

高度近视眼的结构与功能检查研究进展

黄周懿^{1,2}, 秦波^{2*}

¹暨南大学第二临床医学院, 广东 深圳

²暨南大学附属爱尔眼科医院(深圳), 广东 深圳

收稿日期: 2026年5月9日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月9日

摘要

高度近视(≥ -6.00 D)是致中青年视力残疾的主要眼病,其病理核心为眼轴过度延长导致视网膜、脉络膜、巩膜及视盘的结构重塑,并可继发黄斑劈裂、脉络膜新生血管等严重并发症。传统检查难以捕捉早期微观病变及隐匿性功能损伤。本文综述结构及功能检查进展:OCT与OCTA实现了视网膜、脉络膜微结构与微循环的精准量化;超广角成像、多模态影像及偏振敏感OCT等新技术拓展了评估维度。功能检查方面,微视野计及多焦视网膜电图可敏感检测早期视功能损伤。结构与功能相关性研究揭示黄斑血管密度与光敏感度定量关系。人工智能在自动化筛查、病变分级及定量分析中展现高准确率。未来应聚焦多模态数据融合、个性化预警模型及结构-功能定量映射体系的建立。

关键词

高度近视, OCT, 微视野计, 多焦视网膜电图, 人工智能

Research Progress on Structural and Functional Examinations of High Myopia

Zhouyi Huang^{1,2}, Bo Qin^{2*}

¹The 2nd Clinical Medical College of Jinan University, Shenzhen Guangdong

²The Shenzhen Ai'er Eye Hospital Affiliated to Jinan University, Shenzhen Guangdong

Received: May 9, 2026; accepted: June 3, 2026; published: June 9, 2026

Abstract

High myopia (≥ -6.00 D) is a major cause of visual disability in young and middle-aged adults. Its pathological core involves excessive axial elongation leading to structural remodeling of the retina,

*通讯作者。

choroid, sclera, and optic disc, which may be complicated by severe conditions such as macular schisis and choroidal neovascularization. Conventional examinations are insufficient to detect early microstructural lesions and occult functional impairment. This article reviews advances in structural and functional assessments: OCT and OCTA enable precise quantification of retinal and choroidal microarchitecture and microcirculation; emerging technologies such as ultra-widefield imaging, multimodal imaging, and polarization-sensitive OCT expand the evaluation dimensions. Regarding functional assessments, microperimetry and multifocal electroretinography can sensitively detect early visual function impairment. Studies on structure-function correlations have revealed quantitative relationships between macular vessel density and light sensitivity. Artificial intelligence demonstrates high accuracy in automated screening, lesion grading, and quantitative analysis. Future efforts should focus on multimodal data integration, personalized risk prediction models, and the establishment of structure-function quantitative mapping systems.

Keywords

High Myopia, OCT, Microperimetry, Multifocal Electroretinography, Artificial Intelligence

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. 引言

高度近视(High myopia, HM)通常定义为等效球镜度 ≥ -6.00 D, 根据病理特征可分为单纯性高度近视与病理性高度近视两大类, 其中病理性高度近视伴随眼球进行性扩张、眼轴异常延长, 是导致中青年人群视力残疾的首要眼科疾病之一。随着全球近视患病率持续攀升, 我国高度近视人群占比逐年升高, 呈现年轻化、高发化趋势[1], 已成为重要的公共卫生问题。高度近视的核心病理改变为眼轴过度增长引发的眼球各层组织被动拉伸重塑, 进而导致视网膜变薄、脉络膜萎缩、巩膜重塑、视神经盘改变等结构性损伤, 继发黄斑劈裂、黄斑裂孔、视网膜脱离、脉络膜新生血管等严重并发症[2], 当出现这些特征性改变时, 则进入病理性近视(Pathologic myopia, PM)阶段。

既往临床对高度近视的评估多依赖裸眼视力、裂隙灯检查、常规眼底镜检查等基础手段, 仅能实现宏观形态的初步筛查, 难以捕捉早期微观结构病变及隐匿性视功能损伤, 进一步增加了早期识别和精准干预的难度。本文结合国内外最新研究成果, 系统综述高度近视结构与功能检查技术的研究进展、临床应用现状及未来发展方向, 为临床精准诊疗、病情动态监测及并发症防控提供参考。

2. 高度近视眼病理结构改变特征

高度近视的眼部损伤以眼轴进行性延长为始动因素, 引发眼球后极部渐进性扩张, 促使视网膜、脉络膜、巩膜、视神经等组织发生一系列特征性病理重塑, 其结构改变是视功能损伤及并发症发生的解剖基础。明确其结构病变特征, 是精准选择检查手段、解读检查结果的前提。

2.1. 眼轴与巩膜结构改变

眼轴的过度延长是高度近视最核心的结构改变。巩膜作为眼球最外层结缔组织, 在眼轴延长过程中发生了显著的细胞外基质重塑, 主要表现为胶原蛋白合成减少与降解加速的动态失衡[3]。动物实验证实, 高度近视眼后部巩膜胶原原纤维排列疏松、纤维直径变小、胶原含量降低[4]。在分子层面, MMP-2 通路

的过度激活加剧了胶原降解, 而缺氧诱导因子(HIF-1 α 和 HIF-2 α)信号通路以及 Wnt 信号通路的异常调控则介导了巩膜成纤维细胞的功能紊乱[5]。这些巩膜结构与生物力学的异常, 是病理性高度近视的特征性结构改变。研究证实, 巩膜厚度与眼轴长度呈负相关, 后极部巩膜变薄程度直接关联近视病变严重程度, 是评估病情进展的重要结构指标。

2.2. 视网膜结构改变

眼球扩张过程中, 视网膜组织被动拉伸、变薄, 各层结构出现分层损伤。视网膜神经纤维层、神经节细胞层、内丛状层厚度进行性降低, 以视盘周围、黄斑颞侧区域损伤最为显著[6]。外层视网膜光感受器细胞排列紊乱、密度降低, 外节缩短, 严重者出现细胞凋亡及局部缺损。同时, 视网膜粘连张力异常增高, 易引发黄斑劈裂, 其发生率约 11.9%, 可进展为板层或全层黄斑裂孔, 晚期可出现视网膜脱离[7] [8]。高度近视视网膜病变早期无明显肉眼可见形态异常, 微观层厚度改变是最早的病理信号。

2.3. 脉络膜结构改变

脉络膜厚度与眼轴长度呈显著负相关。高度近视患者脉络膜随眼球扩张被动拉伸, 出现脉络膜变薄、血管稀疏、色素萎缩等改变[9]。中国人群研究显示, 高度近视黄斑中心凹下脉络膜厚度均值仅 $110.6 \pm 85.2 \mu\text{m}$, 眼轴每增加 1 mm 厚度减少 $22.6 \mu\text{m}$ (95% CI: 18.3~26.9 μm) [10]。OCTA 发现脉络膜毛细血管层血流密度显著降低, Sattler 层和 Haller 层血管重构以黄斑旁颞侧最为明显[11]。病理性近视脉络膜新生血管发病率约 5%~11% [12], 是致中心视力丧失的主因。

2.4. 视盘结构改变

眼轴延长使视盘发生显著重塑。高度近视眼视盘倾斜、旋转及 β 区盘周萎缩发生率分别达 81.2%、48.3%和 92.8% [13]。Bruch 膜开口扩大导致 γ 区形成, 筛板显著变薄延长形成“继发性大视盘” [14]。高度近视视盘多呈竖椭圆形或斜椭圆形, 伴随视盘周围脉络膜萎缩弧扩大、筛板结构重塑。视神经纤维受压、牵拉损伤, 导致视神经渐进性萎缩, 是高度近视继发性视神经病变、视野缺损的核心原因。一日本人群横断面研究发现, 当 γ 区长度超过 $763 \mu\text{m}$ 时, 中央视野缺损风险显著升高(OR = 3.42, 95% CI: 1.87~6.25, $P < 0.001$) [15]。因此, 精准定量评估视盘生物力学对鉴别诊断至关重要。

3. 高度近视眼结构检查研究进展

高度近视的结构改变涉及从眼前段到后极部的全眼范围, 其检查技术的发展经历了从二维平面成像到三维立体定量分析、从形态学到功能整合的演进过程。OCT 与 OCTA 技术的突破更是将高度近视的微观结构评估推向了一个全新的层次。

3.1. 眼底彩色照相与间接检眼镜检查

标准眼底彩照可记录豹纹状眼底、漆裂纹等后极部改变, 但约 21.2%的后巩膜葡萄肿边缘位于 50° 视野之外, 存在漏诊风险[16]。超广角眼底成像研究显示, 眼轴 $\geq 30 \text{ mm}$ 的病理性近视眼中, 周边非压迫变白(48.08% vs 28.79%)、格子样变性(30.77% vs 10.61%)及视网膜裂孔、脱离(21.15% vs 7.58%)发生率均显著升高, 超过 80%的患眼可检出至少一处周边异常[17]。散瞳下双目间接检眼镜仍是筛查周边病变的金标准, 但操作耗时且依赖经验。印度一项研究显示, 53%的近视眼存在周边视网膜变性, 且发生率与眼轴增长相关[18]。然而, 二者分辨率有限, 无法识别视网膜分层变薄、微小劈裂、早期脉络膜血流异常等微观病变, 对早期病理性高度近视的筛查敏感度较低。

3.2. 光学相干断层扫描检查

光学相干断层扫描检查(OCT)以微米级分辨率实现视网膜和脉络膜结构的活体断层成像,无创获取视网膜、脉络膜、视盘的分层结构图像,精准量化各层组织厚度、形态完整性,已成为高度近视结构评估的核心技术。从初代时域 OCT 发展至如今的频域 OCT (SD-OCT, 中心波长约 840 nm)、扫频 OCT (SS-OCT, 中心波长约 1050 nm 或 1060 nm), 成像速度、分辨率、穿透深度大幅提升。SD-OCT 适用于视网膜分层厚度的精确测量,但其 840 nm 波长在脉络膜穿透方面受限,对重度脉络膜萎缩或巩膜轮廓的成像信噪比较低。SS-OCT 凭借更长波长、更强穿透性,具有两大核心优势:其一,减少组织中血红蛋白和水分的散射与吸收,使脉络膜及巩膜的穿透深度增加至 2~3 mm (较 SD-OCT 提高约 50%),可直接量化后巩膜葡萄肿的形态和范围[19];其二,更高的扫描速度(100 kHz~1 MHz vs SD-OCT 的 20~70 kHz)可在更短时间内完成大范围三维成像,减少运动伪影[20]。然而,SS-OCT 的轴向分辨率通常略逊于 SD-OCT (约 5~7 μm vs 3~5 μm),且设备成本较高,在临床推广中需权衡分辨率与穿透深度的需求。

在牵引性黄斑病变的评估中,超广角 SS-OCT 能在黄斑区外捕捉到血管旁微皱襞、囊肿等异常[21]。在定量评估方面,脉络膜厚度呈渐进性变薄。欧洲一项大样本纵向研究显示,脉络膜变薄速率最快,达 3.1 $\mu\text{m}/\text{年}$ (95% CI: 2.5~3.7),且基线脉络膜厚度小于 40 μm 是黄斑萎缩发生的独立危险因素(OR 3.84, 95% CI: 2.13~6.92, $P < 0.001$) [22]。Arias Aristizábal 等利用 SS-OCT 结合 3D 广角成像对病理性近视后巩膜葡萄肿进行分类,发现宽大黄斑型(I型)最为常见(占 22.0%),而鼻侧和下方型较为罕见[19]。

OCT 在特殊结构形态的识别方面也取得了重要进展。穹顶样黄斑(DSM)是一种以黄斑区内向凸起为特征的特殊解剖结构,最初在高度近视伴后巩膜葡萄肿的眼中被描述,但现已确认其可发生于包括轻度近视甚至正视眼的更广泛屈光状态中[23]。DSM 在高度近视眼中患病率达 10%~20%。偏振敏感 OCT 的最新研究揭示了巩膜纤维架构的新见解,显示水平走向的视盘间黄斑纤维与典型的水平方向 DSM 构型相对应[24]。DSM 在病理性近视并发症中扮演着双重角色:一项回顾性研究发现,穹顶高度 $< 300 \mu\text{m}$ 时,中心凹视网膜劈裂的发生率显著降低(HR = 0.42, 95% CI: 0.21~0.84),提示一定程度的凸起可缓解玻璃体黄斑牵引,当穹顶高度 $\geq 400 \mu\text{m}$ 时,浆液性视网膜脱离和 RPE 萎缩的风险分别增加 3.2 倍和 2.7 倍[25]。

3.3. 光学相干断层扫描血管成像检查

光学相干断层扫描血管成像(OCTA)作为一种新兴的无创检查手段,可以高效地获得视网膜和脉络膜的微血管分层图像,并对血流信号进行量化分析。在高度近视患者中, OCTA 可检测视网膜脉络膜厚度及血流变化,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(FAZ)面积等参数的相关性[26]。

儿童高度近视表现为: FAZ 面积缩小或形态改变,眼轴是主因;浅层毛细血管丛(SCP)密度随眼轴延长而下降,以旁中心凹显著;深层毛细血管丛(DCP)对眼轴最敏感,在旁中心凹和中心凹周区域密度降低,提示早期损害;视盘旁放射状毛细血管密度降低,与神经纤维层变薄相关[27]。全视野扫频 OCTA (724 只眼)显示,高度近视组除鼻上网格外,其余 8 个网格脉络膜血管厚度均显著降低,且厚度及密度与眼轴长度呈负相关[28]。

青少年 SS-OCTA 研究提出“代谢需求 - 血管代偿”理论:中心凹光感受器高氧耗,脉络膜大血管层通过密度增加代偿变薄所致的灌注不足(可能由 VEGF 介导)。近视性脉络膜病变呈“双相演变”,早期以视网膜微循环降低为主,后期为中心凹下大血管代偿性增生[29]。

3.4. 多模态影像与前沿技术

单一影像技术难以全面反映高度近视的复杂病理改变,多模态影像融合已成为发展趋势。研究者利

用 OCT、超声、MRI 等多模态影像学技术研究病理性近视巩膜结构变化, 结合巩膜生物力学检测手段有助于及早发现巩膜“薄弱点” [20]。

在视网膜曲率测量方面, 全眼光学相干断层扫描(WE-OCT)结合瞳孔追踪技术可精确测量视网膜曲率。对高度近视者的视网膜分析显示, 其视网膜在中心凹处呈扁平化, 而在某些区域曲率更为陡峭[30]。

偏振敏感 OCT (PS-OCT)技术的最新突破, 三偏振态调制偏振敏感 OCT (TRIPS-OCT), 在探测灵敏度和测量精度上实现了显著提升, 可针对胶原纤维排列与结构进行更加精细的量化与成像分析, 为进展性近视的早期识别提供了新型影像标志物[20]。

4. 高度近视眼功能检查研究进展

高度近视患者视网膜结构和微循环的异常最终会反映在视功能的下降上。单纯依靠视力表测定的最佳矫正视力往往难以捕捉早期的功能损伤, 因此需要敏感度更高的功能检查手段。结构检查主要揭示形态学改变, 而功能检查则评估视网膜神经通路的活动状态, 二者互为补充, 共同构建完整的临床评估体系。

4.1. 传统功能评估方法

最佳矫正视力是最基础的功能评估指标。研究表明, 轴向长度越长、ATN 分级越高、年龄越大, 最佳矫正视力越差, 说明视力水平与视网膜功能及结构改变密切相关。对比敏感度检查可评估不同空间频率下的视觉分辨能力, 对早期视功能损伤的检测灵敏度高于视力检查[31]。

视野检查通过评估视网膜不同区域的光敏感度来反映视神经和视网膜的功能状态。然而, 标准 24-2 视野测试在高度近视中的应用存在局限性, 由于中央视野缺损可能被低估, 且高度近视常伴随的非典型视野表现使得鉴别近视性视神经病变与青光眼性视神经病变变得困难[32]。

4.2. 微视野计检查

微视野计将视野检测与实时视网膜成像相结合, 可精确评估以黄斑为中心区域的光敏感度, 是目前评估黄斑功能的重要工具。研究表明, OCTA 联合微视野计对研究高度近视及其他屈光度近视患者的视网膜形态及功能变化具有重要价值, 深层血管密度以及微视野计检查中的视网膜敏感度和黄斑整合程度可用于检测不同度数近视患者的视网膜形态及功能变化[33]。

在高度近视偏心固视的研究中, 应用微视野计对因黄斑病变形成为偏心固视的患者进行固视检查, 揭示了偏心注视点的分布规律。微视野计还可用于评估黄斑光敏感度与 OCTA 测量的血管密度之间的关系。研究发现, 黄斑血管密度随近视严重程度增加而下降, 且深层血管密度与黄斑光敏感度呈正相关, 尤其在超高度近视中表现更为明显[33]。

4.3. 多焦视网膜电图

mfERG 通过记录视网膜不同区域对光刺激的电生理反应来评估黄斑区功能状态, 其评估指标包括反应振幅和潜伏期。与全视野视网膜电图不同, mfERG 可以同时获取视网膜多个局部的电生理反应, 具有极佳的空间定位能力。

针对高度近视患者的研究显示, mfERG 和微视野计在病理性近视患者中的结果均显著低于正常范围。在不同轴向长度、ATN 分级和年龄组之间, 光敏感度和最佳矫正视力存在显著差异($P < 0.05$)。在振幅密度方面, Ring3 和 Ring4 在不同轴向长度组间存在显著差异($P < 0.05$), 而 Rings 1~5 在不同 ATN 分级和年龄组间均存在显著差异($P < 0.05$) [34]。这一发现为临床中制定个体化的功能监测方案提供了重要参考。

4.4. 结构与功能的相关性研究

结构与功能的相关性研究是当前高度近视领域的热点之一。研究者正在尝试建立 OCT/OCTA 结构参数与功能参数之间的定量关系, 以期通过结构改变预测功能预后。

超高度近视患者的黄斑浅层血管密度、深层血管密度和黄斑光敏感度均显著低于轻中度近视患者。深层血管密度与黄斑光敏感度呈正相关, 尤其是在超高度近视组和整体队列中表现明显; 浅层血管密度的相关性则较为有限, 主要集中于上方和颞侧象限[33]。多因素回归分析进一步证实, 深层血管密度与等效球镜度数和眼轴长度一样, 是黄斑光敏感度的独立预测因子。这表明 OCTA 测量的黄斑血管密度可作为检测和监测近视眼视网膜功能损伤的潜在生物标志物[33]。

5. 人工智能的应用、挑战与转化路径

基于深度学习的人工智能模型在高度近视的自动化筛查、精确诊断、病变分级及定量分析中展现出卓越性能, 正从实验研究迈向临床转化。然而, 要真正实现 AI 在临床实践中的可靠应用, 必须正视并解决其在模型构建、验证与转化过程中面临的一系列具体挑战。

5.1. AI 模型构建中的关键挑战与对策

5.1.1. 数据层面挑战

不同厂商的 OCT、眼底相机等设备成像原理、分辨率、信噪比存在差异, 导致数据分布不同。此外, 高度近视相关的眼底病变(如弥漫性萎缩、斑片状萎缩、黄斑劈裂等)分级标准存在主观性, 不同标注者间的一致性有限[35]。因此建立多中心、多设备、标准化采集的公开数据库; 采用迁移学习和域自适应技术减少设备差异[36]; 制定并推广基于量化指标的 AI 标注专家共识。对于临床上轻中度近视远多于病理性高度近视, 而后者又是并发症的高危人群。直接训练会导致模型对罕见但严重的病变识别能力差, 而且像素级或体素级的精细标注(如 OCT 各层边界、脉络膜新生血管范围)需要资深眼科医生投入大量时间, 那么可以采用过采样、合成少数类过采样技术、代价敏感学习或生成对抗网络生成高质量的病理性高度近视样本[37], 探索弱监督学习、自监督学习或半监督学习框架, 利用少量精细标注 + 大量弱标签(如图像级标签)进行训练。

5.1.2. 模型设计层面挑战

深度学习模型常被视为“黑箱”, 医生难以理解其决策依据, 降低了临床信任度, 那么使用集成可解释性方法(如 Grad-CAM 生成热力图, 显示模型关注的区域; 使用 LIME 或 SHAP 分析特征重要性), 并在输出结果时同时提供可视化的解释报告[38], 由此解决这一问题。接着, OCT 是三维容积数据, 而多数模型将其处理为二维切片, 丢失了空间上下文信息, 对此设计 3D 卷积神经网络或基于 Vision Transformer 的 3D 模型, 或采用先分割关键解剖结构(如 Bruch 膜、RPE、脉络膜-巩膜界面)再进行特征提取的两阶段策略。

5.2. 从验证到临床转化: 瓶颈与路径

尽管大量研究报道了 AI 模型在回顾性数据集上取得高准确率(如 94.65%的病变判别准确率[39]、83.1%的球镜度分类准确率[40]), 但从研究到常规临床应用仍面临诸多瓶颈。

首先, 外部泛化能力验证不足。多数模型仅在单个或少数几个中心的数据上验证, 未在真实世界、多中心、不同种族人群、不同疾病谱的独立外部队列中进行严格测试, 存在过拟合风险[41]。其次, 临床 workflow 整合困难。AI 模型需无缝嵌入医院信息系统(HIS)和影像归档与通信系统(PACS), 并满足实时性要求(如门诊医生开单后数秒内返回结果)。目前尚缺乏标准化接口和临床决策支持系统集成方案[42]。最后,

人机交互与医生接受度。医生需要理解 AI 输出的置信度、不确定性, 并学会将 AI 建议作为参考而非替代自身判断。过度依赖或无视 AI 都可能导致错误。

为此, 应鼓励开展前瞻性、多中心、外部验证研究, 并公开发布验证协议和结果。对策在于开发轻量化、可部署于本地服务器或边缘设备的模型, 并与 PACS/HIS 厂商合作制定 AI 结果交互标准。解决路径包括设计以人为本的 AI 交互界面, 提供不确定性量化(如预测概率区间), 并通过继续教育提升医生对 AI 辅助工具的认知。

6. 总结与展望

6.1. 检查技术在治疗监测中的应用

结构功能检查在治疗效果评估和个体化管理中具有核心价值。后巩膜加固术监测: 术前及术后定期采用 SS-OCT 测量脉络膜及巩膜厚度、后巩膜葡萄肿形态; 全眼 OCT 量化眼轴增速; OCTA 评估脉络膜血流改善; 微视野计评估黄斑光敏感度; mfERG 监测局部电生理恢复。CNV 抗 VEGF 治疗监测: OCTA 定量评估 CNV 面积、血流及 FAZ 变化, 区分活动性/纤维化; SD-OCT 指导再治疗; 微视野计建立解剖-功能映射, 判断感光细胞功能挽救。黄斑劈裂/裂孔手术监测: SS-OCT 显示玻璃体黄斑界面及术后重塑; OCTA 评估深层毛细血管损伤; mfERG 监测功能恢复时序; 微视野计定位旁中心固视靶点。屈光手术前评估: 术前 OCT/OCTA/微视野计联合评估黄斑状态, 预警隐匿性病变, 规避术后风险; 术后定期复查监测自然进展。

6.2. 未来具体、可操作的研究问题

为推动精准医学发展, 需聚焦以下问题: 第一, 结构-功能定量映射模型。建立基于 OCT 和 OCTA 参数的数学模型, 个体化预测微视野计光敏感度及未来 1~3 年功能下降速率。第二, 治疗阈值与决策树。定义具体参数阈值指导治疗, 如脉络膜厚度及年变薄率阈值用于后巩膜加固术决策; CNV 血流面积或光敏感度下降阈值作为抗 VEGF 再治疗强制指标。第三, AI 驱动的个体化预警系统。整合多模态数据与时序模型(LSTM/Transformer), 输出未来 6 个月并发症发生概率及干预建议。最后, 多中心前瞻性验证。在至少 3 个不同级别医院验证模型泛化能力。

参考文献

- [1] 井云, 李清波, 吴仲英. 《高度近视防控专家共识(2023)》解读(上)[J]. 中国眼镜科技杂志, 2023(11): 108-111.
- [2] Wang, Y.H. and Qiao, L.Y. (2015) Analysis of the Treatment Effect of Posterior Scleral Reinforcement on Pathological Myopia. *Chinese Journal of Ophthalmology*, **57**, 952-957. (In Chinese)
- [3] 杨静, 颜华, 王清, 等. 近视巩膜组织重塑与相关基因研究进展[J]. 国际眼科杂志, 2024, 24(8): 1270-1274.
- [4] 王聪聪, 谢永芳, 王国辉. 实验性高度近视眼巩膜胶原及弹性模量的变化[J]. 医用生物力学, 2018, 33(2): 157-162.
- [5] Yin, X. and Ge, J. (2025) The Role of Scleral Changes in the Progression of Myopia: A Review and Future Directions. *Clinical Ophthalmology*, **19**, 1699-1707. <https://doi.org/10.2147/oph.s523283>
- [6] Wood, J.P.M., Shibebe, O., Plunkett, M., Casson, R.J. and Chidlow, G. (2013) Retinal Damage Profiles and Neuronal Effects of Laser Treatment: Comparison of a Conventional Photocoagulator and a Novel 3-Nanosecond Pulse Laser. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **54**, 2305-2318. <https://doi.org/10.1167/iovs.12-11203>
- [7] Li, G., Wang, Y. and Chen, X. (2026) Clinical Spectrum and Prevalence Associations of Chorioretinal Damage in High Myopia: A Retrospective Cross-Sectional Analysis. *Frontiers in Medicine*, **13**, Article 1752116. <https://doi.org/10.3389/fmed.2026.1752116>
- [8] Shimada, N., Tanaka, Y., Tokoro, T. and Ohno-Matsui, K. (2013) Natural Course of Myopic Traction Maculopathy and Factors Associated with Progression or Resolution. *American Journal of Ophthalmology*, **156**, 948-957.e1. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2013.06.031>

- [9] Fujiwara, T., Imamura, Y., Margolis, R., Slakter, J.S. and Spaide, R.F. (2009) Enhanced Depth Imaging Optical Coherence Tomography of the Choroid in Highly Myopic Eyes. *American Journal of Ophthalmology*, **148**, 445-450. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2009.04.029>
- [10] Shao, L., Zhao, H., Zhang, R., Zhou, W. and Wei, W.B. (2025) Distribution and Associated Factors of Choroidal Thickness in Highly Myopic Eyes—A Real-World Study Based on a Chinese Population. *Eye*, **39**, 102-108. <https://doi.org/10.1038/s41433-024-03383-9>
- [11] Wang, Q., He, L., Li, S., Liu, H. and Liu, Y. (2025) Evaluating Choroidal Vascular Changes in Young Adults with High Myopia Utilizing Swept Source Optical Coherence Tomography Angiography. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **51**, 104475. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2025.104475>
- [12] Wong, T.Y., Ferreira, A., Hughes, R., Carter, G. and Mitchell, P. (2014) Epidemiology and Disease Burden of Pathologic Myopia and Myopic Choroidal Neovascularization: An Evidence-Based Systematic Review. *American Journal of Ophthalmology*, **157**, 9-25.e12. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2013.08.010>
- [13] Li, Z., Guo, X., Xiao, O., Lee, P.Y., Liu, R., Wang, D., et al. (2018) Optic Disc Features in Highly Myopic Eyes: The ZOC-BHVI High Myopia Cohort Study. *Optometry and Vision Science*, **95**, 318-322. <https://doi.org/10.1097/oxp.0000000000001200>
- [14] Jonas, J.B., Jonas, R.A. and Panda-Jonas, S. (2025) Clinical and Histological Aspects of the Anatomy of Myopia, Myopic Macular Degeneration and Myopia-Associated Optic Neuropathy. *Progress in Retinal and Eye Research*, **109**, Article ID: 101402. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2025.101402>
- [15] Zhou, N., Yoshida, T., Sugisawa, K., Yoshimoto, S. and Ohno-Matsui, K. (2025) Interplay between γ -Zone Peripapillary Atrophy and Optic Disc Parameters in Central Visual Field Impairment in Highly Myopic Eyes. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **66**, Article 74. <https://doi.org/10.1167/iovs.66.6.74>
- [16] Oh, B., Park, U.C., Kim, B.H., Lee, E.K., Yoon, C.K., Choe, H.R., et al. (2021) Role of Ultra-Widefield Imaging in the Evaluation of Long-Term Change of Highly Myopic Fundus. *Acta Ophthalmologica*, **100**, e977-e985. <https://doi.org/10.1111/aos.15009>
- [17] 茹月, 师燕芸, 董京艳, 等. 超广角眼底成像技术在变性近视周边视网膜形态改变中的应用[J]. 中华眼外伤职业眼病杂志, 2022, 44(12): 895-902.
- [18] Khatwani, N., Makhija, S. and Ahuja, A. (2022) Clinical Profile and Distribution of Peripheral Retinal Changes in Myopic Population in a Hospital-Based Study in North India. *Indian Journal of Ophthalmology*, **70**, 1280-1285. https://doi.org/10.4103/ijo.ijo_946_21
- [19] Arias Aristizábal, J.D., Cordoba-Ortega, C.M., Gómez Velasco, M.A. and Barahona Campos, J.M. (2025) Classification of Posterior Staphyloma in Pathologic Myopia Using 3D Wide-Field Fundus Imaging. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología (English Edition)*, **100**, 458-465. <https://doi.org/10.1016/j.oftale.2025.07.001>
- [20] Ang, M., Wong, C.W., Hoang, Q.V., Cheung, G.C.M., Lee, S.Y., Chia, A., et al. (2019) Imaging in Myopia: Potential Biomarkers, Current Challenges and Future Developments. *British Journal of Ophthalmology*, **103**, 855-862. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2018-312866>
- [21] 安广琪, 张敏, 刘培, 等. 病理性近视性血管旁异常和黄斑劈裂的影像学特征及其与临床特征的相关性[J]. 中华眼底病杂志, 2025, 41(2): 98-105.
- [22] Carlà, M.M., Boselli, F., Giannuzzi, F., Crincoli, E., Catania, F., Perugini, A.M., et al. (2026) Longitudinal Changes in Choroidal Thickness in High Myopia: Correlation with Maculopathy Progression and Visual Outcomes. *Acta Ophthalmologica*, **104**, 448-458. <https://doi.org/10.1111/aos.70034>
- [23] Carlà, M.M., Philippakis, E., Gaucher, D., Couturier, A. and Gaudric, A. (2026) Current Advances in Dome-Shaped Macula and Associated Conditions. *Survey of Ophthalmology*, **71**, 393-404. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2025.09.004>
- [24] Ohno-Matsui, K., Igarashi-Yokoi, T., Azuma, T., Sugisawa, K., Xiong, J., Takahashi, T., et al. (2024) Polarization-Sensitive OCT Imaging of Scleral Abnormalities in Eyes with High Myopia and Dome-Shaped Macula. *JAMA Ophthalmology*, **142**, 310-319. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2024.0002>
- [25] Soudier, G., Gaudric, A., Gualino, V., Massin, P., Nardin, M., Tadayoni, R., et al. (2016) Long-Term Evolution of Dome-Shaped Macula: Increased Macular Bulge is Associated with Extended Macular Atrophy. *Retina*, **36**, 944-952. <https://doi.org/10.1097/iae.0000000000000806>
- [26] 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[J]. 国际眼科杂志. 2023, 23(4): 597-601.
- [27] Li, Y., Fei, J., Ma, P., Ma, L. and Li, F. (2026) Optical Coherence Tomography Angiography in Pediatric Myopia: Effects of Myopia Severity on Retinal and Choroidal Thickness and Microvascular Perfusion. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **59**, Article ID: 105485. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2026.105485>

- [28] Tang, X., Liang, J., Luo, L., Yuan, F., Zhao, K., Zhuo, X., *et al.* (2024) Investigation of Choroidal Vascular Alterations in Eyes with Myopia Using Ultrawidefield Optical Coherence Tomography Angiography. *BMJ Open Ophthalmology*, **9**, e001839. <https://doi.org/10.1136/bmjophth-2024-001839>
- [29] He, L., Wang, Q., Li, Z., Song, L., Liu, B. and Yang, Y. (2025) Exploration of Choroidal Vascular Changes in Juveniles with Different Degrees of Myopia: The Application of Swept-Source Optical Coherence Tomography Angiography. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **54**, Article ID: 104674. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2025.104674>
- [30] McNabb, R.P., Polans, J., Keller, B., Jackson-Atogi, M., James, C.L., Vann, R.R., *et al.* (2018) Wide-Field Whole Eye OCT System with Demonstration of Quantitative Retinal Curvature Estimation. *Biomedical Optics Express*, **10**, 338-355. <https://doi.org/10.1364/boe.10.000338>
- [31] Adhikari, P., Zele, A.J. and Feigl, B. (2025) Rapid Clinical Assessment of Spatial Contrast Sensitivity Changes in Retinal Disease and Ageing. *British Journal of Ophthalmology*, **109**, 1088-1090. <https://doi.org/10.1136/bjo-2024-326490>
- [32] Akada, M., Numa, S. and Tsujikawa, A. (2026) Myopic and Glaucomatous Optic Neuropathy in Highly Myopic Eyes: A Practical Framework for Diagnosis, Monitoring, and Management. *Journal of Clinical Medicine*, **15**, Article 2491. <https://doi.org/10.3390/jcm15072491>
- [33] Chen, Q., Liu, J., Yan, W., Meng, Q., Chen, X., Zeng, Z., *et al.* (2025) Subclinical Microvascular Deficits as a Promising Biomarker for Functional Impairment in Non-Pathological High Myopia: A Cross-Sectional Study. *Clinical Ophthalmology*, **19**, 4505-4523. <https://doi.org/10.2147/ophth.s563107>
- [34] Yin, X., Shi, P. and Ge, J. (2025) Analysis of Clinical Characteristics of Multifocal Electroretinogram and Microperimetry in Patients with High Myopia. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **56**, Article ID: 105237. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2025.105237>
- [35] Du, K., Shah, S., Bollepalli, S.C., Ibrahim, M.N., Gadari, A., Sutharahan, S., *et al.* (2024) Inter-Rater Reliability in Labeling Quality and Pathological Features of Retinal OCT Scans: A Customized Annotation Software Approach. *PLOS ONE*, **19**, e0314707. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314707>
- [36] Wu, M., Chen, W., Chen, Q. and Park, H. (2021) Noise Reduction for SD-OCT Using a Structure-Preserving Domain Transfer Approach. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, **25**, 3460-3472. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2021.3071421>
- [37] Chłopowiec, A.R., Karanowski, K., Skrzypczak, T., Grzesiuk, M., Chłopowiec, A.B. and Tabakov, M. (2023) Counteracting Data Bias and Class Imbalance—Towards a Useful and Reliable Retinal Disease Recognition System. *Diagnostics*, **13**, Article 1904. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13111904>
- [38] Bhati, D., Neha, F. and Amiruzzaman, M. (2024) A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI) Techniques for Visualizing Deep Learning Models in Medical Imaging. *Journal of Imaging*, **10**, Article 239. <https://doi.org/10.3390/jimaging10100239>
- [39] 陈楠, 金玲, 郑博, 等. 基于眼底彩照的人工智能技术在高度近视筛查中的创新应用与探索[J]. 人工智能, 2021(3): 105-112.
- [40] Gou, R., Ma, X., Su, N., Yuan, S. and Chen, Q. (2025) Bilateral Deformable Attention Transformer for Screening of High Myopia Using Optical Coherence Tomography. *Computers in Biology and Medicine*, **191**, Article ID: 110236. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2025.110236>
- [41] Young, V.M., Gates, S., Garcia, L.Y. and Salardini, A. (2025) Data Leakage in Deep Learning for Alzheimer's Disease Diagnosis: A Scoping Review of Methodological Rigor and Performance Inflation. *Diagnostics*, **15**, Article 2348. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15182348>
- [42] Abd-Alrazaq, A., Solaiman, B., Mekki, Y.M., Al-Thani, D., Farooq, F., Alkubeyyer, M., *et al.* (2025) Hype vs Reality in the Integration of Artificial Intelligence in Clinical Workflows. *JMIR Formative Research*, **9**, e70921. <https://doi.org/10.2196/70921>