

# 光学相干断层扫描(OCT)在高度近视诊断中的应用研究综述

江俊达, 陈琦\*, 郭屿琦, 杨蕊, 陈宇浩

右江民族医学院研究生学院, 广西 百色

收稿日期: 2025年12月23日; 录用日期: 2026年1月18日; 发布日期: 2026年1月28日

## 摘要

光学相干断层扫描(OCT)作为一种高分辨率、无创的光学成像技术, 近年来在高度近视的诊断中展现出重要价值。本文系统综述了OCT的技术原理、发展历程及其在高度近视病理特征识别、并发症诊断和临床管理中的应用。研究表明, OCT凭借其微米级轴向分辨率和三维成像能力, 能够精准检测高度近视患者视网膜神经纤维层变薄、黄斑区光感受器损伤、脉络膜萎缩及后巩膜葡萄肿等关键病变。与传统影像技术(如荧光素眼底血管造影、超声检查)相比, OCT具有无辐射、快速成像和深层组织穿透等优势, 并可通过光学相干断层扫描血管成像(OCTA)技术实现视网膜血管的动态监测。然而, OCT在扫描深度、屈光介质混浊处理及标准化诊断标准等方面仍存在局限性。未来, 结合人工智能算法与多模态影像融合技术有望进一步提升OCT在高度近视诊疗中的精准性和实用性。

## 关键词

光学相干断层扫描, 高度近视, 诊断应用, 黄斑病变, 脉络膜萎缩

# Application of Optical Coherence Tomography (OCT) in the Diagnosis of High Myopia: A Research Review

Junda Jiang, Qi Chen\*, Yuqi Guo, Rui Yang, Yuhao Chen

Graduate School, Youjiang Medical University for Nationalities, Baise Guangxi

Received: December 23, 2025; accepted: January 18, 2026; published: January 28, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 江俊达, 陈琦, 郭屿琦, 杨蕊, 陈宇浩. 光学相干断层扫描(OCT)在高度近视诊断中的应用研究综述[J]. 临床医学进展, 2026, 16(1): 2801-2811. DOI: 10.12677/acm.2026.161341

## Abstract

Optical coherence tomography (OCT) has emerged as a high-resolution, non-invasive optical imaging technique with significant value in the diagnosis of high myopia. This review systematically summarizes the technical principles, development, and applications of OCT in identifying pathological features, complications, and clinical management of high myopia. Studies demonstrate that OCT's micron-level axial resolution and three-dimensional imaging capabilities enable precise detection of key lesions such as retinal nerve fiber layer thinning, photoreceptor damage in the macula, choroidal atrophy, and posterior staphyloma in high myopia patients. Compared to traditional imaging modalities like fluorescein angiography and ultrasonography, OCT offers advantages including zero radiation, rapid imaging, and deep tissue penetration. Additionally, OCT angiography (OCTA) facilitates dynamic monitoring of retinal vasculature. However, limitations such as restricted scanning depth, challenges in addressing media opacities, and the lack of standardized diagnostic criteria persist. Future advancements integrating artificial intelligence algorithms and multimodal imaging fusion are expected to enhance the precision and practicality of OCT in high myopia diagnosis and treatment.

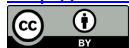
## Keywords

Optical Coherence Tomography (OCT), High Myopia, Diagnostic Application, Macular Lesions, Choroidal Atrophy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 国内外研究现状

### 1.1. OCT 技术原理与发展

#### 1.1.1. 基于低相干干涉测量法的无创成像技术

光学相干断层扫描(OCT)是一种基于低相干干涉测量的无创成像技术,利用 Michelson 干涉仪对不同层次的反射光信号具有选择性的性质,以及近红外光背向散射时间延迟的特性实现组织微米级断层成像[1]。安高新(2021)提出由于其非接触式的特性,OCT 可以获得眼底视网膜,尤其是黄斑和视盘部位的精细结构,且无辐射特点更适合用于高度近视等敏感部位重复检出[2]。张小雷等(2015)认为 OCT 能够维持入射光相干性,可以检测弹性散射光信号,达到纳米级组织结构变化的深度分辨测量,有利于发现高度近视眼早期视网膜层间的微细结构异常[1]。马力等(2021)指出频域 OCT 应用了快速傅里叶变换来处理干涉信号,轴向分辨率提高到了 5  $\mu\text{m}$ ,外层视网膜的细微结构更易被观察到[3];唐仕波(2015)指出超高分辨率频域 OCT 可达 3~4  $\mu\text{m}$  分辨率,可用于辨识外界膜、IS/OS 连接等重要光感受器结构[4]。马瑞彤(2017)以传统影像与 OCT 成像比较了 OCT 对于视网膜厚度测量的优越性,指出其二维、三维成像能准确定位到不同的视网膜层次[5];魏雁涛(2004)认为 OCT 拥有高分辨率,能够实现从角膜到脉络膜的整个眼部结构成像[6]。另外高瑞新(2012)发现,OCT 伪色表示了不同的组织反射率强弱,如神经纤维层呈红颜色,光感受器层呈暗蓝色,这样便于观察高度近视眼视网膜层间的变化[7]。

#### 1.1.2. 轴向分辨率达 3~10 $\mu\text{m}$ 的超高分辨率优势

OCT 轴向分辨高,在高度近视中也有很大的优势,朱鲜阳(2014)比较得出,OCT 的分辨率为 IVUS

的十倍以上,可以分辨血管内超声的血管壁特有的组织学改变[8],此种优点同样适用于高度近视视网膜层间的微细结构的判读。余丹青(2004)介绍,OCT 导管系统分辨率可达 10~20  $\mu\text{m}$ ,而精细系统的分辨能力可达到 4  $\mu\text{m}$ ,能分辨出直径 < 50  $\mu\text{m}$  的薄纤维帽等超微结构[9],这为进一步探索高度近视视网膜劈裂的早期识别方法奠定了技术基础。何旭(2009)认为,OCT 犹如体内的组织学显微镜,其分辨率为 10~15  $\mu\text{m}$ ,能够较为准确地判定易损斑块薄层结构,同样的道理也可以用于高度近视黄斑区光感受器内外节连接(IS/OS)断裂、椭圆盘桥接等细微病变的观测[10]。廖静芸(2019)指出,OCT 是目前为止分辨率最高的成像技术,可以直接检测到斑块内新生血管[11],在此基础上开展的眼科研究可以针对高度近视脉络膜新生血管做出精准判断。阎志良(2012)发现,OCT 可以发现纤维帽断面处有血栓漂浮[12],即可以在视网膜中区分高度近视合并视网膜下出血和视网膜下渗出的准确性更好[13]。据张靖报道,OCT 可以实现对纤维帽巨噬细胞的数量量化,且对研究高度近视炎症微环境有意义;郑刚(2015)表示:新型 OCT 应用激光为光源,扫描速度快,几秒钟即可成像,因此提高了整个视网膜成像的速度[14]。李朝(2018)阐述了 OCT 是通过检测反射光的时间延迟来实现二维成像的,其具有超高的分辨能力,因此可以观察到高度近视眼视盘周围  $\beta$  区微结构的变化[15]。鲁静朝(2005)用组织学对照证实 OCT 显示斑块内膜的准确性,从而为高度近视视网膜神经上皮层脱离的定量诊断提供了一种可能的方法[16]。

### 1.1.3. 扫频源 OCT (SS-OCT)的技术突破与应用优势

鉴于高度近视患者眼轴延长、巩膜向后扩张的解剖学特点,传统时域/频域 OCT 在深层组织成像中存在明显局限性,而扫频源 OCT (SS-OCT)凭借技术革新成为当前研究热点。SS-OCT 采用宽调谐范围的扫频激光光源,结合高速数据采集系统,在保留微米级轴向分辨率(3~5  $\mu\text{m}$ )的基础上,将组织穿透深度提升至 4~6 mm,远超传统频域 OCT 的 2~3 mm,完美适配高度近视眼底深层结构成像需求[17]。

在后巩膜葡萄肿成像方面,SS-OCT 的深穿透性可清晰显示葡萄肿隆起部位的巩膜厚度变化、视网膜神经上皮层牵拉状态及脉络膜皱褶形态,解决了传统 OCT 因扫描深度不足导致的葡萄肿底部结构截断问题。研究表明[18],SS-OCT 可定量测量后巩膜葡萄肿的曲率半径、隆起高度及累及范围,为评估病变进展及手术规划提供精准的形态学依据。

在筛板缺损检测中,高度近视患者因眼内压力梯度改变易导致筛板胶原纤维破坏,传统 OCT 难以穿透巩膜组织清晰显示筛板结构[19]。SS-OCT 通过长波长光源(1050~1310 nm)减少组织散射干扰,可直观呈现筛板的缺损位置、范围及边缘形态,并能量化筛板孔径大小与视神经纤维束的关系,为高度近视继发性视神经损伤的早期诊断提供关键指标。

在脉络膜全层成像领域,SS-OCT 的优势尤为突出[20]。高度近视常伴随脉络膜进行性萎缩,传统 OCT 仅能显示脉络膜浅层结构,而 SS-OCT 可完整穿透脉络膜全层,清晰分辨脉络膜大血管层、中血管层及毛细血管层的形态变化,精准量化脉络膜厚度(包括黄斑中心凹及周边区域)及血管密度[21]。此外,SS-OCT 结合增强深度成像(EDI)模式,可进一步提升脉络膜深层信号强度,明确脉络膜毛细血管萎缩的范围与程度,为高度近视脉络膜病变的分期及预后评估提供客观依据。

同时,SS-OCT 的高速扫描特性(扫描速率可达 100 kHz 以上)可减少眼部运动伪影[22],在高度近视患者配合度较低的情况下仍能获得清晰稳定的图像,尤其适用于儿童高度近视患者的长期随访监测。

## 1.2. 高度近视关键解剖结构的病理特征与临床量化应用

### 1.2.1. 黄斑区视网膜变薄与脉络膜萎缩

高度近视患者黄斑区视网膜变薄及脉络膜萎缩的特点均可在 OCT 图像上见到典型的形态学特征,楼方磊等(2018)基于临床观察发现高度近视黄斑病变 OCT 表现为视网膜神经上皮层变薄,视网膜色素上皮

层边界清晰,范围广泛,脉络膜毛细血管层呈带状强反射[23],为近视性脉络膜视网膜萎缩的病理演变过程所特有;俞慧燕等(2006)认为 OCT 可清楚观察到黄斑区病灶处 RPE 与脉络膜毛细血管层的反射带梭形增厚和紊乱,可准确定位高度近视继发 CNV 与 RPE 之间的关系[24];马晓玲(2022)指出 OCT 可分辨出 PCV 的几个特征性征象:尖峰状 PED 及 PED 下方超反射环[25],有助于高度近视合并息肉状脉络膜血管病变(PCV)的鉴别诊断;定量分析时采用 SD-OCT 距视乳头中心 2000  $\mu\text{m}$  测量距视乳头中心 24 点全层视网膜厚度平均值,证明该方法客观地反应了高度近视视网膜变薄程度[26]。王玉(2004)按照 OCT 图像特点,将 CNV 分为边界清晰型和边界不清型,前者表现为强反射团向视网膜神经上皮层内隆起,后者表现为 RPE 层连续性破坏伴视网膜囊样水肿[27]。此种分类法也可用于判定高度近视继发 CNV 的形态学特征。魏昱慧等[28]进一步拓宽了 OCT 用于神经退行性疾病中的应用,认为视网膜神经纤维层(RNFL)厚度测量能够反映疾病进展情况。全超等[29]从定量检测视盘周围 RNFL 及黄斑节细胞层厚度两个角度说明 OCT 用于高度近视继发性视神经萎缩检出的意义。王益蓉[30]结合临床观察总结分析出黄斑裂孔手术后愈合类型的“U”型、“V”型两类,并总结了其形态学的特点以及术后视力恢复的程度。

### 1.2.2. 后巩膜葡萄肿与视盘形态改变

后巩膜葡萄肿与视盘形态改变是高度近视的特征性病理改变,在 OCT 影像上具有一定的特点。梁祝年等(2018)发现青光眼患者的视盘形态变化与视网膜神经纤维层(RNFL)变薄有关,此机制也适用于高度近视视神经损伤的判断,OCT 可通过测量 RNFL 厚度定量判断视神经损伤的程度[31]。王晓刚(2015)指出时域 OCT 已经可以对视盘周围的 RNFL 进行形态学观察,但频域 OCT 更有利于视盘量化的评估,可以在一定程度上用于高度近视继发青光眼的早期判断[17]。文美丹(2014)采用 OCT 测量中央角膜厚度的可重复性较好,非接触式测量避免了传统超声检查对高度近视脆弱眼球的机械刺激作用,该技术对于后巩膜葡萄肿也有一定形质学的评估价值[32]。汪新(2011)通过对比单眼弱视组(两眼视力相差  $\geq 1$  个 ETDRS 表的行数,且差值大于等于 1 行)患者两眼 RNFL 的差异发现(OCT),发现弱视组 RNFL 厚度较正常人群更厚且范围更大;与正常对照相比,不同原因的高度近视患者视力下降时其视盘形态也会发生改变(有宽基底锥形或二叶状等特征),且可由 OCT 直接提供(高度近视眼并伴有后巩膜葡萄肿的)因视盘受到眼内压力梯度差的牵拉造成的视盘变形等证据[33]。陈大复(2005)通过对视网膜静脉阻塞的研究发现 OCT 可以很好的观察到视网膜厚度变化及结构异常[34],并可以运用到高度近视后巩膜葡萄肿导致视盘牵引变形等方面的检测之中。通过 OCT 测量黄斑中心凹厚度的方法经标准化后也可用于高度近视后极部形态变异的定量评价(李莉,2013) [35]。刘玉平(2017)在非动脉炎性前部缺血性视神经病变中观察到 OCT 可动态监测从视盘水肿到萎缩的过程[36]。此点对高度近视视神经损害随访具有很好的指导意义。张骅(2015)比较 OCT 与超声内镜的分辨力发现,OCT 在黏膜表层结构成像中有 10 倍的分辨力,有利于高度近视视盘边缘结构微细改变的判读[37]。Se Ah Joa Hong (2017)的研究证实 OCT 可通过观察冠脉内血管腔内结构来明确其细微结构,类比于眼科学可以观察高度近视视盘血管的变化[38]。李晨曦(2017)认为 OCT 显示上皮结构是极为重要的诊断指标[39],这也可以直接推广到应用上以判断高度近视视盘周围视网膜内界膜的变化。

### 1.2.3. 视网膜劈裂与黄斑裂孔等并发症

视网膜劈裂及黄斑裂孔是高度近视进展过程中最为严重的两大并发症,而 OCT 图像上的改变对于这两种并发症的诊断意义重大。楼方磊(2018)通过对高度近视的黄斑裂孔眼的临床观察,发现高度近视的黄斑裂孔在 OCT 中表现为视网膜神经上皮层光带消失、脉络膜毛细血管层暴露、裂孔边缘囊样水肿等病理改变,这主要是由于高度近视眼玻璃体视网膜牵引所致[23]。王益蓉(2008)总结归纳出特发性黄斑裂孔的 OCT 分型标准,其中 I 期表现为玻璃体部分脱离引起视网膜层间囊样腔隙,III 期完全性玻璃体后脱



离,并出现裂孔盖膜上卷,对于高度近视继发性黄斑裂孔亦有参考意义。关于视网膜劈裂,王晓刚(2015)认为频域 OCT 可以较清晰地显示外层视网膜的层间分离,并且由于 OCT 可发现极早期的微米级水平的微囊样改变,具有高的敏感性,因此有助于早期诊断视网膜劈裂并采取相应的防治措施[17]。马晓玲(2022)用 OCT 检查息肉状脉络膜血管病变发现视网膜下超反射环等特征性征象[25],可用于与高度近视视网膜下液鉴别。赵建强等(2017)利用 OCT 分析高度近视黄斑裂孔形成机制,能够直接观看到玻璃体后界膜牵拉视网膜内界膜的关系[5],这对高度近视黄斑裂孔发生机理的说明十分有用。全超(2023)通过多发性硬化研究发现 OCT 可定量监测视网膜神经纤维层变薄的过程[29],此参数也可用于高度近视视网膜劈裂患者长期随访;另外,李娟(2019)研发的 OCTA 技术能够实现视网膜血管三维重建[20],可以辅助分析高度近视并发黄斑裂孔时的血流变化情况。

#### 1.2.4. 视网膜神经纤维层厚度定量测量

以 OCT 视网膜神经纤维层(RNFL)厚度定量测量是高度近视诊断的最主要的应用之一,临床证据已经表明非常明确;梁祝年等(2018)对 RNFL 厚度参数进行了系统的观察研究发现,其重复性较高,受试者工作特征曲线下的面积为 0.9,区分正常眼和青光眼的敏感度、特异度较高,RNFL 厚度也适用于高度近视并发继发性神经病变的早期发现和识别[31]。全超(2023)认为 OCT 可以实现视盘周围 RNFL 厚度测量,在神经退行性疾病中,可以通过动态监测视网膜变薄的过程来判断患者是否患有高度近视并发视神经萎缩,可以利用 OCT 的量化标准来进行高度近视合并视神经萎缩的判定[29]。郭从容等(2013)通过应用 SD-OCT 放射状 12 线扫描方式,通过测量距离视乳头中心 2000  $\mu\text{m}$  处 24 点全层视网膜厚度平均值得出高度近视 RNFL 定量分析的技术路线[26]。魏昱慧等(2023)在比较不同深度后额叶动脉 SD-OCT RNFL 测量值结果中得出帕金森病(PD)患者的 RNFL 变薄与病情严重程度呈正比,可能是利用 OCT 检测到的高度近视 RNFL 参数可作为高度近视所致神经视网膜损伤的生物标志物。汪新(2011)单眼弱视时,会存在一些 RNFL 厚度的异常变化,从而证明了 OCT 对区别高度近视性视神经病变与其它视神经疾病的独到之处。需要注意的是,刘玉平等(2017)对非动脉炎性前部缺血性视神经病变的研究证实了 OCT 可以清楚地显示出 RNFL 由急性期水肿至慢性期萎缩的过程,这对于高度近视视神经损害的纵向随访具有重要作用[36];此外,马力等(2021)认为采用频域 OCT 并使用其标准化的质量控制参数后,RNFL 厚度测量的精确性和重复性得到大幅提高,可用于对高度近视患者的临床研究[3]。

#### 1.2.5. 黄斑区微结构变化的精准识别

黄斑区微结构变化精准识别的优势为 OCT 进行高度近视诊断的一个非常重要的特点,相关的科研文献也证明了这一点,例如:楼方磊等[23] (2018)研究后认为高度近视黄斑病变在 OCT 上的表现为可清楚观察到视网膜神经上皮层光带缺损及囊样水肿,甚至可识别出黄斑裂孔边缘的微细结构异常;俞慧燕等(2006) [24]认为 OCT 可以明确地发现脉络膜新生血管(CNV)是否位于视网膜色素上皮(RPE)前方还是之后,并且可以根据 OCT 所表现出来的不同强度反射信号来区别边界清晰型和边界模糊型 CNV;马晓玲(2022) [25]研究发现 OCT 可以识别 PCV 的尖峰状色素上皮脱离(PED)和双层征。而无标记深度分辨测量(OCT 无标记)具有极高的灵敏度,在纳米尺度检测组织结构变化[1],正是由于高度近视早期的黄斑区光感受器内外节连接(IS/OS)断裂为微米级的变化,因此用这种方法也可实现高度近视早中期黄斑区光感受器内外节连接(IS/OS)断裂的变化。王玉(2004)以 OCT 图象特征将 CNV 分为不同的类型,发现边界清晰型 CNV 表现为强反射团向视网膜神经上皮层内隆起,而边界模糊型表现为 RPE 层连续性的中断和破坏[27]。该分类法能够为高度近视黄斑病变的形态学评估提供标准化分型依据。魏雁涛等(2004)认为 OCT 能获取从角膜到脉络膜范围全眼结构的高分辨率断层图像,并且其能够实现多组织层次的成像,这有利于对高度近视黄斑区复杂的病理改变进行立体分析[6]。唐仕波等(2015)利用超高分辨率频域 OCT (3~4  $\mu\text{m}$ ),

可发现极浅度的视网膜脱离以及非常细小的 RPE 病变,提高了对高度近视黄斑前膜等早期病变的检出率[4]。俞岚筑等(2018)阐明了 OCT 以不同颜色编码表示视网膜各层反射特点:神经纤维层呈红色高反射,光感受器层呈暗蓝色,为高度近视黄斑区层间结构异常的准确定位提供了一种简易有效的图像判读方法。

### 1.2.6. 脉络膜厚度与血管形态评估

脉络膜厚度和血管形态学是 OCT 用于高度近视的重要检测方向,目前已有多项临床证据表明其有重要的应用价值。赵鲜阳(2014)通过肺动脉高压研究发现 OCT 能够清晰显示血管壁各层病变的特点,由于具有创伤性小,可以在疾病发展的各个阶段反复使用的优势,因此这种检查手段也同样适用于高度近视脉络膜血管的纵向观察[8]。由李娟(2019)发明的 OCTA 高频率扫描可以实现获取视网膜血流信号,即刻生成微米级三维脉络膜血管成像图,并由此开展高度近视脉络膜毛细血管萎缩程度的定量分析[20]。马晓玲(2022)认为 OCT 的 BVN 可识别病理性息肉样病变尖峰-PED 及超反射环的特征性双层像,从而达到与高度近视合并脉络膜血管异常相关的病灶鉴别诊断的目的[25]。张小雷等(2015)认为基于弹性散射光的 OCT,可以无标记分析组织微结构变化,对高度近视早期脉络膜厚度发生的变化进行准确量化;王玉(2004)以 CNV-OCT 图像特征分析,发现脉络膜毛细血管层与 RPE 同样具有高反射特点,所以基于两者的反射特性存在差异也可以对高度近视脉络膜萎缩进行分层诊断。俞慧燕(2006)指出:OCT 能分辨 AMD 和 PCV 的脉络膜血管形态差异,在 OCT 上表现为 PCV 的 PED 更为陡峭,且这部分病变为高度近视脉络膜血管病的特异性改变[24]。魏雁涛(2004)认为 OCT 可以提供脉络膜的高分辨率断层图像,这突破了以往对高度近视脉络膜病程中脉络膜进行性变薄只有静态观察的方法[6]。另外唐仕波(2015)认为超高分辨率 OCT 可观察到脉络膜毛细血管层的微小变化,可分辨出 3~4  $\mu\text{m}$  的层状结构,OCT 图像的微小结构主要反映病变范围内的 Bruch 膜破裂或分离情况[4],因此,俞岚筑(2018)利用血管成像的方式证实了 OCT 可用于检测脉络膜血流灌注[19]。

## 1.3. OCT 与其他影像技术的比较优势

### 1.3.1. 相较于 FFA 的无创性优势

相比荧光素眼底血管造影(FFA)无创的优势,OCT 高度近视诊断时具有很大的临床应用价值,马瑞彤等(2017)对比观察发现:OCT 无需注射造影剂,可实现视网膜各层结构的断层成像,避免了 FFA 引起的过敏及肾脏负担,特别适合糖尿病、高血压等各种全身疾病合并的高度近视[5];安高新(2021)认为完全无辐射的 OCT 可以用于多次检查对于敏感人群无损害,非接触式的检查不会对角膜造成损伤,能够提供给高度近视患者比较安全的长期随访手段[2];朱鲜阳等(2014)提出 OCT 是一种微创的检查方式,可以应用于疾病的各个阶段,并且与传统的血管造影术相比,OCT 图像的分辨率提高了 10 倍,可以将脉络膜毛细血管层的病理改变看得清清楚楚;张小雷等(2015)认为 OCT 是基于光学干涉原理的一种无标记的检测方法,可以在纳米尺度上检测到视网膜不同层之间的细微结构差异,不需要荧光标记来检测生物组织中的细微结构改变[1]。王玉(2004)通过分析脉络膜新生血管(CNV)的影像特征,证实 OCT 能突破 FFA 平面成像的局限,在三维空间精确定位 CNV 与视网膜色素上皮层的解剖关系[27],俞慧燕等(2006)进一步阐明 OCT 无需散瞳即可获取黄斑区高分辨率图像,显著降低了检查过程对高度近视患者视功能的暂时性影响[24]。李娟(2019)开发的 OCTA 技术通过动态血流分析替代传统 FFA 的染料灌注,实现了视网膜血管系统的无创三维重建[20],马晓玲等(2022)补充说明 OCT 检查时间较 FFA 缩短 80% 以上,其快速成像特性特别适用于高度近视儿童及配合困难患者的诊断需求[25]。魏雁涛等(2004)总结 OCT 的无创特性使其成为眼科疾病筛查的首选方法,可安全应用于高度近视孕妇等特殊人群的眼底评估[6],而唐仕波等(2015)则指出频域 OCT 的无创重复测量特性为高度近视相关病变的疗效监测提供了标准化量化工具[4]。

### 1.3.2. 相比超声检查的高分辨率特性

相较于超声的高分辨率特性,OCT对于高度近视诊断具有较大的优势,何旭(2009)对比了OCT和IVUS,Ta等人,2006证明OCT的轴向分辨率在10~15  $\mu\text{m}$ 之间,比血管内超声提高近10倍[10],可以将血管内膜增生等微米级结构显示出来,用于视网膜成像时可以将高度近视患者光感受器层断裂等情况清晰显示出来。张骅等(2015)又表明OCT在黏膜表层的分辨率为超声内镜的10倍,能够清楚地显现出以前超声难以显示的视网膜内界膜微皱褶,在一定程度上能够提高高度近视黄斑部微结构异常早期诊断的检出率。廖静芸(2019)认为OCT是目前分辨率最高的血管内成像技术之一,可测得易损斑块中极薄的纤维帽(10  $\mu\text{m}$ ),从而得到与高度近视视网膜神经上皮层脱离测量相同的亚细胞级测量精度。乐士冠等(2017)运用冠状动脉造影发现OCT能识别IVUS不可见的<50  $\mu\text{m}$ 级别的微结构[38],超高分辨率有利于分析高度近视视盘周围 $\beta$ 带区的微小病理变化。鲁静朝(2005)通过组织学对照验证OCT显示斑块内外弹力膜的准确性[16],类比于眼科应用则表现为对高度近视Bruch膜破裂的精准定位。阎志良(2012)研究发现OCT可识别纤维帽中<100  $\mu\text{m}$ 的巨噬细胞浸润[12],这一微观分辨能力使其能检测高度近视视网膜层间的早期炎症反应。郑刚(2015)指出OCT的三维重建功能可提供超声检查难以实现的立体定位信息[14],特别适用于高度近视后巩膜葡萄肿的复杂形态学评估。张靖(2016)通过急性冠脉综合征研究证实OCT与组织学的高度相关性[13],为高度近视OCT影像的病理学解读提供了可靠依据。李朝(2018)阐明OCT利用近红外光干涉原理克服了声波散射的限制[15],使其在高度近视巩膜后极部成像中较传统超声获得更清晰的信号穿透性。

### 1.3.3. 三维成像对病变立体定位的价值

OCT的三维成像是高度近视病变立体定位的新方法,王玉(2004)根据OCT影像图像上的CNV特征以及使用三维图像重建的手段,确定了三维图像较于二维平面图而言的优势,在这个过程中有效地探析出CNV的位置是在RPE层上方还是下方,并且可以在某种程度上反应出其具体位置信息,对高度近视继发的CNV手术规划有很大帮助。马晓玲等(2022)发现OCT三维成像可直观显示PCV的立体结构,如BVN的空间分布及PCV病灶与脉络膜层解剖关系,从而为高度近视复杂眼底病变进行精准分型(25)。李娟(2019)利用OCTA技术制作微米级别血管的三维重建,在无创条件下对视网膜毛细血管网进行立体化显影,将高度近视眼黄斑区浅层和深层血管密度空间差异呈现在眼前。郑刚(2015)通过冠状动脉OCT三维成像研究得出OCT三维成像可用于血管分叉病变血管空间结构的构建,用类似的方法,对高度近视视盘周围RNFL缺损部位进行三维量化分析。楼方磊等(2018)利用临床案例表现了OCT三维成像可以呈现出黄斑裂孔的空间立体结构,包括黄斑裂孔边缘视网膜层间撕裂的矢量方向、玻璃体后界膜的脱离范围等信息,这具有高度的立体定位功能,能够提高高度近视黄斑手术的精准度[23]。而张靖等(2016)认为,应用OCT三维成像可以探查到囊膜破裂的位置和空间构型,因此该方法也可以用于对高度近视视网膜劈裂层间分离范围进行准确判断[13];乐士冠等(2017)研究通过静脉桥血管,用三维OCT检测的方法,发现三维OCT定量测量眼底病变管腔容积的能力较之传统二维B扫检查具有更好的稳定性和可靠性[38];俞岚筑等(2018)利用频域OCT三维成像可将视网膜各层的空间关系同一位图内实时显示出来的特性,在同样配合伪色编码技术的基础上,将高度近视患者的RPE萎缩区和正常组织区之间的边界,以不同颜色界线方式清晰呈现在三维图内,可以达到单凭肉眼对二者辨别的清晰度效果。以上这些都为进一步开展高度近视相关临床工作奠定了良好的基础。

## 1.4. OCT技术局限性及解决方案

### 1.4.1. 扫描深度受限的挑战

OCT技术由于扫描深度受限,在高度近视诊断上存在瓶颈。张小雷等(2015)认为OCT利用近红外光



进行组织成像,其穿透力通常只能达到 2~3 mm,高度近视伴发后巩膜葡萄肿的深部脉络膜结构无法成像[1];而朱鲜阳等(2014)应用血管壁成像观察发现,基于传统的 OCT 方法难以穿透超过 500  $\mu\text{m}$  的纤维化组织,因此也无法实现高度近视晚期脉络膜萎缩层深部病理改变的判断[8]。此外,沈婷梅(2007)阐明时域 OCT (TD-OCT)由于扫描范围有限,在高度近视后极部病灶大范围分布时易造成图像截断;马力等(2021)也提出频域 OCT 由于利用光谱编码技术提升了穿透性,但依然会因为高反射的豹纹状眼底所致的信号衰减,而不能达到完全成像。面对这一问题,唐仕波等(2015)使用了超高分辨率 OCT (Long-wavelength OCT, 1050 nm),将组织穿透深度提高到 4 mm 的同时还能保持 3~4  $\mu\text{m}$  的高分辨率,能较好地显示高度近视脉络膜-巩膜交界处;另外,李娟(2019)研发 OCTA,其运用运动校正算法克服了扫描深度的限制,实现了脉络膜毛细血管网的分层成像;再有,马晓玲等(2022)将增强深度成像(EDI-OCT)模式运用于高度近视后巩膜葡萄肿的定位诊断,通过调节参考臂的位置,获得脉络膜深层信号,利用增强深度成像方式能够解决高度近视后巩膜葡萄肿定位定量困难问题。此外,耳科领域中孟琦(2021)试验表明,改善频率域 OCT 穿透性的方法是在原有设计的基础上,对光学路径进行改进,从而提升中耳内结构的成像深度,以此对特定疾病产生有意义的影像学辅助结果。

#### 1.4.2. 屈光介质混浊的影响

屈光介质混浊对 OCT 成像质量的影响是目前高度近视判断的一个瓶颈问题,孟琦等(2021)通过耳科应用的研究发现传统耳镜只有在半透明鼓膜的状态下才能看到鼓室内的一些结构,在一定程度上可以类比于眼科中 OCT 受角膜水肿和白内障等屈光介质混浊等因素的干扰难以获取到清晰的视网膜回声[22];另外也有文献报道,正常人眼各层组织界面的回声强度一般会随着年龄的增长而增加等原因造成脑干 AAB 波的传导时间存在生理变异。耳科(2004)调查了 OCT 可以为角膜到脉络膜提供具有极高分辨率的图像,但由于其高精度的成像依然要依赖光在眼内介质中的穿透性,一旦高度近视并发玻璃体混浊,则由于散射干扰导致视网膜层间结构模糊。马给力等(2021)认为频域 OCT 在屈光介质透明度下降时,SNR 下降明显,QFM 测量下缘影响最大,折射指数误差  $\Delta n_m$  相差最小,MLC 退化的 Gr 表型相关良好。对于这一技术难题,唐仕波(2015)采用长波长(1050 nm)的光源替代短波长光源,可减小短波光在混浊介质中产生散射的影响;结合图像平均技术可一定程度克服角膜瘢痕或玻璃体出血导致的回信号衰减;李娟(2019)所研发的 OCTA 技术利用运动校正算法和多次扫描叠加的方法可使在玻璃体轻度混浊的状态下保留视网膜血管成像的质量;俞岚筑(2018)提出可先给重度屈光介质混浊者行超声检查,筛选出符合 OCT 检查条件的部位,再有针对性地对 OCT 可成像区做局部的高分辨率扫描;此外,沈婷梅(2007)提出的自适应光学 OCT 技术能够对像差实施动态补偿纠正,有效弥补由于屈光介质不均一导致的图像畸变问题,对于高度近视合并白内障的精准诊治提出了创新性的诊疗思路。

#### 1.4.3. 新型 OCTA 技术的补充作用

光学相干断层扫描血管成像(OCTA)作为 OCT 的一种新型应用,能够更好地补充高度近视的诊断[20]。李娟(2019)研究发现 OCTA 能以高速频扫描方式持续采集血流信号,并利用现代运算的方式获得 1  $\mu\text{m}$  视网膜血管 3D 图像,进而实现神经纤维层和内核层血管网的分层观察[21];俞岚筑等(2018) [19]整理出 OCTA 的优势就是以动态血流代替传统的 FFA 染料灌注来重建视网膜血管系统,从而做到不用破坏眼睛,就可见到视网膜血管系统 3D 视图;此外也可以用该方法对高度近视并伴有脉络膜新生血管者进行无创式跟踪;马晓玲等(2022) [25]表示, OCTA 可分辨脉络膜血管网(BVN)的特征性双层征象,通过分析息肉状病变的尖峰 PED 和超反射环可提供判断高度近视合并脉络膜血管异常的不同于经典的双期荧光素眼底血管造影的表现;舒娟等(2016) [40]经过 Barrett 食管研究得出利用 OCT 技术联机分子影像可以提高早期病变检出率的结论,这对高度近视视网膜微血管病变的早期识别具有借鉴意义。魏垦慧等(2023) [28]提



出使用 OCTA 可对黄斑区浅层及深层血管网密度量化检测, 并指出 OCTA 参数改变可反映神经退行性疾病的进展, 推测 OCTA 可能用于高度近视神经视网膜病变的检查。全超等(2023) [29]借助于多发性硬化研究, 发现了 OCTA 能进行视网膜血管指数的量化测定, 可为高度近视血管参数的标准化提供可行性。张骅等(2015) [37]通过对 OCT 与超声内镜分辨率对比发现 OCT 黏膜表层结构成像较后者有 10 倍优势, 因此 OCTA 更能准确定义高度近视视网膜血管的微细改变。李晨曦等(2017)虽是以口腔疾病为主的文献, 但对于 OCT 显示上皮微血管结构内容, 也可为 OCTA 应用于高度近视视网膜微循环的评估提供一定参考。

## 2. 简要评述

### 2.1. OCT 技术对高度近视早期诊断的革新价值

现阶段, OCT 已被认为是判定高度近视发展至 OPC 较早阶段的优良技术手段之一, OCT 的微米级分辨率能清晰测定 RNFL 的减薄程度, 且可测知黄斑区光感受器内外节的连接断离这种亚临床病变; OCT 还可利用三维重建技术帮助发现脉络膜新生血管; 此外, FDA 批准的频域 OCT、OCTA 的不断推陈出新为实现高度近视视网膜微血管和脉络膜毛细血管层的可视提供有利条件。但是, 目前也还存在着一些明显缺陷: 一方面, 在技术层面, 扫查深度受限无法对后巩膜葡萄肿深部结构成像; 另一方面, 如何处理由于眼前段混浊等因素引起的图像质量降低目前还是无法克服的难题。从目前来说, 还没有形成面向高度近视人群的专门的 OCT 诊断标准, 没有确定出正常的视网膜各层厚度变化范围以及视网膜各层厚度发生病理性的改变达到什么样的阈值就是病情本身发展的标尺, 也没有建立起 OCT 参数同高度近视发生发展相关性的纵向追踪研究, 与此同时, OCT 也不能搞清楚 OCT 参数和高度近视的发生发展速率之间是否存在直接的相关性以及到底是什么样的对应关系。可见, 眼科领域利用 OCT 进行高度近视的个体化诊疗还有很长的一段距离要走。另外, 现有的 OCTA 对于脉络膜大血管和小血管难以做出准确分辨, 进而使得对于高度近视眼患者的脉络膜血流动力学改变程度难以做出具体的评价。这些因素都是阻碍了 OCT 应用于高度近视个体化诊疗工作的主要因素。

### 2.2. 多模态影像融合诊断的发展趋势

多模态影像融合诊断成为高度近视诊疗的发展方向, 现有的基础研究表明 OCT 联合 FAF、广域成像、UBM 等技术对于提高诊断效果有较好的协同效应。将 OCT 的微结构解析能力与 FAF 的代谢活性评估结合起来, 可以更完整地评价高度近视视网膜色素上皮-脉络膜复合体的功能状态, OCT 和 UBM 的空间互补也解决了单独某一技术在后巩膜形态上的一些不足。但仍然面临众多难题: ① 多模态数据标准化配准算法未达成共识, 不同设备间图像融合精度受制于硬件的差别; ② 动态功能性影像(OCTA 血流参数)和静态结构性参数(脉络膜厚度等)二者之间的生物学相关性有待进一步阐明; ③ 多模态高度近视诊断指标体系尚未建立, 目前多数学者基于各疾病模式进行融合, 尚未提出对高度近视特定有效的诊断体系; ④ 目前多模态诊断跨模态人工智能分析平台还未能紧跟影像学技术的发展而更新完善。技术上会导致大量的海量异质化数据难以被整合和挖掘, 导致海量异质化数据难以获得相对精准的预测结果。部分跨中心研究显示各成像设备厂商的数据兼容性较差, 存在约 30%的病案由于标准化程度不高而不能进行精准配准。作为解决上述难题的有效途径之一, 应尽快出台标准化设备接口协议。对于未来的研究方向, 应当聚焦在建立一套服务于高度近视患者的多模态影像的生物标志物体系上, 以及运用解释性强的深度学习算法将不同数据源的影像信息融合, 并进行智能学习、病理特征提取。

### 2.3. 人工智能辅助 OCT 分析的临床应用前景

人工智能辅助 OCT 分析对高度近视的临床诊断应用已经显示出了不错的前景, 有研究发现目前深度

学习算法可以实现对视网膜各层间微结构异常的自动识别, 并可以对黄斑区神经上皮层厚度进行 90% 以上的准确度测量, 对于脉络膜新生血管的边界划分也可以实现 90% 以上的准确度, 极大提高了诊疗的准确性和重复性。然而由于高度近视本身具有异质性的特点, 小样本单中心数据集下的算法在对高度近视病人中重要信息的区分提取能力和推广程度方面还有所欠缺; 而基于深度学习的黑箱化决定过程容易造成临床决策出现失误, 在现阶段缺少可视化 AI, 无法为医学证据提供具体的解释方案; 目前相关技术还并未形成多模态的数据融合分析框架, 将不同 AI 算法的结构参数和功能影像进行关联的建模工作也在探索中。具体表现为: 首先, 现有的 AI 系统大多是围绕单一病变展开, 目前 AI 无法完成对高度近视全病程进展的预测; 其次, AI 系统的算法性能大多是通过回顾性数据的测试, 其效果未经过多次前瞻性临床验证研究; 最后, AI 相关伦理规范与数据安全标准及跨机构数据共享涉及隐私安全的问题尚无统一的标准。

## 参考文献

- [1] 张小雷, 田世河, 杨晓峰. 分子影像内镜研究新进展[J]. 中国医学工程, 2015, 23(4): 198-199.
- [2] 安高新. 这些眼科检查查什么? [J]. 江苏卫生保健, 2021(11): 26.
- [3] 马力, 李丽娜, 杨晓玲, 等. 眼科光学相干断层扫描仪质量控制参数的探讨[J]. 生物医学工程学进展, 2021, 42(4): 236-238.
- [4] 唐仕波, 樊华. 光学相干断层扫描在眼底疾病中的应用与进展[J]. 眼科新进展, 2015, 35(1): 1-4.
- [5] 马瑞彤, 鲁占军. 眼科影像学检查在早期诊断及治疗糖尿病视网膜病变中的作用价值[J]. 影像研究与医学应用, 2017, 1(12): 52-53.
- [6] 魏雁涛, 孙慧敏, 袁佳琴. 光学相干断层扫描在眼科的应用[J]. 天津医科大学学报, 2004(S1): 112-115.
- [7] 高瑞新, 卫玉彩. 光学相干断层扫描与多焦电生理在高度近视中的应用[J]. 河北医科大学学报, 2012, 33(3): 366-369.
- [8] 朱鲜阳, 肖家旺. 结构性心脏病相关性肺动脉高压的影像学诊断方法[J]. 心电与循环, 2014, 33(6): 449-453.
- [9] 余丹青, 周颖龄. 不稳定斑块诊断的影像学进展[J]. 岭南心血管病杂志, 2004(3): 217-221.
- [10] 何旭辑. 医疗新技术简介[J]. 解放军健康, 2009(5): 41.
- [11] 廖静芸, 程纪皓, 徐鹏. 冠状动脉斑块性质与弹性功能预测指标的新进展[J]. 微量元素与健康研究, 2019, 36(4): 75-76.
- [12] 阎志良, 马丽景, 谢欢, 等. 易损斑块早期诊断的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2012, 27(4): 60-62.
- [13] 张靖, 侯静波. 急性冠脉综合征斑块光学相干断层成像的相关研究[J]. 现代医学, 2016, 44(4): 590-592.
- [14] 郑刚. 在心脏介入治疗中冠状动脉腔内影像和功能检查技术的临床应用[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2015, 17(10): 1118-1120.
- [15] 李朝, 宋彦丽, 林杰, 等. 光学相干断层扫描技术在动脉粥样硬化斑块评估中的应用进展[J]. 中国卒中杂志, 2018, 13(8): 877-880.
- [16] 鲁静朝, 崔炜. 易破裂斑块的血管内检测[J]. 国外医学(心血管疾病分册), 2005(1): 28-31.
- [17] 王晓刚, 吴强. 光学相干断层扫描对视网膜疾病的诊断价值[J]. 眼科新进展, 2015, 35(1): 88-91.
- [18] 沈婷梅, 顾瑛. 光学相干断层成像(OCT)新技术及其在临床诊断中的应用[J]. 中国激光医学杂志, 2007(6): 379-382.
- [19] 俞岚筑, 沈玺. 光学相干断层扫描血管成像在眼部疾病诊断中的应用[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2018, 38(7): 829-834.
- [20] 李娟. 光相干断层扫描血管成像在糖尿病视网膜病变诊断中的应用研究进展[J]. 中国医疗器械信息, 2019, 25(17): 36-37.
- [21] 张弢, 陈韵岱. 光学相干断层扫描在药物洗脱支架临床研究中的应用[J]. 军医进修学院学报, 2012, 33(7): 799-801.
- [22] 孟琦, 张天虹. 光学相干断层扫描成像技术在中耳力学研究及疾病诊断中的应用[J]. 中华耳科学杂志, 2021, 19(3): 501-505.

- [23] 楼方磊, 胡美君. 光学相干断层扫描在高度近视黄斑病变中的应用研究[J]. 国际眼科杂志, 2018, 18(5): 937-940.
- [24] 俞慧燕, 邵彦. 老年性黄斑变性和息肉状脉络膜血管病变[J]. 中国实用眼科杂志, 2006(11): 1116-1120.
- [25] 马晓玲, 赵勇. 息肉状脉络膜血管病中西医研究进展[J]. 新疆中医药, 2022, 40(5): 128-132.
- [26] 郭从容, 马景学, 张斌, 等. rd10 小鼠视网膜组织结构和功能变化[J]. 河北医药, 2013, 35(11): 1635-1636.
- [27] 王玉. 视网膜下新生血管膜的诊断与治疗现状[J]. 山东大学基础医学院学报, 2004(2): 124-127.
- [28] 魏昱慧, 马涛. 帕金森病视觉损害特点研究进展[J]. 神经损伤与功能重建, 2023, 18(6): 349-352.
- [29] 全超, 吴家勇, 许勇峰, 等. 多发性硬化的规范化评估: 泛长三角多发性硬化诊疗协作组专家建议(2023) [J]. 中国临床神经科学, 2023, 31(3): 241-251.
- [30] 王益蓉. 光相干断层扫描在眼科应用进展[J]. 中国现代医生, 2008(16): 47-49+54.
- [31] 梁祝年, 蒙雪芳. 光学相干断层扫描在青光眼诊断应用中的研究概况[J]. 中国临床新医学, 2018, 11(6): 621-625.
- [32] 文美丹, 何文静, 曾思明. 光学相干断层扫描仪在青光眼早期诊断中的应用进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2014(11): 865-868+872.
- [33] 汪新, 魏伟. 弱视发病机制的多焦电生理及影像学研究现状[J]. 山东大学耳鼻喉眼学报, 2011, 25(1): 68-71.
- [34] 陈大复, 赵菊莲, 游志鹏. 视网膜中央静脉阻塞的研究进展[J]. 中国实用眼科杂志, 2005(11): 10-12.
- [35] 李莉. 球后注射曲安奈德联合激光光凝治疗糖尿病性黄斑水肿的临床疗效[J]. 中国现代药物应用, 2013, 7(18): 136-137.
- [36] 刘玉平, 王应利. 非动脉炎性前部缺血性视神经病变诊疗策略及其脉络膜厚度[J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(9): 3655-3661.
- [37] 张骅, 张民. 大肠癌内镜诊断的研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2015, 35(3): 852-855.
- [38] 乐士冠, 肖健, 奚望, 等. 冠状动脉旁路移植术后静脉桥血管再狭窄的机制研究进展[J]. 第二军医大学学报, 2017, 38(5): 639-645.
- [39] 李晨曦. 无创筛查技术早期诊断口腔潜在恶性病患癌变的研究进展[J]. 临床口腔医学杂志, 2017, 33(6): 381-383.
- [40] 舒娟, 刘海峰. 内镜分子影像技术诊断 Barrett 食管及其相关性肿瘤的研究进展[J]. 武警医学, 2016, 27(4): 407-410.