可能是由于伴着眼轴的纵向伸长,视网膜脉络膜拉伸所致^[31,35]。而高度近视与各个扇区的视网膜脉络膜厚度的相关性并未有一致结论。黄斑中央区的视网膜厚度与高度近视之间的联系尚无明确结论,部分研究认为中央区视网膜厚度与眼轴长度存在明显的负相关^[36],Hassan等^[37]研究发现,视网膜中心凹区血管密度与视网膜中央厚度相关,近视患者视网膜中心凹旁区域血管密度更低,这可能是近视患者视网膜内核层变薄所导致的,这与Liu等^[38]研究结果相一致。除了对视网膜厚度的整体测量,OCTA亦可用于视网膜各层厚度的分层测量。Tan等^[39]对于青光眼的研究中使用黄斑区神经节细

胞复合体(macularganglion cell complex, mGCC)这一描述, mGCC是指黄斑区视神经纤维层、神经节细胞层、内丛状层3层,研究发现这三层厚度变化与青光眼发生发展密切相关。考虑到高度近视与青光眼也存在一定的相关性,研究人员测量了高度近视患者的mGCC,发现高度近视患者mGCC厚度变薄^[40]。

2.2 脉络膜 脉络膜是位于巩膜与视网膜之间富含色素的血管性结构,可分为Bruch膜、脉络膜毛细血管、Sattler层、Haller层和脉络膜上腔5层,其中脉络膜毛细血管、Sattler层、Haller层3层为血管层。毛细血管层为视网膜神经上皮层外层和部分视神经提供血供。高度近视患者通常会产​​生脉络膜萎缩、脉络膜厚度改变等,这些改变往往与高度近视患者的视力改变存在相关性^[41]。OCTA的出现为研究人员更精细地观察脉络膜厚度改变以及脉络膜各血管层的改变提供了新的手段。

2.2.1 脉络膜血管形态和血流密度改变 高度近视的发生发展导致脉络膜血管形态改变,血流密度下降。高度近视患者脉络膜的组织学变化要先于视网膜,故对高度近视患者进行脉络膜血管形态、血流密度的检查是非常重要的。随着患者的眼轴延长,脉络膜血管变细、变薄,管腔变窄,部分脉络膜因为缺乏足够的血供,导致脉络膜萎缩,进而形成斑片状甚至弥漫萎缩灶。加之视网膜色素上皮细胞发育不良或色素不足,通过萎缩的视网膜色素上皮层,可以看到粗大的橘红色脉络膜血管,呈现豹纹状眼底。通过OCTA检查发现,在高度近视患者的斑片状萎缩区和弥漫性萎缩区内脉络膜毛细血管密度降低^[42]。Mastropasqua等^[43]通过OCTA对高度近视患者的脉络膜进行观测,发现高度近视患者的脉络膜血流密度降低,空洞面积增加。Li等^[44]对高度近视患者脉络膜微循环进行观测,发现脉络膜血流不足百分比相较于正常人下降了237%。此外,OCTA亦可应用于高度近视患者合并脉络膜新生血管(choroidal neovascularization, CNV)的检测。Miyata等^[45]对病理性近视患者行FFA和OCTA检查,发现OCTA对CNV具有良好的检出率,甚至对于OCTA检测出存在CNV的患者,无需再次进行FFA以证实结果。最近,研究者通过OCTA测量脉络膜血管体积和脉络膜血管指数,实现了脉络膜灌注的三维量化,Luo等^[46]通过测量高度近视患者的脉络膜血管体积及血管指数,发现两者与高度近视之间存在负相关。

2.2.2 脉络膜厚度 众多基于OCTA的研究表明,脉络膜厚度与年龄、近视程度等因素呈负相关。随着近视度数的增加,脉络膜厚度也随之变薄^[47-50]。Fujiwara等^[51]将高度近视屈光度与脉络膜厚度的关系精确化,发现近视度数每上升-1.0D,中心凹区脉络膜厚度降低8.7 μ m。高度近视损伤脉络膜的机制迄今尚未完全探索清楚,目前学者推测其与眼轴增长、巩膜形态改变等原因有关。研究人员试图探究脉络膜厚度与脉络膜血流密度之间是否具有相关性,Wong等^[52]认为脉络膜厚度下降可能导致脉络膜血流密度降低,进而导致某些血管因子表达上调,促进脉络膜新生血管的产生。有研究统计了不同研究中高度近视患者各个象限内脉络膜厚度的变化,发现往往是鼻侧脉络膜厚度最低,认为鼻侧脉络膜厚度可以作为近视发展进程中的稳定因素^[53]。

2.3 视盘 视盘是黄斑鼻侧约3mm处,直径约1.5mm,境界清楚的淡红色圆盘状结构,其上有视神经以及视网膜动

静脉走行。高度近视患者视盘结构在长眼轴、后巩膜葡萄肿等影响下会发生一定的改变,如视盘旁萎缩弧、视盘倾斜、拉伸、旋转等,视盘区毛细血管血流密度与视网膜神经纤维层厚度也会有所变化。OCTA可以自动勾画视盘轮廓,将视盘区分为上、下、鼻、颞4个象限(亦有其他学者将其分为8个,甚至12个象限进行研究),并对每个象限内的视盘区进行分析和观察,获得视盘区血流密度、神经纤维层厚度等参数数据。

2.3.1 视盘周围毛细血管密度 视盘区视网膜主要有浅神经丛、深神经丛、乳头周围毛细血管神经丛3层血供,良好的血供是视盘区视网膜发挥正常功能的基础。既往的技术缺乏对视盘周围血管密度的定量分析,OCTA可以显示视盘区周围血流灌注情况并将其量化。Spaide等^[7]发现FFA仅能对浅层毛细血管进行观察而难以观测深层毛细血管,其使用FFA和OCTA两种不同的方式获取正常健康人群的视盘周围毛细血管图像并加之对比,发现OCTA所得到的图像具有更高的清晰度。有研究证明视盘周围血管密度与屈光度有明显的相关性,眼轴越长,视盘整体周围血管密度越低^[20,54-56],而各个象限内的视网膜毛细血管密度与高度近视之间的关系众说纷纭,目前主流观点是除视盘颞侧周围血管密度与眼轴长度呈明显的负相关外^[54],其他象限尚未得出一致结论。Jonas等^[57]发现,高度近视患者眼轴变长并导致视盘发生旋转、变形,由于视神经起源于眼眶鼻上部,故其颞侧会比鼻侧承担更大的压力。Sung等^[58]认为浅层视盘毛细血管密度与眼轴长度有关,深层毛细血管密度与视盘改变如视盘倾斜、旋转等有关。当视盘发生旋转、变形,视盘周围毛细血管因牵拉力受到损伤,导致视盘周围毛细血管密度下降^[59]。

2.3.2 视盘神经纤维层厚度 研究人员发现神经纤维层厚度与近视具有一定的相关性。相比普通人群,高度近视患者上侧、下侧、鼻侧扇区的神经纤维层厚度与眼轴长度呈负相关^[28,60-61],然而对于颞侧扇区的神经纤维层厚度与眼轴长度的相关性尚无明确结论。关新辉等^[62]认为随着眼轴增长,视盘颞侧扇区神经纤维层厚度增加。Yaparak等^[63]发现高度近视患者视盘颞侧扇区神经纤维层厚度与普通人群相比并无显著性差异。徐利辉等^[64]研究发现,由于高度近视患者眼轴长度增加,使用光学相干断层扫描仪对视盘进行扫描时可能会错误地判断视盘面积,从而使视盘神经纤维层厚度的测量产生误差,排除可能会产生误差的光学放大效应后发现视盘颞侧扇区神经纤维层厚度增加。目前认为,高度近视导致视网膜神经纤维层厚度改变的原因有巩膜和视网膜厚度改变、视网膜血管管径变窄、视网膜灌注量下降、脉络膜和视网膜微循环改变、神经节细胞轴索变性等^[65]。

3 OCTA的缺陷与弱势

目前来说,虽然OCTA有其独到的优势,但仍有一些不足之处:(1)OCTA基于光信号的成像特点,使得伪影在OCTA中非常常见,这严重影响了OCTA的图像质量,为临床医生的日常工作带来了困扰^[66];(2)OCTA可检测到的血流速度是有上限和下限的,故无法捕获到低于或高于阈值的血流信号;(3)OCTA并不适合所有患者,只有在患者配合度高,固视佳,屈光间质良好的情况下才能得到高质量的OCTA图像;(4)缺乏流体速度等信息^[67];(5)受限于扫描范围,OCTA无法获得全部的视网膜图像信息,对于某些位于视网膜周边部的病理改变及血流信息,往往要

依赖于其他辅助检查手段^[68]。另有研究表明,OCTA 测量浅层黄斑区视网膜血管密度时使用 3mm×3mm 范围,所得到的结果更加精确^[69],对于高度近视患者,由于其眼轴变长,视网膜拉伸,从而使某些微小的血管变化难以在 6mm×6mm 范围内精确定义。

4 总结与展望

OCTA 的出现为高度近视眼底微循环的活体研究提供了可能,通过对视网膜脉络膜血管的扫描与三维重建,实时、无创地提供了眼底血流动力学信息。目前研究普遍认为高度近视患者黄斑区以及视网膜附近的浅、深层毛细血管丛密度、脉络膜血流密度及视盘区周围血流密度降低,脉络膜厚度、神经纤维层厚度变薄,但高度近视与 FAZ 面积之间的关系尚无明确结论。OCTA 作为一种新兴的眼科检查手段,具有无创、高分辨率和三维成像等优势,在高度近视研究方面具有独特的应用领域。随着 OCTA 技术的不断更迭与发展,OCTA 将会在高度近视乃至更广阔的眼科领域贡献力量。

参考文献

- 1 Min CH, Al-Qattan HM, Lee JY, et al. Macular microvasculature in high myopia without pathologic changes; an optical coherence tomography angiography study. *Korean J Ophthalmol* 2020; 34(2): 106-112
- 2 瞿迎新, 金明. 高度近视眼底改变的更新研究进展. *眼科新进展* 2019; 39(12): 1197-1200
- 3 Saw SM, Matsumura S, Hoang QV. Prevention and management of myopia and myopic pathology. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2019; 60(2): 488-499
- 4 Ohno-Matsui K, Jonas JB. Posterior staphyloma in pathologic myopia. *Prog Retin Eye Res* 2019; 70: 99-109
- 5 李涛, 周晓东. 高度近视眼底形态特征的研究进展. *中国眼耳鼻喉科杂志* 2018; 18(6): 434-437
- 6 Ikuno Y. Overview of the complications of high myopia. *Retina* 2017; 37(12): 2347-2351
- 7 Spaide RF, Klancnik JM Jr, Cooney MJ. Retinal vascular layers imaged by fluorescein angiography and optical coherence tomography angiography. *JAMA Ophthalmol* 2015; 133(1): 45-50
- 8 杨香香, 何媛, 张坚. OCTA 技术在原发性青光眼中的应用研究进展. *国际眼科杂志* 2021; 21(1): 57-61
- 9 Bille JF. High Resolution Imaging in Microscopy and Ophthalmology: New Frontiers in Biomedical Optics. Cham (CH): Springer 2019; 135-160
- 10 Dingerkus VLS, Munk MR, Brinkmann MP, et al. Optical coherence tomography angiography (OCTA) as a new diagnostic tool in uveitis. *J Ophthalm Inflamm Infect* 2019; 9(1): 10
- 11 Huang D, Swanson EA, Lin CP, et al. Optical coherence tomography. *Science* 1991; 254(5035): 1178-1181
- 12 Bille JF. High Resolution Imaging in Microscopy and Ophthalmology: New Frontiers in Biomedical Optics. Cham (CH): Springer 2019; 59-85
- 13 Makita S, Hong Y, Yamanari M, et al. Optical coherence angiography. *Opt Express* 2006; 14(17): 7821-7840
- 14 魏文斌, 周楠. 光相干断层扫描血管成像在眼底疾病临床应用中的不足及前景. *中华眼底病杂志* 2018; 34(4): 317-322
- 15 王雪晴, 夏丽坤. OCTA 测量近视人群视网膜血管密度及中心凹无血管区的研究进展. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2021; 23(2): 150-155
- 16 郭晋豪, 李阳, 刘智明, 等. 光学相干层析的三维血管成像方法及其算法. *激光生物学报* 2020; 29(5): 385-391
- 17 Grossniklaus HE, Green WR. Pathologic findings in pathologic myopia. *Retina* 1992; 12(2): 127-133

- 18 罗金香, 肖满意, 段宣初. OCTA 在评估高度近视眼底形态及血流变化中应用的研究进展. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2020; 22(10): 789-795
- 19 赵立宇, 杨芳, 吴昌凡, 等. 视网膜血管病中黄斑中心凹无血管区的研究进展. *中华眼底病杂志* 2021; 37(2): 158-162
- 20 He JN, Chen QY, Yin Y, et al. Association between retinal microvasculature and optic disc alterations in high myopia. *Eye (Lond)* 2019; 33(9): 1494-1503
- 21 Cheng D, Chen Q, Wu YF, et al. Deep perifoveal vessel density as an indicator of capillary loss in high myopia. *Eye (Lond)* 2019; 33(12): 1961-1968
- 22 Sung MS, Lee TH, Heo H, et al. Association between optic nerve head deformation and retinal microvasculature in high myopia. *Am J Ophthalmol* 2018; 188: 81-90
- 23 Tan CS, Lim LW, Chow VS, et al. Optical coherence tomography angiography evaluation of the parafoveal vasculature and its relationship with ocular factors. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2016; 57(9): OCT224-OCT234
- 24 Ucak T, Icel E, Yilmaz H, et al. Alterations in optical coherence tomography angiography findings in patients with high myopia. *Eye (Lond)* 2020; 34(6): 1129-1135
- 25 Fan H, Chen HY, Ma HJ, et al. Reduced macular vascular density in myopic eyes. *Chin Med J (Engl)* 2017; 130(4): 445-451
- 26 Li M, Yang Y, Jiang H, et al. Retinal microvascular network and microcirculation assessments in high myopia. *Am J Ophthalmol* 2017; 174: 56-67
- 27 Wang XQ, Zeng LZ, Chen M, et al. A meta-analysis of alterations in the retina and choroid in high myopia assessed by optical coherence tomography angiography. *Ophthalmic Res* 2021; 64(6): 928-937
- 28 Qu DY, Lin Y, Jiang H, et al. Retinal nerve fiber layer (RNFL) integrity and its relations to retinal microvasculature and microcirculation in myopic eyes. *Eye Vis (Lond)* 2018; 5: 25
- 29 Yang Y, Zeng ZB, Mu JC, et al. Macular vascular density and visual function after phacoemulsification in cataract patients with non-pathological high myopia: a prospective observational cohort study. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2022; 260(8): 2597-2604
- 30 Jiang Y, Lou S, Li Y, et al. High myopia and macular vascular density: an optical coherence tomography angiography study. *BMC Ophthalmol* 2021; 21(1): 407
- 31 Yaprak AC, Yaprak L. Retinal microvasculature and optic disc alterations in non-pathological high myopia with optical coherence tomography angiography. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2021; 259(11): 3221-3227
- 32 Al-Sheikh M, Phasukkijwatana N, Dolz-Marco R, et al. Quantitative OCT angiography of the retinal microvasculature and the choriocapillaris in myopic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2017; 58(4): 2063-2069
- 33 Zheng QS, Zong Y, Li L, et al. Retinal vessel oxygen saturation and vessel diameter in high myopia. *Ophthalmic Physiol Opt* 2015; 35(5): 562-569
- 34 Zhu QJ, Xing XY, Wang MY, et al. Characterization of the three distinct retinal capillary plexuses using optical coherence tomography angiography in myopic eyes. *Transl Vis Sci Technol* 2020; 9(4): 8
- 35 Wu PC, Chen YJ, Chen CH, et al. Assessment of macular retinal thickness and volume in normal eyes and highly myopic eyes with third-generation optical coherence tomography. *Eye (Lond)* 2008; 22(4): 551-555
- 36 Yang SQ, Zhou MW, 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 Ophthalmol* 2017; 2017: 1397179

37 Hassan M, Sadiq MA, Halim MS, *et al.* Evaluation of macular and peripapillary vessel flow density in eyes with no known pathology using optical coherence tomography angiography. *Int J Retina Vitreous* 2017; 3: 27

38 Liu XT, Shen MX, Yuan YM, *et al.* Macular thickness profiles of intraretinal layers in myopia evaluated by ultrahigh-resolution optical coherence tomography. *Am J Ophthalmol* 2015; 160(1):53-61. e2

39 Tan O, Li G, Lu ATH, *et al.* Mapping of macular substructures with optical coherence tomography for glaucoma diagnosis. *Ophthalmology* 2008; 115(6): 949-956

40 雷雅迪, 刘鹤南, 陈晓隆. 光学相干断层扫描检测黄斑区神经节细胞复合体变化的研究进展. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2022; 24(1): 70-74

41 常雪娇, 吕亮, 向艳, 等. 近视眼视网膜和脉络膜厚度及血流的研究进展. *华中科技大学学报(医学版)* 2021; 50(6): 793-799

42 李惠, 吴昌凡, 张雷, 等. 相干光层析血管成像术在高度近视眼诊治中的运用. *临床眼科杂志* 2019; 27(6): 565-568

43 Mastropasqua R, Viggiano P, Borrelli E, *et al.* *In vivo* mapping of the choriocapillaris in high myopia: a widefield swept source optical coherence tomography angiography. *Sci Rep* 2019; 9(1): 18932

44 Li J, Zhou H, Feinstein M, *et al.* Choriocapillaris changes in myopic macular degeneration. *Transl Vis Sci Technol* 2022; 11(2): 37

45 Miyata M, Ooto S, Hata M, *et al.* Detection of myopic choroidal neovascularization using optical coherence tomography angiography. *Am J Ophthalmol* 2016; 165: 108-114

46 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

47 Nishida Y, Fujiwara T, Imamura Y, *et al.* Choroidal thickness and visual acuity in highly myopic eyes. *Retina* 2012; 32(7): 1229-1236

48 Fujiwara A, Shiragami C, Shirakata Y, *et al.* Enhanced depth imaging spectral-domain optical coherence tomography of subfoveal choroidal thickness in normal Japanese eyes. *Jpn J Ophthalmol* 2012; 56(3): 230-235

49 Zhu DX, Shen MX, Jiang H, *et al.* Broadband superluminescent diode-based ultrahigh resolution optical coherence tomography for ophthalmic imaging. *J Biomed Opt* 2011; 16(12): 126006

50 Xiong K, Wang W, Gong X, *et al.* Influence of high myopia on choriocapillaris perfusion and choroidal thickness in diabetic patients without diabetic retinopathy. *Retina* 2022; 42(6): 1077-1084

51 Fujiwara T, Imamura Y, Margolis R, *et al.* Enhanced depth imaging optical coherence tomography of the choroid in highly myopic eyes. *Am J Ophthalmol* 2009; 148(3): 445-450

52 Wong CW, Phua V, Lee SY, *et al.* Is choroidal or scleral thickness related to myopic macular degeneration? *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2017; 58(2): 907-913

53 段虹宇, 马佰凯, 杨婷婷, 等. 高度近视眼脉络膜形态学改变的研究进展. *中华眼科杂志* 2021; 57(6): 459-464

54 赵秋雅, 邢怡桥, 杜磊, 等. 视盘周围血管密度和视网膜神经纤维层厚度与眼轴长度和屈光度的相关性分析. *眼科新进展* 2020; 40(8): 769-771

55 Wang XL, Kong XM, Jiang CH, *et al.* Is the peripapillary retinal perfusion related to myopia in healthy eyes? A prospective comparative study. *BMJ Open* 2016; 6(3): e010791

56 Man REK, Lamoureux EL, Taouk Y, *et al.* Axial length, retinal function, and oxygen consumption: a potential mechanism for a lower risk of diabetic retinopathy in longer eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013; 54(12): 7691-7698

57 Jonas JB, Dai Y, Panda - Jonas S. Peripapillary suprachoroidal cavitation, parapapillary gamma zone and optic disc rotation due to the biomechanics of the optic nerve Dura mater. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2016; 57(10): 4373

58 Sung MS, Heo H, Park SW. Microstructure of parapapillary atrophy is associated with parapapillary microvasculature in myopic eyes. *Am J Ophthalmol* 2018; 192: 157-168

59 程翠杰, 方严. 高度近视视网膜血管系统研究进展. *齐齐哈尔医学院学报* 2021; 42(9): 784-788

60 邢潇英. 近视人群视盘旁神经纤维层厚度和视盘形态学相关性研究. *国际眼科杂志* 2019; 19(12): 2084-2087

61 Ganekal S, Sathwini MH, Kagathur S. Effect of myopia and optic disc area on ganglion cell-inner plexiform layer and retinal nerve fiber layer thickness. *Indian J Ophthalmol* 2021; 69(7): 1820-1824

62 关新辉, 张明媚. 青少年近视患者视网膜神经纤维层厚度变化分析. *国际眼科杂志* 2020; 20(12): 2054-2059

63 Yaprak AC, Yaprak L. Retinal microvasculature and optic disc alterations in non-pathological high myopia with optical coherence tomography angiography. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2021; 259(11): 3221-3227

64 徐利辉, 秦萍, 许耀. 频域 OCT 测量不同程度近视视网膜神经纤维层厚度中光学放大效应的影响. *中华实验眼科杂志* 2019; 37(3): 206-211

65 Kamal Salah R, Morillo-Sánchez MJ, García-Ben A, *et al.* The effect of peripapillary detachment on retinal nerve fiber layer measurement by spectral domain optical coherence tomography in high myopia. *Ophthalmologica* 2015; 233(3-4): 209-215

66 孙晋夫, 余慧敏, 孙旭芳. 光学相干断层扫描血管成像中伪影的研究进展. *眼科新进展* 2021; 41(1): 79-83

67 Arya M, Rashad R, Sorour O, *et al.* Optical coherence tomography angiography (OCTA) flow speed mapping technology for retinal diseases. *Expert Rev Med Devices* 2018; 15(12): 875-882

68 魏文斌, 王倩. 光学相干层析血流成像的读片常识及要点. *中华眼科杂志* 2017; 53(5): 396-400

69 Li MY, Jin EZ, Dong CY, *et al.* The repeatability of superficial retinal vessel density measurements in eyes with long axial length using optical coherence tomography angiography. *BMC Ophthalmol* 2018; 18(1): 326