

多模态成像联合人工智能在高度近视眼底生物参数中的研究

刘明慧¹, 蔡楚盛², 杜绍林²

引用: 刘明慧, 蔡楚盛, 杜绍林. 多模态成像联合人工智能在高度近视眼底生物参数中的研究. 国际眼科杂志, 2026, 26(3): 477-482.

作者单位:¹(523900)中国广东省东莞市滨海湾中心医院眼科;

²(523110)中国广东省东莞市, 东莞东华医院眼科

作者简介: 刘明慧, 硕士, 住院医师, 研究方向: 近视屈光。

通讯作者: 杜绍林, 博士, 主任医师, 研究方向: 青光眼、白内障、眼底疾病、近视屈光。dsl@126.com

收稿日期: 2025-07-24 修回日期: 2026-01-15

摘要

高度近视(HM)是导致不可逆性视力损害的主要眼病之一, 其病理改变涉及眼轴延长及眼底生物参数的多维度异常。文章系统综述了HM患者眼底生物参数(包括视网膜、视盘、黄斑及脉络膜的生物参数特征)在多模态成像技术(如OCT、OCTA等)下的动态变化特征及其与HM进展和并发症的关联。文章重点探讨了多模态成像技术协同应用的策略与优势, 以及人工智能(AI)与多模态成像融合在HM患者眼底生物参数自动分析、病变识别、风险分层及临床决策中的前沿进展和潜在挑战。文章旨在为HM的早期预警、精准干预及个体化管理提供循证依据, 有助于推动HM诊疗模式由“被动治疗”向“主动健康管理”的转变。

关键词: 高度近视; 眼底生物参数; 多模态成像; 人工智能

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2026.3.20

Multimodal imaging combined with artificial intelligence in the study of ocular biometric parameters in high myopia

Liu Minghui¹, Cai Chusheng², Du Shaolin²

¹Department of Ophthalmology, Binhaiwan Central Hospital of Dongguan, Dongguan 523900, Guangdong Province, China;

²Department of Ophthalmology, Dongguan Tungwah Hospital, Dongguan 523110, Guangdong Province, China

Correspondence to: Du Shaolin. Department of Ophthalmology, Dongguan Tungwah Hospital, Dongguan 523110, Guangdong Province, China. dsl@126.com

Received: 2025-07-24 Accepted: 2026-01-15

Abstract

• High myopia (HM) is one of the leading causes of irreversible visual impairment, characterized by

pathological changes such as axial elongation and multidimensional abnormalities in fundus biometric parameters. This review systematically summarizes the dynamic characteristics of fundus biometric parameters (including those of the retina, optic disc, macula, and choroid) in HM patients, as visualized via multimodal imaging techniques [e.g., optical coherence tomography (OCT) and optical coherence tomography angiography (OCTA)], and their association with HM progression and related complications. The article further highlights the strategies and advantages of multimodal imaging integration and discusses recent advances and challenges in combining artificial intelligence (AI) with these imaging modalities to automate fundus parameter analysis, lesion detection, risk stratification, and clinical decision-making for HM. This review aims to provide an evidence-based foundation for the early warning, precise intervention, and personalized management of HM, thereby facilitating a clinical paradigm shift from “reactive treatment” to “active health management”.

• KEYWORDS: high myopia; ocular biometrics; multimodal imaging; artificial intelligence

Citation: Liu MH, Cai CS, Du SL. Multimodal imaging combined with artificial intelligence in the study of ocular biometric parameters in high myopia. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26 (3): 477-482.

0 引言

全球范围内, 高度近视(high myopia, HM)患病率呈爆发式增长, 预计2050年患者将达9.38亿^[1-2]。HM患病率的持续上升及其导致的视力损害风险, 凸显了早期监测其进展的重要性^[3]。HM的病理特征(如眼轴延长、后巩膜葡萄肿)可引发黄斑病变、视网膜脱离等致盲性并发症。近年来, 多模态成像技术[如光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)、光学相干断层扫描血管造影(optical coherence tomography angiography, OCTA)]的革新, 使得视网膜厚度、脉络膜血流密度等生物参数的精准测量成为可能, 为HM的早期预警及动态监测提供了新工具。如何利用多模态成像技术实现HM病程的精细科学管理, 人工智能(artificial intelligence, AI)为这一难题的解决提供了可能。近年来随着AI技术的快速迭代更新发展, AI和医学联系日益密切。因AI具备多维度分析、客观准确高效的特点, 在眼科疾病的筛查诊断、精准识别以及病程管理方面展现了独特的优势。如胡锐等^[4]采用Meta分析系统评价AI辅助诊断系统在糖尿病

视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)诊断中的应用价值,结果显示 AI 辅助诊断系统能有效应用于 DR 的早期筛查与诊断。张超等^[5]论证了 AI 在眼底黄斑病变的疾病诊断、治疗方案的制定和预后评估上的广泛应用前景。本文综述多模态成像技术与 HM 的眼底生物学参数之间的紧密联系,同时探讨 AI 在 HM 病程管理上的应用前景和挑战。

1 多模态成像技术从结构到功能的精准评估

眼底生物参数的定量评估是 HM 临床管理的核心环节。传统影像技术如眼底彩色照相可宏观显示视网膜血管走行异常、视盘倾斜及后巩膜葡萄肿等形态学改变,但其分辨率有限(约 20 μm),难以捕捉早期微结构病变(如视网膜层间分离、脉络膜毛细血管稀疏)^[6]。近年来,多模态成像技术的融合应用突破了单一模态的局限,实现了从宏观形态到显微结构、从静态解剖到动态血流的全方位评估。

1.1 高分辨结构成像 OCT 通过近红外光干涉原理,可无创获取视网膜与脉络膜的横断面图像(轴向分辨率≤5 μm),精准量化黄斑中心凹厚度、视网膜神经纤维层(retinal nerve fiber layer, RNFL)及脉络膜厚度(choroidal thickness, CT)^[7]。新一代扫频源 OCT(swept-source OCT, SS-OCT)通过长波长(1 050 nm)光源穿透色素上皮及巩膜,显著提升对 HM 眼后极部结构的成像质量。研究表明, HM 患者黄斑中心凹下脉络膜厚度(subfoveal choroidal thickness, SFCT)与眼轴长度(axial length, AL)呈显著负相关($r=-0.72, P<0.001$),且 SFCT<100 μm 可作为预测近视性黄斑病变(myopic macular degeneration, MMD)进展的临界值^[8]。此外,增强深度成像 OCT(enhanced depth imaging-OCT, EDI-OCT)可清晰显示 HM 特征性改变,如视盘旁萎缩弧(peripapillary atrophy, PPA)及 Bruch 膜断裂,为病理性近视(pathologic myopia, PM)的早期诊断提供依据^[7]。

1.2 功能成像血流可视化 光学相干断层扫描血管造影(optical coherence tomography angiography, OCTA)通过检测红细胞运动引起的信号变化,无創重建视网膜与脉络膜毛细血管的三维灌注图谱,定量分析血流密度(vessel density, VD)及无灌注区面积。在 HM 患者中,OCTA 可早期发现黄斑区浅层毛细血管丛(superficial capillary plexus, SCP)与深层毛细血管丛(deep capillary plexus, DCP)的 VD 降低,其程度与 AL 延长及 CT 变薄显著相关^[9]。最新研究进一步揭示, HM 脉络膜毛细血管血流密度(choriocapillaris flow deficit, CC-FD)的异常升高与脉络膜新生血管(choroidal neovascularization, CNV)的发生风险直接相关,提示 CC-FD 可作为 CNV 筛查的意义指标^[10]。

1.3 多模态协同 单一成像技术难以全面评估 HM 的多维病理改变,而多模态融合策略可显著提升诊断效能。例如,结合 OCT 的 CT 测量、OCTA 的血流定量及眼底自发荧光(fundus autofluorescence, FAF)的代谢成像,可系统解析 HM 患者“结构-血流-代谢”的交互网络:结构-功能关联:后巩膜葡萄肿区域常伴随脉络膜厚度锐减、毛细血管灌注不足及脂褐素沉积,提示局部缺血-氧化应激级联反应^[11-12]。治疗监测:抗 VEGF 药物治疗 CNV 后,OCTA 可

动态显示异常血管网消退(VD 降低)及黄斑无灌注区(foveal avascular zone, FAZ)面积缩小,而 EDI-OCT 可同步监测视网膜下液吸收及外层视网膜结构修复^[13]。

1.4 前沿技术展望 超广域 OCTA(wide-field OCTA, WF-OCTA)通过拼接成像技术将视野扩展至 120°~200°,可全面评估 HM 周边视网膜缺血、血管渗漏及萎缩病灶,尤其适用于 AL>30 mm 的超高度近视^[14]。此外,AI 驱动的多模态分析平台(如 DeepHM 系统)可整合 OCT、OCTA 及人口学数据,自动分割病灶、预测并发症风险,并在 HM 和近视性黄斑病变的诊断中达到极高的准确率(AUC 分别为 0.973 和 0.978),优于 6 位眼科专家的诊断水平。这些进展为 HM 的早期筛查、精准分型和动态预后评估提供了新的技术路径,有望推动 HM 管理向精准医学范式转变^[15]。然而,跨设备数据标准化、小样本模型泛化性及医疗伦理问题仍是 AI 临床转化的关键挑战。

2 HM 患者眼底生物参数特征

2.1 从形态到微循环的多维度视盘参数评估 视盘作为视神经穿出眼球的解剖标志,其形态与微循环的异常改变与 HM 的进展及并发症风险密切相关。HM 患者因 AL 延长引发巩膜后极部扩张,导致视盘机械性牵拉与重塑,表现为倾斜、旋转、杯盘比异常及视盘旁萎缩弧(peripapillary atrophy, PPA)等特征性改变。近年来,多模态成像技术(如 OCT、OCTA)的联合应用,为解析视盘“结构-功能-血流”的交互机制提供了新视角。

2.1.1 AL 驱动的视盘重塑 视盘倾斜与视盘旋转是 HM 眼轴延长导致的典型形态学标志。根据国际多中心研究数据, HM 患者视盘倾斜(长/短直径比>1.30)和旋转(长轴偏离垂直子午线>15°)的发生率分别为 41.1% 和 63.3%,且与 AL 呈显著正相关($P<0.001$)^[16]。Zhang 等^[17]对青年 HM 患者的队列研究发现,AL 每增加 1 mm,视盘倾斜角度增加 3.2°,PPA 面积扩大 0.12 mm²,提示 AL 延长直接驱动视盘解剖结构变形。值得注意的是,当 PPA 面积超过视盘总面积时,病理改变(如 Bruch 膜断裂、脉络膜毛细血管丢失等)的发生风险增加 4.3 倍,这标志着 HM 的进展^[18]。

2.1.2 视盘微循环障碍到神经损伤 视盘 VD 的降低是 HM 微循环障碍的核心特征。OCTA 研究表明, HM 患者视盘周围 SCP 与 DCP 的 VD 较正常眼分别降低 18.7% 和 14.5%,且 HM 患者视盘周围 SCP 与 DCP 的 VD 与 AL 延长及 RNFL 厚度变薄显著相关^[19]。He 等^[19]进一步发现, HM 组视盘旁 SCP 的 VD 下降与 FAZ 扩大($r=0.68, P<0.01$)同步出现,表明视盘-黄斑血流网络存在协同退化机制。

RNFL 厚度进行性变薄是 HM 视神经损伤的敏感指标。Mishra 等^[20]的横断面研究显示,AL 每增加 1 mm,视盘周围 RNFL 厚度减少 1.03 μm,而等效球镜(spherical equivalent, SE)每加深 1 D,RNFL 厚度减少 0.61 μm。这一现象可能与 AL 延长导致视网膜拉伸及轴突运输障碍相关,尤其在 β 区 PPA(Bruch 膜缺失区域)范围内 RNFL 变薄速度加快。

2.1.3 青光眼风险与筛查策略 HM 与青光眼具有协同病理效应。视盘微循环障碍与高眼压共同作用时,视盘筛板形变风险增加,进而引发青光眼性视神经病变^[21]。

Yaprak 等^[22]发现, HM 患者虽视盘内血管密度保持正常, 但 PPA 区域的 VD 降低与视野平均缺损 (mean deviation, MD) 显著相关 ($r = -0.52, P = 0.01$), 提示局部缺血可能通过“血管-神经轴”机制影响视功能。基于上述证据, 视盘多模态评估策略应涵盖以下维度:(1) 结构评估: 通过 EDI-OCT 量化 PPA 面积、筛板曲率及 RNFL 厚度;(2) 血流分析: 利用 OCTA 检测 SCP/DCP 的 VD 及无灌注区分布;(3) 动态监测: 结合 AL 与眼压变化, 建立青光眼风险预测模型(如 HM-GRS 评分)^[23]。

2.1.4 AI 驱动的视盘参数自动化分析 AI 通过深度学习模型实现对视盘和视杯的精准分割与量化, 为青光眼等视神经疾病的早期诊断提供了客观依据。一项纳入 4 795 例患者的多中心研究显示, Airdoc 视网膜 AI 系统 (ARAS) 在检测青光眼视神经病变 (GON) 时准确率达 0.93, 且在不同种族和设备差异下仍保持稳定性能^[24]。然而, 当前研究仍面临数据质量不均、模型泛化能力不足等挑战。例如, 不同设备采集的眼底图像(如欧堡眼底图像与 OCT) 在测量垂直杯盘比 (VC/D) 时存在显著差异, 一致性较差^[25]。为解决这一问题, 最新研究强调多模态数据整合的重要性, 如结合眼压 (IOP) 和对侧眼信息可显著提升诊断一致性^[26]。

2.2 视网膜厚度 HM 的内层视网膜(如神经节细胞层)厚度较非 HM 更厚, 而外层视网膜(如感光细胞层)变薄。男性 HM 患者的内层及全层视网膜厚度均大于女性^[27]。HM 合并青光眼时, RNFL 厚度显著减少, 尤其是颞上、鼻下和颞下象限(差异达 $11.1\text{--}13.3 \mu\text{m}, P < 0.01$)^[28]。在 HM 合并 2 型糖尿病 (DM) 的患者中, 其神经节细胞复合体 (GCC) 厚度 ($102.6 \pm 15.1 \mu\text{m}$) 相较于单纯 HM 组 ($112.4 \pm 11.2 \mu\text{m}$) 与单纯 DM 组 ($112.2 \pm 7.8 \mu\text{m}$) 均显著变薄, 差异具有统计学意义 ($P < 0.001$), 提示糖尿病相关的代谢因素可能加剧了 HM 的视网膜神经组织损伤^[29]。在近视人群中视网膜厚度变薄与 AL 延长显著相关 ($r = -0.438, P = 0.002$), 尤其在旁中心凹区域^[30-31]。病理性近视患者的视网膜厚度 (RT)、脉络膜厚度及血管密度均低于非病理性 HM^[32]。

从整体上看, HM 的视网膜厚度特征表现为中心凹增厚、周围区变薄, 内层视网膜可能因代偿性改变增厚, 而外层视网膜和脉络膜显著变薄。这些变化与 AL 延长、青光眼风险及微循环障碍密切相关, 需通过多参数联合评估(如 OCT、OCTA)进行监测。

2.3 黄斑区的改变

2.3.1 黄斑结构改变 HM 患者黄斑区厚度显著降低, 包括中心凹周围区域 (perifovea) 厚度、整体黄斑厚度和体积的减少, 与低度、中度近视相比, HM 的黄斑参数改变更显著^[33]。病理性 HM 可出现黄斑区视网膜色素上皮 (RPE) 线性缺损(漆裂纹), 进而发展为圆形 RPE 缺损(斑片状萎缩)伴布鲁赫膜 (Bruch membrane) 缺损^[12]。圆顶状黄斑 (dome-shaped macula) 在 HM 眼中发生率增加, 这种特殊形态可能与不同的病理生理过程相关^[34]。

2.3.2 微循环异常 OCTA 显示 HM 患者黄斑区浅层血管密度显著降低 ($27.30\% \text{ vs } 22.33\%$), 且与青光眼患者的下降程度相似^[35]。2 型糖尿病患者合并 HM 时, 黄斑区血管密度下降更显著^[36]。FAZ 形态在病理性近视眼中发生改

变, 与近视严重程度相关^[32]。

2.3.3 功能改变 即使 OCT 扫描显示黄斑结构正常, 中度近视也可能出现黄斑区电生理功能改变^[37]。不同严重程度的近视性萎缩性黄斑病变 (MAM) 对应不同的视力损害模式和视网膜亚层特征^[38]。

2.4 脉络膜参数特征

2.4.1 CT 显著变薄 HM 眼黄斑区 CT 较正常眼减少 86.3%, 周边区域体积减少 90%^[39]。变薄程度与 AL 长度呈显著负相关 ($\beta = -22.55, P < 0.001$), 黄斑区变薄最明显^[40]。在病理近视伴后巩膜葡萄肿的患者中, 平均 CT 仅 $68.81 \mu\text{m}$, 显著低于无并发症者 ($137.80 \mu\text{m}$)^[41]。

2.4.2 血管结构改变 脉络膜血管指数 (CVI) 在 HM 眼中升高, 但总脉络膜面积 (TCA)、管腔面积 (LA) 和基质面积 (SA) 均下降^[42]。血管密度从中心凹 (61.8%) 向周边 (66.4%) 递增, 但 HM 患者整体血管密度显著降低 ($67.54 \text{ vs } 82.43$)^[41]。三维脉络膜血管指数 (3D-CVI) 在儿童 HM 组呈现区域性降低^[43]。

2.4.3 血流动力学变化 脉络膜毛细血管丛 (CCP) 血流密度与 AL 延长呈负相关 ($P < 0.05$)^[40]。视盘周围脉络膜血流密度在 HM 眼中显著降低^[44]。

2.4.4 动态变化特征 近视诱导 1 wk 即可观察到 CT 和血流参数 (ChBP) 显著下降^[45]。停用阿托品控制后, CT 变化可持续存在^[46], 角膜塑形镜 (Ortho-K) 配戴早期即出现脉络膜增厚 ($0.06 \pm 0.03 \text{ mm}$)^[47]。CT 与血流参数改变与 AL 和屈光度增长呈比例关系, 且可通过超广角 SS-OCTA 等技术量化评估^[38]。临床可考虑将脉络膜参数作为监测 HM 进展的重要生物标志物^[48-49]。

3 眼底生物参数在 HM 预防和治疗中的应用

AL 增长使视盘与黄斑的解剖距离增加, 导致视网膜血管和神经纤维被拉伸平直, 可能加剧视网膜牵拉性损伤。动态监测该距离变化可评估后极部牵拉力对眼底结构的累积效应^[16,18]。HM 导致视盘扩大、筛板结构变形及视盘周围脉络膜萎缩(如视盘旁 Delta 区形成)^[17-18]。视盘倾斜和旋转(倾斜比 > 1.3) 与脉络膜灌注降低显著相关, 是青光眼视神经损伤的危险因素^[21]。

HM 所呈现的“中心增厚、周围变薄”的视网膜厚度分布模式, 可能反映了视网膜神经纤维层所受的牵拉与机械性损伤, 可作为监测 HM 进展的敏感指标^[27,30-31]。在血流灌注方面, 黄斑区深层毛细血管丛血流密度代偿性增加, 常伴随脉络膜灌注的下降; 而黄斑下 CT 变薄则与视网膜光敏感度降低具有直接相关性^[39]。通过 OCTA 可评估黄斑血流分布异常, 辅助判断早期黄斑病变风险。

HM 患者 CT 普遍变薄, 且与 AL 长度呈负相关。CVI 变化和脉络膜血流密度下降, 提示脉络膜缺血可能驱动黄斑病变发展^[41,44]。泪液中 VEGF 水平升高与脉络膜变薄相关, 可能成为药物治疗靶点^[44]。

视盘周围 CT 减少与 β 区萎缩(病理性近视特征性改变)显著相关, 且与视网膜神经纤维层变薄存在协同效应。此类改变可作为预测后巩膜葡萄肿形成的生物标志物^[50]。联合视网膜厚度(黄斑中心凹厚度 $> 250 \mu\text{m}$)、CT ($< 100 \mu\text{m}$) 及视盘倾斜度等参数, 可建立 HM 并发症风险预测模型^[23,30,48-49]。儿童 HM 中, 后极部 CT $< 120 \mu\text{m}$ 提示未来 10 a 内黄斑病变风险增加 3 倍。

多模态成像可同步分析视网膜-脉络膜结构(如黄斑曲率半径)与血流参数(如视盘旁毛细血管密度),提高对HM生物力学改变的解析精度。AI通过整合视网膜厚度梯度、视盘旋转角度及脉络膜血管指数,可实现对病理性近视进展的自动化预警(AUC=0.91)^[51]。综上,这些生物参数不仅为HM的机制研究提供解剖学依据,更为临床提供了可量化的监测指标和治疗靶点。未来需建立基于多参数联合的动态评估体系,以实现从结构代偿到功能失代偿的精准干预^[52]。

4 AI 与多模态成像整合的应用前景与未来挑战

HM是病理性近视及相关不可逆性视力损害的重要危险因素,因此对其进展的早期识别、及时干预与并发症防治至关重要^[53]。HM的进展常伴随眼底生物参数的微观改变,而传统诊断与监测方法主要依赖医师的主观判断与手动测量,存在效率低、一致性差以及对早期细微变化不敏感等局限。多模态成像技术可提供海量、高分辨率的定量数据,而AI技术,尤其是深度学习,能够从中自动、精准地提取人眼难以辨别的影像特征,推动诊断模式从“描述性判断”向“定量化预测”转变。目前深度学习如卷积神经网络(CNNs)、生成对抗网络(GANs)、视觉Transformer(ViT)架构等多种融合型多模学习模型在图像识别方面具有高效精准的特性。比如CNNs通过“卷积核”自动学习从视网膜边缘到结构、病变的层次化特征,可用于HM患者OCT图像的视网膜层分割、近视分类及病变定位识别。其优势在于强大的特征提取能力,缺点是依赖大量标注数据且模型可解释性差^[54]。ViT可通过自注意力机制,捕捉图像中不同区域之间的全局依赖关系,它与GNNs类似,用于分类和分割任务,但在需要处理全局信息任务时(如判断后巩膜葡萄肿的整体形态),比GNNs更具备优势。同时该模型需要大量数据训练以避免过度拟合,计算复杂程度较高^[55]。AI作为多模态影像整合的终端处理器,通过数据整合与特征融合策略,在HM的早期预警、动态监测与风险评估中发挥关键作用。例如,AI可同步分析OCT显示的视网膜结构和OCTA显示的视网膜血流密度,从而更精准地定位因血流不足所导致的局部视网膜萎缩区域;也可通过融合OCT所显示的CT与OCTA所反映的脉络膜毛细血管血流密度,更早识别“脉络膜空洞”的早期征象^[56]。在建模方面,可采用不同AI模型(或同一模型的不同分支)分别从不同模态图像中提取高层特征:如从眼底彩照中获取视盘倾斜度、弧斑面积等宏观特征;从OCT中量化黄斑中心凹厚度、CT等结构参数;从OCT中提取黄斑中心凹厚度、CT等结构特征;从OCTA中提取血管密度、无灌注区面积等血流特征。通过融合多源特征,可构建用于预测HM并发症(如脉络膜新生血管)的风险模型。此外,基于连续多次OCT/OCTA图像的自动配准与分割,AI能够精确量化关键生物参数(如CT、萎缩灶面积)的变化速率,实现对病灶演变毫米级甚至微米级的动态监测。同时,AI可通过使用循环神经网络或ViT模型,预测患者未来一段时间内眼底结构的变化趋势,为个性化干预提供依据。同时AI在近视管理中也发挥着潜在的辅助作用,可通过多模态数据的整合,开发可推广的深度学习系统,从而为早期近视进展预测及个体化的精准医疗服务平台奠定基础^[57]。

综上所述,基于AI与多模态成像的整合应用在HM的诊疗及疾病预测领域进展显著。AI技术不仅优化了HM的诊断与分类标准,还可通过机器学习算法预测视力预后,并精准识别疾病进展的高危人群。此外,AI驱动的多模态数据融合(如眼底照相、OCT及OCTA)能够定量分析视网膜结构及微血管变化,从而挖掘具有潜在临床价值的新型标志物,为HM的早期干预和个性化管理提供重要依据。

尽管AI与多模态成像结合在HM的临床诊疗上展现出巨大潜力,但其在真实世界临床环境中的大规模应用仍面临诸多的挑战,主要包括:(1)数据质量与标准化:不同设备、成像协议导致数据差异,图像质量参差不齐,缺乏大规模、多中心、标准化的高质量数据集是阻碍AI模型临床落地的首要障碍;(2)模型泛化性低下:在未知数据集、不同人群、不同设备上性能下降;(3)临床工作流整合有待提高:AI系统与现有医院信息系统整合度低,自动化不足,互操作性差,额外增加使用成本;(4)算法可解释性不足:AI模型的“黑箱”特性使其决策过程难以被临床医生和患者理解,降低了信任度;(5)伦理和隐私争议等。这些问题的解决需要眼科专家、AI科研人员、医疗机构和产业界的紧密协作^[58]。

AI与多模态成像的深度融合,正深刻改变着HM的临床诊疗范式,推动HM病程管理向早期预警、精准化诊疗和动态预后评估的范式转变。未来的研究需要聚焦多中心数据协作、生成式AI增强训练数据、可解释算法开发以及AI智能体与临床工作流的无缝整合等,最终推动HM病程管理从“被动治疗”向“主动健康”转变。通过借助AI和多模态成像融合对HM患者全病程精准管理和个性化风险预测,最终降低HM相关不可逆性视力损伤的发生率,提升全民视觉生活质量。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。

作者贡献声明:刘明慧论文选题与修改,初稿撰写;蔡楚盛文献检索,数据分析;杜绍林选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

- [1] Liang J. Trend and projection of myopia in children and adolescents from 1990 to 2050: a comprehensive systematic review and meta-analysis. Br J Ophthalmol, 2025, 362:109.
- [2] 国际近视研究院, 刘康, 高建华, 等. 国际近视研究院关于近视危险因素的报告. 中华实验眼科杂志, 2022, 40(6):562-573.
- [3] 王亚星, 薛灿灿, 李建军. 眼科人工智能研究存在的主要问题及对策. 眼科, 2021, 30(2):81-84.
- [4] 胡锐, 王心凤, 丛金鹏, 等. 人工智能辅助诊断系统对糖尿病视网膜病变诊断价值的Meta分析. 国际眼科杂志, 2025, 25(7):1122-1129.
- [5] 张超, 邱媛媛, 王树纲, 等. 人工智能在黄斑疾病中的应用及研究进展. 国际眼科杂志, 2025, 25(7):1094-1098.
- [6] Kubo T, Shinke T, Okamura T, et al. Optical frequency domain imaging vs. intravascular ultrasound in percutaneous coronary intervention (OPINION trial): one-year angiographic and clinical results. Eur Heart J, 2017, 38(42):3139-3147.
- [7] Cheng WJ, Song YH, Gao XB, et al. Axial length and choriocapillaris flow deficits in non-pathological high myopia. Am J Ophthalmol, 2022, 244:68-78.

- [8] Li Y, Zheng FH, Foo LL, et al. Advances in OCT imaging in myopia and pathologic myopia. *Diagnostics*, 2022, 12(6):1418.
- [9] Si YY, Pang KP, Song YL, et al. Observation of structural and vascular features of retina and choroid in myopia using ultra-widefield SS-OCTA. *BMC Ophthalmol*, 2024, 24(1):208.
- [10] Uematsu S, Sakaguchi H, Sayanagi K, et al. Association between choriocapillaris flow deficit and choroidal neovascularization activity in eyes with myopic choroidal neovascularization. *Sci Rep*, 2021, 11:21947.
- [11] Gallego-Pinazo R, Hernández S, Dolz-Marcó R. Key multimodal fundus imaging findings to recognize multifocal choroiditis in patients with pathological myopia. *Front Med*, 2022, 8:831764.
- [12] Jonas JB, Jonas RA, Bikbov MM, et al. Myopia: Histology, clinical features, and potential implications for the etiology of axial elongation. *Prog Retin Eye Res*, 2023, 96:101156.
- [13] Park J, Snow Z, Zhou HW, et al. Retinal and choroidal vascular biomarkers are correlated with the degree of myopia. *Trans Vis Sci Tech*, 2025, 14(8):39.
- [14] Takahashi H, Tanaka N, Shinohara K, et al. Ultra-widefield optical coherence tomographic imaging of posterior vitreous in eyes with high myopia. *Am J Ophthalmol*, 2019, 206:102–112.
- [15] Tan TE, Anees A, Chen C, et al. Retinal photograph-based deep learning algorithms for myopia and a blockchain platform to facilitate artificial intelligence medical research: a retrospective multicohort study. *Lancet Digit Health*, 2021, 3(5):e317–e329.
- [16] 延艳妮, 王亚星, 魏文斌. 40岁及以上高度近视眼人群后极部眼底形态学特征的10年随访研究. *中华眼科杂志*, 2021, 57(12):908–915.
- [17] Zhang F, Liu XT, Wang YL, et al. Characteristics of the optic disc in young people with high myopia. *BMC Ophthalmol*, 2022, 22(1):477.
- [18] Tang WQ, He B, Luo YL, et al. Morphology and microcirculation changes of the optic nerve head between simple high myopia and pathologic myopia. *BMC Ophthalmol*, 2023, 23(1):208.
- [19] He JN, Chen QY, Yin Y, et al. Association between retinal microvasculature and optic disc alterations in high myopia. *Eye*, 2019, 33(9):1494–1503.
- [20] Mishra A, Pattnaik L, Mishra S, et al. Assessment of changes in optic disc parameters and peripapillary retinal nerve fiber layer thickness in myopic patients and its correlation with axial length and degree of myopia. *Indian J Ophthalmol*, 2022, 70(12):4343–4348.
- [21] Yoshida T, Yoshimoto S, Nomura T, et al. Intraocular pressure-lowering effects of ripasudil on open-angle glaucoma in eyes with high myopia and pathological myopia. *Sci Rep*, 2023, 13:22888.
- [22] 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.
- [23] Yuan J, Qiu RW, Wang YH, et al. Exome-wide genetic risk score (ExGRS) to predict high myopia across multi-ancestry populations. *Commun Med*, 2024, 4:280.
- [24] Gu CF, Wang YJ, Jiang Y, et al. Application of artificial intelligence system for screening multiple fundus diseases in Chinese primary healthcare settings: a real-world, multicentre and cross-sectional study of 4795 cases. *Br J Ophthalmol*, 2024, 108(3):424–431.
- [25] 黄丽娜, 官凡钰, 段蔺蔺, 等. 比较欧堡眼底图像结合人工智能分析, OCT 及 OCTA 对垂直杯盘比一致性分析. *眼科学*, 2022, 11(2):113–120.
- [26] Pourjavan S, Bourguignon GH, Marinescu C, et al. Evaluating the influence of clinical data on inter-observer variability in optic disc analysis for AI-assisted glaucoma screening. *Clin Ophthalmol*, 2024, 18:3999–4009.
- [27] Zhang JS, Li J, Wang JD, et al. The association of myopia progression with changes in retinal thickness among primary school students with myopia. *J Ophthalmol*, 2024, 2024:1055700.
- [28] Gende M, de Moura J, Robles P, et al. Circumpapillary OCT-based multi-sector analysis of retinal layer thickness in patients with glaucoma and high myopia. *Comput Med Imag Graph*, 2024, 118:102464.
- [29] Kim JT, Na YJ, Lee SC, et al. Impact of high myopia on inner retinal layer thickness in type 2 diabetes patients. *Sci Rep*, 2023, 13(1):268.
- [30] Yang L, Niu HL, Sun WC, et al. Structural, blood flow and functional changes in the macular area and the expression of aqueous humor factors in myopia. *Front Med*, 2024, 11:1335084.
- [31] Wu HT, Zhang B, Chen J, et al. Retinal curvature in Chinese children with myopia measured by ultra-widefield swept-source optical coherence tomography. *Br J Ophthalmol*, 2025, 109(4):470–475.
- [32] Sui JY, Li HR, Bai Y, et al. Morphological characteristics of the foveal avascular zone in pathological myopia and its relationship with macular structure and microcirculation. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2024, 262(7):2121–2133.
- [33] Mutwaly RF, Elmadiha AM, Alrasheed SH, et al. Macula characteristics in young Saudi male patients with myopia: a comparative hospital-based study. *Cureus*, 2024, 16(9):e69168.
- [34] Müller PL, Kihara Y, Olvera-Barrios A, et al. Quantification and predictors of OCT-based macular curvature and dome-shaped configuration: results from the UK biobank. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2022, 63(9):28.
- [35] Santhosh LM, Elias A, Anup M, et al. Diagnostic ability of superficial vascular density measured by optical coherence tomography angiography to differentiate high myopic eyes from eyes with primary open angle glaucoma. *Indian J Ophthalmol*, 2022, 70(12):4138–4143.
- [36] Su RF, Jia ZY, Fan F, et al. Clinical observation of macular vessel density in type 2 diabetics with high myopia. *Ophthalmic Res*, 2023, 66(1):124–130.
- [37] Grudzińska EM, Lubiński W, Modrzejewska M. Macular function in patients with medium myopia. *Documenta Ophthalmol*, 2023, 146(2):113–120.
- [38] Lee CY, Hsia Y, Tsui MC, et al. Correlation of visual acuity and outer retinal thickness in myopic atrophic maculopathy: a retrospective review. *Ophthalmol Ther*, 2023, 12(4):1989–2003.
- [39] Xu XC, Wang XH, Lin JY, et al. Automatic segmentation and measurement of choroid layer in high myopia for OCT imaging using deep learning. *J Digit Imag*, 2022, 35(5):1153–1163.
- [40] 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. *Trans Vis Sci Tech*, 2022, 11(12):14.
- [41] Lu XH, Zhang GH, Cen LP, et al. Choroidal vascular density quantification in high myopia with or without choroidal neovascularization using optical coherence tomography angiography. *J Ophthalmol*, 2023, 2023:1504834.
- [42] Kirik F, Ozbas C, Elbay A, et al. Characteristics of myopic and hyperopic eyes in patients with antimetropia. *Clin Exp Optom*, 2024, 107(3):291–298.
- [43] Liu F, Ye YH, Yang WM, et al. Quantitative evaluation of the topographical maps of three-dimensional choroidal vascularity index in children with different degrees of myopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2024, 65(3):14.
- [44] Wang H, Li SG, Jing SD. Assessment of optic disc morphological characteristics and related factors of highly myopic eyes in Chinese school-aged children. *Clin Exp Optom*, 2024, 107(6):657–664.

- [45] Yang YZ, Chen MX, Yao XY, et al. Choroidal blood perfusion could predict the sensitivity of myopia formation in guinea pigs. *Exp Eye Res*, 2023, 232; 109509.
- [46] Lee SS, Lingham G, Clark A, et al. Choroidal changes during and after discontinuing long - term 0.01% atropine treatment for myopia control. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2024, 65(10):21.
- [47] Zhu Q, Zhao Q. Short-term effect of orthokeratology lens wear on choroidal blood flow in children with low and moderate myopia. *Sci Rep*, 2022, 12:17653.
- [48] Niyazmand H, Jeyakumar V, Feng I, et al. The effect of transient increase in intraocular pressure on subfoveal choroidal thickness. *Optom Vis Sci*, 2025, 102(1):7-13.
- [49] Zhang ZR, Mu JY, Wei J, et al. Correlation between refractive errors and ocular biometric parameters in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. *BMC Ophthalmol*, 2023, 23(1):472.
- [50] Li SS, Liu XH, Liu S, et al. Peripapillary retinal thickness and its risk factors in dry-type high myopia. *Photodiagn Photodyn Ther*, 2024, 50:104344.
- [51] Gou RX, Ma X, Su N, et al. Bilateral deformable attention transformer for screening of high myopia using optical coherence tomography. *Comput Biol Med*, 2025, 191:110236.
- [52] de Biaggi Borges da Silva F, Silva LCP, Cunha LP, et al. Relationship between automated choroidal thickness measurements and retinal sensitivity using microperimetry in patients with myopia and different stages of myopic maculopathy. *Int J Retina Vitreous*, 2024, 10(1):26.
- [53] Erratum in: IMI—Defining and Classifying Myopia: A Proposed Set of Standards for Clinical and Epidemiologic Studies. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2024, 65(13):19.
- [54] Djulbegovic MB, Bair H, Gonzalez DJT, et al. Artificial intelligence for optical coherence tomography in glaucoma. *Trans Vis Sci Tech*, 2025, 14(1):27.
- [55] Ruamviboonsuk P, Arjkongharn N, Vongsat N, et al. Discriminative, generative artificial intelligence, and foundation models in retina imaging. *Taiwan J Ophthalmol*, 2024, 14(4):473-485.
- [56] Alhalafi AM. Applications of artificial intelligence in choroid visualization for myopia: a comprehensive scoping review. *Middle East Afr J Ophthalmol*, 2023, 30(4):189-202.
- [57] Li Y, Yip MYT, Ting DSW, et al. Artificial intelligence and digital solutions for myopia. *Taiwan J Ophthalmol*, 2023, 13(2):142-150.
- [58] 《人工智能在近视防治中的应用专家共识(2024)》专家组, 国际转化医学会眼科学专委会, 中国医药教育协会眼科影像与智能医疗分会, 等. 人工智能在近视防治中的应用专家共识(2024). 中华实验眼科杂志, 2024, 42(8):689-697.