

基于人工智能技术的近视相关眼底形态参数自动定量分析

李婷^{1,2}, 肖盼盼¹, 顾永华¹, 张芳霞¹, 郭喜珍³, 陈小琳¹, 杨辉¹, 张爽¹

引用:李婷,肖盼盼,顾永华,等. 基于人工智能技术的近视相关眼底形态参数自动定量分析. 国际眼科杂志, 2026, 26(5): 888-895.

基金项目:宁夏回族自治区科技惠民专项项目(No. 2022CMG03027)

作者单位:¹(750001)中国宁夏回族自治区银川市,宁夏回族自治区人民医院 宁夏医科大学附属自治区人民医院;²(750004)中国宁夏回族自治区银川市,宁夏医科大学总医院眼科;³(756000)中国宁夏回族自治区固原市中医医院眼科

作者简介:李婷,女,硕士,住院医师,研究方向:眼视光。

通讯作者:张爽,女,博士,副教授,主任医师,硕士研究生导师,研究方向:眼视光. zhangshuang@nxmu.edu.cn

收稿日期:2025-10-13 修回日期:2026-03-25

摘要

目的:基于免散瞳眼底彩照,应用眼底定量分析 AI 系统自动识别并量化近视患者眼底特征改变,分析其与等效球镜(SE)、眼轴(AL)及年龄的相关性,为近视进展监测及个性化防控策略制定提供客观依据。

方法:采用横断面研究方法,纳入2023年3月至2023年12月18-50岁近视筛查患者,根据SE将患者分为三组:-3.00 D<SE≤-0.50 D组、-6.00 D<SE≤-3.00 D组及SE≤-6.00 D组;根据AL将患者分为三组:AL<24.5 mm组、24.5 mm≤AL<26.5 mm组、AL≥26.5 mm组。所有患者均接受标准化眼科检查,采集以黄斑中心凹为中心的45°免散瞳眼底图像。通过眼底定量分析 AI 系统进行自动化图像分析,主要测量参数包括:视盘盘沿宽度、视盘直径、视杯直径、杯盘比值(C/D)、豹纹斑密度(FTD)、视盘旁萎缩弧(PPA)与视盘面积比值、PPA与视盘宽度比值、动静脉管径比值、血管平均弯曲度和血管平均管径。比较不同等效球镜组及眼轴组间的视盘及视网膜血管参数差异。采用偏相关性分析评估SE、AL及年龄与眼底量化参数的关联。

结果:本研究共纳入近视患者664例664眼(均选取右眼),其中男320例,女344例,平均年龄22.70±6.77岁。根据SE将患者分为三组:-3.00 D<SE≤-0.50 D组138例138眼(男74例,女64例,平均年龄22.50±7.02岁),-6.00 D<SE≤-3.00 D组273例273眼(男122例,女151例,平均年龄23.23±7.22岁),SE≤-6.00 D组253例253眼(男124例,女129例,平均年龄22.23±6.09岁),不同SE组患者的性别、年龄比较均无差异($P=0.219, 0.221$)。根据AL将患者分为三组:AL<24.5 mm组133例133眼(男58例,女75例,平均年龄22.04±6.40岁),24.5 mm≤AL<26.5 mm组386例386眼(男181例,女205例,平均年龄22.95±6.93岁),AL≥26.5 mm组145例145眼(男

81例,女64例,平均年龄22.63±6.70岁),不同AL组患者的性别、年龄比较均无差异($P=0.091, 0.404$)。SE≤-6.00 D组及AL≥26.5 mm组患者视盘直径、视杯直径、血管平均弯曲度及血管平均管径显著小于-3.00 D<SE≤-0.50 D组及AL<24.5 mm组(均 $P<0.05/ <0.017)。偏相关性分析显示FTD、PPA与视盘面积比及PPA与视盘宽度比与AL呈正相关,与SE呈负相关(均 $P<0.001$)。年龄与FTD呈正相关,与血管平均管径呈负相关(均 $P<0.001$)。$

结论:SE及AL是驱动近视眼底结构改变的关键因素,主要影响视盘及视网膜血管改变。眼底定量分析 AI 系统联合免散瞳眼底照相技术可实现对近视相关眼底改变的客观量化评估,为大规模近视筛查及防控效果评估提供可靠技术支持。

关键词:高度近视;眼底定量分析 AI 系统;眼底彩照;视盘形态;视网膜血管

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.5.26

Automatic quantitative analysis of myopia-related ocular fundus morphological parameters based on artificial intelligence

Li Ting^{1,2}, Xiao Panpan¹, Gu Yonghua¹, Zhang Fangxia¹, Guo Xizhen³, Chen Xiaolin¹, Yang Hui¹, Zhang Shuang¹

Foundation item: Science and Technology Benefit People Program of Ningxia Hui Autonomous Region (No.2022CMG03027)

¹People's Hospital of Ningxia Hui Autonomous Region; Affiliated Autonomous Region People's Hospital of Ningxia Medical University, Yinchuan 750001, Ningxia Hui Autonomous Region, China; ²Department of Ophthalmology, General Hospital of Ningxia Medical University, Yinchuan 750004, Ningxia Hui Autonomous Region, China; ³Department of Ophthalmology, Guyuan Hospital of Traditional Chinese Medicine, Guyuan 756000, Ningxia Hui Autonomous Region, China

Correspondence to: Zhang Shuang. People's Hospital of Ningxia Hui Autonomous Region; Affiliated Autonomous Region People's Hospital of Ningxia Medical University, Yinchuan 750001, Ningxia Hui Autonomous Region, China. zhangshuang@nxmu.edu.cn

Received:2025-10-13 Accepted:2026-03-25

Abstract

• AIM: To automatically identify and quantitatively assess myopia-related fundus structural changes by combining non-mydratric color fundus photography with an artificial intelligence (AI) - powered quantitative fundus analysis

system and to further analyze the correlations between these fundus parameters and spherical equivalent (SE), axial length (AL), and age, providing the objective basis for monitoring myopia progression and supporting the formulation of personalized myopia prevention and control strategies.

• **METHODS:** A cross-sectional study was conducted enrolling myopic patients aged 18–50 y who underwent myopia screening from March 2023 to December 2023. Patients were stratified into three groups based on SE: the $-3.00\text{ D} < \text{SE} \leq -0.50\text{ D}$ group, the $-6.00\text{ D} < \text{SE} \leq -3.00\text{ D}$ group, and the $\text{SE} \leq -6.00\text{ D}$ group; and into three groups based on AL: the $\text{AL} < 24.5\text{ mm}$ group, the $24.5\text{ mm} \leq \text{AL} < 26.5\text{ mm}$ group, and the $\text{AL} \geq 26.5\text{ mm}$ group. All participants received standardized ophthalmic examinations, and 45° non-mydratic fundus images centered on the fovea were acquired. Automated image analysis was conducted using an AI-powered quantitative fundus analysis system. The main measured parameters included optic disc rim width, optic disc diameter, cup diameter, cup-to-disc ratio (C/D), foveal tessellation density (FTD), peripapillary atrophy (PPA)-to-optic disc area ratio, PPA-to-optic disc width ratio, arteriovenous diameter ratio, mean vascular curvature, and mean vascular diameter. Intergroup differences in optic disc and retinal vascular parameters were compared across different SE groups and AL groups. Partial correlation analysis was applied to evaluate the associations of SE, AL, and age with quantitative fundus parameters.

• **RESULTS:** A total of 664 patients (664 eyes, all right eyes) were enrolled in this study, consisting of 320 males and 344 females, with a mean age of $22.70 \pm 6.77\text{ y}$. Patients were categorized into three groups based on SE: the $-3.00\text{ D} < \text{SE} \leq -0.50\text{ D}$ group (138 patients, 138 eyes, 74 males, 64 females, mean age $22.50 \pm 7.02\text{ y}$), the $-6.00\text{ D} < \text{SE} \leq -3.00\text{ D}$ group (273 patients, 273 eyes, 122 males, 151 females, mean age $23.23 \pm 7.22\text{ y}$), and the $\text{SE} \leq -6.00\text{ D}$ group (253 patients, 253 eyes, 124 males, 129 females, mean age $22.23 \pm 6.09\text{ y}$). No significant intergroup differences were noted in gender or age across the SE subgroups ($P=0.219, 0.221$, respectively). Regarding AL, patients were divided into three subgroups: the $\text{AL} < 24.5\text{ mm}$ group (133 patients, 133 eyes, 58 males, 75 females, mean age $22.04 \pm 6.40\text{ y}$), the $24.5\text{ mm} \leq \text{AL} < 26.5\text{ mm}$ group (386 patients, 386 eyes, 181 males, 205 females, mean age $22.95 \pm 6.93\text{ y}$), and the $\text{AL} \geq 26.5\text{ mm}$ group (145 patients, 145 eyes, 81 males, 64 females, mean age $22.63 \pm 6.70\text{ y}$), with no significant differences in gender or age observed among AL subgroups ($P=0.091, 0.404$, respectively). Optic disc diameter, cup diameter, mean vascular curvature, and mean vascular diameter in the $\text{SE} \leq -6.00\text{ D}$ and $\text{AL} \geq 26.5\text{ mm}$ groups were significantly smaller than in the $-3.00\text{ D} < \text{SE} \leq -0.50\text{ D}$ and $\text{AL} < 24.5\text{ mm}$ groups (all $P < 0.05/0.017$). Partial correlation analyses demonstrated that FTD, PPA-to-optic disc area ratio, and PPA-to-optic disc width ratio were positively correlated with AL and negatively correlated with SE (all $P < 0.001$). Age was positively correlated with FTD and negatively correlated with mean vascular diameter (all $P < 0.001$).

• **CONCLUSION:** Refractive error and AL are key

determinants of myopia-related fundus structural changes, primarily affecting optic disc morphology and retinal vascular characteristics. The integration of non-mydratic fundus photography with the AI-powered quantitative fundus analysis system enables objective quantification of myopia-related fundus alterations, providing reliable technical support for large-scale myopia screening and for evaluating the effectiveness of myopia prevention and control strategies.

• **KEYWORDS:** high myopia; AI-powered quantitative fundus analysis system; color fundus photography; optic disc morphology; retinal vessels

Citation: Li T, Xiao PP, Gu YH, et al. Automatic quantitative analysis of myopia-related ocular fundus morphological parameters based on artificial intelligence. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2026,26(5):888–895.

0 引言

近视现已成为全球性重大公共卫生问题,其患病率持续攀升已引起广泛关注。流行病学预测显示,至2050年全球近视患者将达48亿(占人口49.8%),其中高度近视患病率预计从4.0%增至9.8%^[1]。这一趋势在我国青少年群体中尤为突出,2022年我国高中生近视患病率已达81.2%^[2]。值得注意的是,高度近视与致盲性眼病显著相关,世界卫生组织(World Health Organization, WHO)统计数据示其已成为继白内障之后第二大致盲病因^[3]。

面对严峻的近视发展防控形势,我国逐步构建起多维度近视防控体系。在沿用眼轴长度(axial length, AL)作为核心监测指标的基础上,学界逐渐认识到近视相关眼底病变的动态演变具有重要预警价值。典型的高度近视眼底改变包括豹纹状眼底(fundus tessellation, FT)和视盘旁萎缩弧(peripapillary atrophy, PPA),研究证实这些结构性改变与近视性脉络膜新生血管、黄斑萎缩、高度近视相关视神经病变等不可逆并发症相关^[4]。因此,建立客观精准的眼底评估体系对致盲风险分层和个体化干预策略制定具有重要临床意义。

现行临床实践中,近视眼底的客观评估主要依赖眼科医师的定性观察。这种方法面临双重挑战:(1)动态监测需要连续性影像数据支持,而传统方法难以实现量化追踪;(2)多项多中心队列研究证实,不同观察者间诊断一致性仅为65%–78% ($\kappa=0.51-0.63$)^[5],提示主观因素影响数据评估的可靠性。同时,我国每5万人口中仅有1.7名眼科医生^[6],专业资源配置与快速增长的就诊需求间存在显著差距。人工智能(artificial intelligence, AI)技术的突破为破解上述困境提供新思路。基于机器学习(conventional machine learning, CML)和深度学习(deep learning, DL)的AI算法在医学影像分析中展现出显著优势:如在糖尿病视网膜病变筛查中,AI系统特异性达92.2%^[7];在青光眼诊断方面,其AUC值可达0.94^[8]。然而,近视眼底定量分析领域仍存在研究空白。相较于光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)对操作技术和图像解读的高要求,眼底彩照具有便捷、可重复的优势,更适用于大规模筛查。本研究利用多参数协同分析模型,通过整合FT分级、PPA面积测量等定量指标,建立基于眼底彩照的预后评估体系。

本研究首次在宁夏地区开展基于眼底定量分析 AI 系统的高度近视筛查。该系统突破传统定性评估局限,实现 FT 分级、PPA 与视盘面积比值等项关键指标的自动化分析。通过对比分析高度近视患者眼底特征,验证其临床应用可靠性。该模式预计可降低人工筛查成本,为优化公共卫生资源配置提供技术支撑。

1 对象和方法

1.1 对象 采用横断面研究,纳入 2023 年 3 月至 2023 年 12 月自愿参与近视筛查的 18-50 岁患者。纳入标准:(1)等效球镜(spherical equivalent, SE) ≤ -0.50 D;(2)眼底彩照清晰可评价者。排除标准:(1)无法配合眼科检查者;(2)眼底彩照显示合并有其他眼底疾病者;(3)有眼部手术史,如斜视、弱视、视网膜血管疾病等。本研究取得医学伦理委员会审查批准(批准号:2021-KJHM-014),所有参与者均签署知情同意书,研究过程严格遵循《赫尔辛基宣言》相关原则。

1.2 方法 所有患者均采用自动电脑验光仪进行非睫状肌麻痹性自动验光。采用 IOL Master 500 测量 AL 长度,测量 5 次,取平均值。采用全自动免散瞳眼底照相机拍摄以黄斑中心凹为中心的 45°眼底彩色图像。所有眼科检查均由两名经验丰富的眼科医生共同进行操作。采用眼底定量分析 AI 系统进行图像处理。该软件基于仿生视觉原理设计,深度融合计算机视觉和 DL 等图像处理技术。首先通过有效区域(region of interest, ROI)提取、去噪、归一化、增强等预处理操作^[9],剔除非视网膜区域干扰,降低

图像间差异并强化眼底结构特征。随后利用基于 DL 的语义分割网络(如 ResnetFCN、UNet 等模型)精准分割视盘及视网膜血管,结合卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)与计算机视觉技术对分割特征进行智能解析,实现多项参数的自动化定量测量(图 1)。主要分析指标包括:视盘盘沿宽度、视盘直径、视杯直径、杯盘比值(cup-to-disc ratio, C/D)、豹纹斑密度(fundus tessellated density, FTD)、PPA 与视盘面积比值、PPA 与视盘宽度比值、视网膜动静脉管径比值、血管平均弯曲度和血管平均管径。根据 FTD 及 PPA 与视盘宽度比 FT 及盘周 PPA 程度进行分级见表 1。

统计学分析:采用 SPSS 23.0 统计软件进行数据分析。符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,多组间比较采用单因素方差分析,方差齐者组间两两比较采用 LSD-t 法,方差不齐者采用 Tamhane's T2 法。非正态分布的计量资料以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,多组间比较采用 Kruskal-Wallis H 检验,组间两两比较采用 Bonferroni 法(校正后检验水准 $\alpha' = 0.017$)。计数资料以 $n(\%)$ 描述,组间比较采用 χ^2 检验,多组两两比较采用 Bonferroni 法(校正后检验水准 $\alpha' = 0.017$)。采用偏相关分析评估眼底量化指标与 AL、SE 及年龄的相关性,相关性强弱依据 Cohen 标准判断^[10]:偏相关系数 $|r| < 0.1$ 为极弱相关, $0.1 \leq |r| < 0.3$ 为弱相关, $0.3 \leq |r| < 0.5$ 为中等相关, $0.5 \leq |r| < 0.8$ 为强相关, $|r| \geq 0.8$ 为极强相关。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

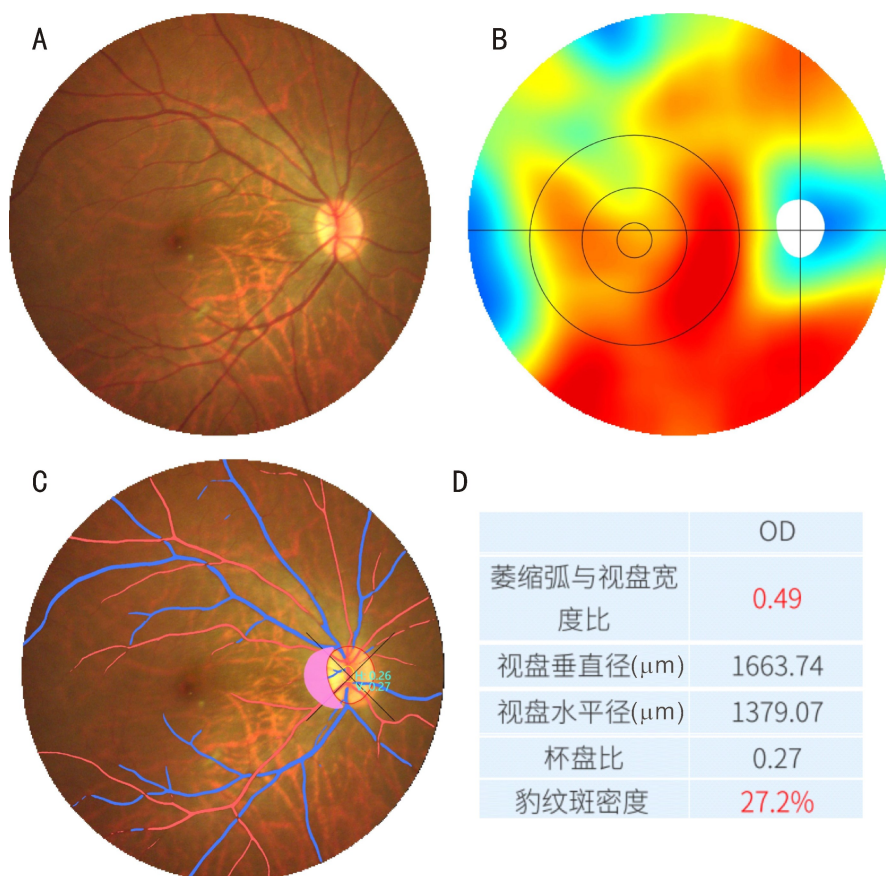


图 1 眼底定量分析 AI 系统识别眼底图像特征示意图 A:高度近视患者眼底彩照;B:眼底豹纹斑热力图,颜色越红的区域代表 FTD 越高;C:眼底视盘及视网膜血管量化图,红色○代表 AI 识别的视盘边界,黄色○代表 AI 识别的视杯边界,紫红色代表 AI 识别的 PPA 区域;蓝色血管为 AI 识别的视网膜静脉,红色血管为 AI 识别的视网膜动脉;H 表示水平杯盘比,V 表示垂直杯盘比;D: AI 自动提取的眼底彩照部分参数。

2 结果

本研究共纳入近视患者 664 例 664 眼(均选取右眼),其中男 320 例,女 344 例,平均年龄 22.70 ± 6.77 岁。

2.1 不同 SE 组患者一般资料比较 依据 2023 年《高度近视专家共识》^[11],根据 SE 将患者分为三组:-3.00 D<SE≤-0.50 D 组 138 例 138 眼、-6.00 D<SE≤-3.00 D 组 273 例 273 眼及 SE≤-6.00 D 组 253 例 253 眼,不同 SE 组患者的性别、年龄比较差异均无统计学意义($P=0.219, 0.221$),

SE、AL 比较差异均有统计学意义($P<0.001$),且任意两组间 SE、AL 比较差异均有统计学意义($P<0.05$),见表 2。

2.2 不同 SE 组患者视盘及视网膜血管形态特征比较 不同 SE 组患者不同象限盘沿宽度及动静脉管径比值比较差异均无统计学意义($P>0.05$),不同 SE 组患者视盘直径、视杯直径、C/D 值、FTD、PPA 与视盘面积比、PPA 与视盘宽度比、血管平均弯曲度及血管平均管径比较差异均有统计学意义($P<0.001$),进一步两两比较结果见表 3。

表 1 FT 及盘周 PPA 程度分级

分级	FT 程度	盘周 PPA 程度
未见明显异常	FTD≤0.08	PPA 与视盘宽度比≤0.16
轻度	0.08<FTD≤0.18	0.16<PPA 与视盘宽度比≤0.33
中度	0.18<FTD≤0.3	0.33<PPA 与视盘宽度比≤0.67
重度	FTD>0.3	0.67<PPA 与视盘宽度比≤1

表 2 不同 SE 组患者一般资料比较

分组	例数(眼数)	性别(男/女,例)	年龄($\bar{x} \pm s$, 岁)	SE($\bar{x} \pm s$, D)	AL($\bar{x} \pm s$, mm)
-3.00 D<SE≤-0.50 D 组	138(138)	74/64	22.50±7.02	-1.82±0.69	24.34±0.89
-6.00 D<SE≤-3.00 D 组	273(273)	122/151	23.23±7.22	-4.51±0.87 ^a	25.36±0.86 ^a
SE≤-6.00 D 组	253(253)	124/129	22.23±6.09	-7.70±1.72 ^{a,c}	26.49±1.12 ^{a,c}
χ^2/F		3.04	1.51	1075.43	228.79
P		0.219	0.221	<0.001	<0.001

注:^a $P<0.05$ vs -3.00 D<SE≤-0.50 D 组;^b $P<0.05$ vs -6.00 D<SE≤-3.00 D 组。

表 3 不同 SE 组患者视盘及视网膜血管形态特征比较

分组	盘沿宽度($\bar{x} \pm s$, μm)			
	上侧	下侧	鼻侧	颞侧
-3.00 D<SE≤-0.50 D 组	470.57±68.62	492.48±79.50	400.10±75.01	357.44±87.76
-6.00 D<SE≤-3.00 D 组	473.47±67.08	489.40±65.25	411.45±80.41	341.35±83.10
SE≤-6.00 D 组	461.09±72.01	481.10±77.43	418.21±82.81	343.56±95.38
F/H	2.20	1.24	2.28	1.60
P	0.112	0.290	0.103	0.202

分组	视盘直径($\bar{x} \pm s$, μm)		视杯直径($\bar{x} \pm s$, μm)		C/D	
	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
-3.00 D<SE≤-0.50 D 组	1412.07±184.88	1705.80±304.04	644.01±203.60	707.54±199.31	0.44±0.11	0.42±0.09
-6.00 D<SE≤-3.00 D 组	1286.20±175.30 ^a	1561.25±177.79 ^a	522.44±178.24 ^a	579.60±185.00 ^a	0.40±0.10 ^a	0.37±0.09 ^a
SE≤-6.00 D 组	1290.39±205.43 ^a	1527.72±190.97 ^a	515.70±182.63 ^a	565.51±179.22 ^a	0.39±0.10 ^a	0.36±0.09 ^a
F/H	23.44	32.23	24.85	29.08	13.24	16.83
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

分组	FTD	PPA 与视盘面积	PPA 与视盘宽度	动静脉管径	血管平均弯曲度	血管平均管径
	[$M(P_{25}, P_{75})$]	比[$M(P_{25}, P_{75})$]	比[$M(P_{25}, P_{75})$]	比值($\bar{x} \pm s$)	[$M(P_{25}, P_{75})$]	[$M(P_{25}, P_{75}), \mu\text{m}$]
-3.00 D<SE≤-0.50 D 组	0.02 (0.00,0.06)	0.19 (0.03,0.33)	0.18 (0.07,0.31)	0.80±0.04	0.0007 (0.0006,0.0007)	75.64 (73.48,78.96)
-6.00 D<SE≤-3.00 D 组	0.05 (0.02,0.08) ^b	0.39 (0.22,0.61) ^b	0.34 (0.21,0.48) ^b	0.79±0.04	0.0007 (0.0006,0.0007)	74.76 (71.89,77.70) ^b
SE≤-6.00 D 组	0.07 (0.03,0.13) ^{b,d}	0.48 (0.32,0.76) ^{b,d}	0.37 (0.27,0.53) ^{b,d}	0.79±0.05	0.0006 (0.0006,0.0007) ^{b,d}	73.43 (71.27,76.73) ^{b,d}
F/H	72.49	105.81	95.54	2.05	31.28	22.86
P	<0.001	<0.001	<0.001	0.131	<0.001	<0.001

注:^a $P<0.05$ vs -3.00 D<SE≤-0.50 D 组;^b $P<0.017$ vs -3.00 D<SE≤-0.50 D 组;^c $P<0.05$ vs -6.00 D<SE≤-3.00 D 组;^d $P<0.017$ vs -6.00 D<SE≤-3.00 D 组。

2.3 不同 AL 组患者一般资料比较 根据 AL 将患者分为三组: AL<24.5 mm 组 133 例 133 眼、24.5 mm ≤ AL<26.5 mm 组 386 例 386 眼、AL ≥ 26.5 mm 组 145 例 145 眼,不同 AL 组患者的性别、年龄比较差异均无统计学意义 ($P=0.091, 0.404$), SE、AL 比较差异均有统计学意义 ($P<0.001$), 且任意两组间 SE、AL 比较差异均有统计学意义 ($P<0.05$), 见表 4。

2.4 不同 AL 组患者视盘及视网膜血管形态特征比较 不同 AL 组患者除颞侧盘沿宽度比较差异无统计学意义 ($P=0.423$) 以外, 其余指标比较差异均有统计学意义 ($P<0.05$), 进一步两两比较结果见表 5。

2.5 视盘及视网膜血管形态学参数与一般资料的偏相关性分析 采用偏相关分析控制 AL、SE 和性别因素后, 动静脉管径比值及血管平均管径与年龄呈负相关, FTD 及 PPA 与视盘面积比与年龄呈正相关 (均 $P<0.05$); 在控制年龄、性别和 SE 后, 盘沿宽度 (上侧、下侧、鼻侧)、动静脉

管径比值、血管平均弯曲度及血管平均管径与 AL 呈负相关, C/D 值、FTD、PPA 与视盘面积比及 PPA 与视盘宽度比与 AL 呈正相关 (均 $P<0.05$); 在控制年龄、性别和 AL 后, 视盘垂直直径、视杯直径、C/D 值及血管平均弯曲度与 SE 呈正相关, 盘沿宽度 (鼻侧)、FTD、PPA 与视盘面积比、PPA 与视盘宽度比及血管平均管径与 SE 呈负相关 (均 $P<0.05$), 见表 6。

3 讨论

高度近视引发的眼轴延长与眼球扩张可诱发一系列特征性眼底形态改变, 包括 FT、PPA、视盘倾斜与扭转等^[12]。对高度近视患者实施规范化定期眼底筛查及早期干预具有重要临床意义: 不仅能有效预防视网膜脱离、视网膜新生血管等严重并发症导致的不可逆视力丧失, 还可助力构建系统性高度近视人群监测管理体系, 从而延缓疾病进展、降低相关眼底病变发生率, 同时优化医疗资源配置。

表 4 不同 AL 组患者一般资料比较

分组	例数(眼数)	性别(男/女,例)	年龄($\bar{x}\pm s$,岁)	SE($\bar{x}\pm s$,D)	AL($\bar{x}\pm s$,mm)
AL<24.5 mm 组	133(133)	58/75	22.04±6.40	-2.51±1.38	23.86±0.48
24.5 mm ≤ AL<26.5 mm 组	386(386)	181/205	22.95±6.93	-5.10±1.81 ^a	25.52±0.54 ^a
AL ≥ 26.5 mm 组	145(145)	81/64	22.63±6.70	-7.77±2.44 ^{a,c}	27.32±0.78 ^{a,c}
χ^2/F		4.80	0.91	266.94	1189.08
P		0.091	0.404	<0.001	<0.001

注:^a $P<0.05$ vs AL<24.5 mm 组 ;^c $P<0.05$ vs 24.5 mm ≤ AL<26.5 mm 组。

表 5 不同 AL 组患者视盘及视网膜血管形态特征比较

分组	盘沿宽度($\bar{x}\pm s$, μ m)			
	上侧	下侧	鼻侧	颞侧
AL<24.5 mm 组	479.61±62.82	496.69±76.18	395.84±78.35	354.33±88.15
24.5 mm ≤ AL<26.5 mm 组	471.33±70.59	491.32±67.37	419.49±78.60 ^a	344.09±87.00
AL ≥ 26.5 mm 组	449.17±68.91 ^a	466.06±81.33 ^a	405.37±84.80	341.32±94.93
F/H	7.79	6.59	4.90	0.86
P	<0.001	<0.05	<0.05	0.423

分组	视盘直径($\bar{x}\pm s$, μ m)		视杯直径($\bar{x}\pm s$, μ m)		C/D	
	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
AL<24.5 mm 组	1357.11±176.36	1670.55±308.77	594.88±197.41	654.89±193.89	0.42±0.11	0.40±0.10
24.5 mm ≤ AL<26.5 mm 组	1303.13±187.87 ^a	1568.36±185.64 ^a	527.69±182.42 ^a	586.78±191.48 ^a	0.40±0.10 ^a	0.37±0.09 ^a
AL ≥ 26.5 mm 组	1309.19±225.95 ^a	1521.12±202.87 ^{a,c}	545.94±204.66 ^a	588.61±191.68 ^a	0.41±0.10	0.38±0.09
F/H	4.74	17.10	6.15	6.60	3.35	4.92
P	<0.05	<0.001	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

分组	FTD	PPA 与视盘面积	PPA 与视盘宽度	动静脉管径	血管平均弯曲度	血管平均管径
	[$M(P_{25}, P_{75})$]	比 [$M(P_{25}, P_{75})$]	比 [$M(P_{25}, P_{75})$]	比值($\bar{x}\pm s$)	[$M(P_{25}, P_{75})$]	[$M(P_{25}, P_{75}), \mu$ m]
AL<24.5 mm 组	0.02 (0.00,0.04)	0.23 (0.07,0.40)	0.24 (0.11,0.35)	0.80±0.04	0.0007 (0.0006,0.0007)	76.42 (74.54,79.25)
24.5 mm ≤ AL<26.5 mm 组	0.05 (0.02,0.08) ^b	0.40 (0.22,0.62) ^b	0.33 (0.21,0.47) ^b	0.80±0.04	0.0006 (0.0006,0.0007) ^b	74.59 (72.02,77.64) ^b
AL ≥ 26.5 mm 组	0.09 (0.05,0.16) ^{b,d}	0.52 (0.31,0.79) ^{b,d}	0.37 (0.25,0.55) ^b	0.77±0.05 ^{a,c}	0.0006 (0.0006,0.0007) ^b	72.55 (70.59,74.63) ^{b,d}
F/H	118.60	58.22	44.10	16.82	25.71	64.03
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注:^a $P<0.05$ vs AL<24.5 mm 组 ;^b $P<0.017$ vs AL<24.5 mm 组 ;^c $P<0.05$ vs 24.5 mm ≤ AL<26.5 mm 组 ;^d $P<0.017$ vs 24.5 mm ≤ AL<26.5 mm 组。

表 6 视盘及视网膜血管形态学参数与一般资料的偏相关性分析结果

参数		AL		SE		年龄	
		r	P	r	P	r	P
盘沿宽度	上侧	-0.096	<0.001	-0.012	0.656	0.031	0.233
	下侧	-0.123	<0.001	-0.035	0.183	0.022	0.414
	鼻侧	-0.116	<0.001	-0.133	<0.001	0.045	0.091
	颞侧	-0.032	0.229	-0.020	0.447	0.020	0.443
视盘直径	水平	-0.043	0.101	0.030	0.251	0.050	0.057
	垂直	-0.050	0.057	0.111	<0.001	0.001	0.995
视杯直径	水平	0.022	0.401	0.103	<0.001	0.020	0.453
	垂直	0.028	0.284	0.125	<0.001	-0.011	0.690
C/D	水平	0.061	0.020	0.124	<0.001	0.006	0.834
	垂直	0.052	0.049	0.103	<0.001	0.021	0.434
FTD		0.230	<0.001	-0.176	<0.001	0.272	<0.001
PPA 与视盘面积比		0.115	<0.001	-0.118	<0.001	0.054	0.042
PPA 与视盘宽度比		0.117	<0.001	-0.107	<0.001	0.035	0.190
动静脉管径比值		-0.139	<0.001	-0.021	0.421	-0.332	<0.001
血管平均弯曲度		-0.064	0.016	0.103	<0.001	0.024	0.360
血管平均管径		-0.224	<0.001	-0.066	0.012	-0.233	<0.001

传统眼底视盘及视网膜血管形态分析软件虽能提供客观定量的测量结果,但依赖经严格培训的操作人员手动完成输入、输出及算法调整,存在学习周期长、分析效率低等固有缺陷。在大规模流行病学调查及临床筛查中,这种人工依赖性不仅会显著增加时间成本,还可能因操作者主观差异引入误差,影响结果的可重复性与可靠性^[13]。近年来,基于 DL 的视盘及视网膜血管分割技术取得突破性进展,其敏感度可达 0.72-0.90^[14],展现出超越传统方法的性能优势。本研究采用的眼底定量分析 AI 系统进一步优化了近视筛查的自动化流程,具备高敏感性、特异性和精确度,能够实现视盘及视网膜血管的准确分割,尤其在 FT 的识别与定量分析中表现突出^[15]。

FT 作为近视性黄斑变性 (myopic macular degeneration, MMD) 的早期特征性改变,不仅是脉络膜变薄的临床标志,还与青光眼、糖尿病视网膜病变及认知功能障碍等眼内及全身疾病密切相关^[16]。流行病学数据显示,我国青少年高度近视人群中 FT 的患病率高达 94.3%^[17],且相较于成人,儿童及青少年出现 FT 后 MMD 进展风险显著升高^[18]。然而,既往缺乏客观量化 FT 改变程度的指标。本研究通过 AI 眼底定量化分析技术,提出 FTD 这一量化指标,为 FT 的客观评估提供了新方向。本研究证实,FTD 随近视度数增加及眼轴增长而增大,这与既往 AI 辅助半自动标记研究结果一致^[19],且量化性能得到显著提升。纵向研究表明,FT 不仅是识别儿童屈光进展高风险的重要指标^[20],更是预测 MMD 发生发展的关键标志^[21],提示 FT 的演变与近视进展及视力预后密切相关,FTD 可作为近视患者眼底进展的特征性观察指标。

年龄是 FT 发展的另一核心驱动因素。本研究偏相关性分析显示,FTD 随年龄增长呈渐进性增大,这与多项大样本研究结果高度一致。Yan 等^[22]的 10 a 纵向队列研究表明,FTD 随年龄增长显著增加;我国一项纳入 14 234 名 4-18 岁近视儿童的研究亦观察到相似趋势^[15]。这种年龄

相关性 FT 的形成,可能与视网膜色素上皮细胞变薄、脉络膜血管退行性改变及脉络膜厚度减少等年龄相关退行性变化密切相关。

本研究显示,随着近视度数及眼轴的增长,PPA 与视盘面积比及 PPA 与视盘宽度比呈进行性增大,这与既往基于 OCT 及人工标注的 PPA 面积和近视严重程度相关的研究结果一致^[23]。已有证据表明,PPA 是近视性黄斑病变的重要危险因素,PPA 面积每增加 1 mm²,近视性萎缩性黄斑病变和新生血管性黄斑病变的发生风险分别升高 22% 和 72%^[24]。本研究通过眼底定量分析 AI 系统实现了 PPA 与视盘面积比及宽度比的精准量化,可作为近视眼底进展的客观监测指标。在控制 SE、AL 等混杂因素后,偏相关性分析显示:PPA 与视盘面积比和年龄存在极弱相关性($r = 0.054, P = 0.042$),这一结果与老年人人群中 PPA 随年龄增长的研究结论相吻合^[25]。我们推测 PPA 与年龄的关联可能呈非线性特征,尤其在老年阶段,二者相关性可能显著增强,这与 PPA 随年龄演变的病理生理规律一致。Hwang 等^[26]进一步发现,近视性 PPA 较老年性 PPA 表现出更严重的光感受器损伤,二者病理机制迥异:前者源于眼球机械性牵拉,后者属于萎缩性改变^[27],与血管密度降低及 RPE-Bruch 膜退行性改变密切相关^[28]。

本研究发现,随着近视度数及眼轴的增长,视盘直径、视杯直径及杯盘比值呈逐渐减小趋势,这与既往 OCT 研究中视盘面积随近视进展及 AL 增长而增大的结论存在差异^[29]。这种差异可能源于视盘形态学评估的方法学偏差:OCT 通过三维断层扫描与重建技术,可校正视盘倾斜、扭转的影响,精准呈现立体结构;而本研究采用的二维眼底彩照受成像原理限制,难以完整反映视盘三维特征。Jonas 等^[30]提出的解剖学机制可解释这一现象:AL 增长导致 Bruch 膜开口(bruch membrane opening, BMO)扩大并向黄斑中心凹移位,伴随视盘扭转与视神经管倾斜,引发视神经管壁三层结构(内层 BMO、中层脉络膜开口、外层

巩膜缘筛板开口)错位,出现视盘颞侧 Bruch 膜缺失、鼻侧 Bruch 膜突出^[31]。此类复杂三维结构变化在二维图像中难以准确识别量化,可能导致视盘呈现垂直椭圆形或表观面积减小。此外,本研究观察到随近视进展及年龄增长,视网膜血管呈拉直、管腔变窄的特征性改变,与既往研究^[32]的结论相印证,进一步证实视网膜血管形态异常是近视病程中伴随年龄增长的典型病理表现。这一现象的发生由多机制共同驱动:(1)眼轴长度的持续增加会对视网膜及脉络膜产生持续性机械牵拉,表现为血管形态复杂降低、管腔被动缩窄^[33];(2)年龄增长带来的视网膜代谢需求生理性下降,会导致血管的营养支持动力不足,进而推动血管发生退行性改变^[34]。且 He 等^[35]基于人工智能技术的精准量化研究,更清晰地揭示了高度近视患者血管病变的阶段规律——病程初期以视网膜血管弯曲度快速下降为核心表现,后期则以血管密度快速降低为主要特征,这一发现为高度近视血管病变的分期机制提供了关键佐证,明确了高度近视进展过程中,视网膜血管形态改变并非单一病理过程,而是呈现初期牵引性病变主导、后期萎缩性病变占优的阶段化特征。

本研究通过眼底定量分析 AI 系统实现高度近视患者眼底特征(FTD、PPA、视盘形态及视网膜血管)的自动化定量分析,提出 FTD 这一量化指标,并探讨其与屈光参数及年龄的关联。结果显示,FTD 随近视度数增加、眼轴增长及年龄增长而升高,可作为监测近视患者眼底进展及预测 MMD 风险的客观指标,在青少年群体中具有特殊应用优势。PPA 与视盘比值随近视进展增大,与近视性黄斑病变风险相关,是有效的监测指标。此外,视网膜血管随近视进展及年龄增长呈现拉直、变窄特征,反映了机械牵拉与年龄相关退行性改变的共同作用。本研究存在一定局限:(1)横断面设计难以阐释眼底改变的动态演变规律;(2)样本以青中年为主,可能限制对年龄特异性特征的全方位评估。基于此,建议未来开展涵盖多年龄段(尤其青少年进展期与老年退行期)的纵向队列研究。综上,AI 辅助眼底定量分析在高度近视眼底病变评估中具有显著优势,FTD 及 PPA 与视盘比值为近视眼底进展监测提供了新型工具,有助于推动大规模筛查与临床干预工作的开展。未来需结合多模态影像技术开展纵向研究,进一步验证上述指标的长期预测价值,为完善高度近视精准防控体系提供依据。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。

作者贡献声明:李婷论文选题与修改,初稿撰写;肖盼盼、顾永华数据整理收集;张芳霞、郭喜珍、陈小琳、杨辉文献检索,数据分析;张爽选题指导,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] Holden BA, Fricke TR, Wilson DA, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050. *Ophthalmology*, 2016,123(5):1036-1042.
[2] 中华医学会眼科学分会眼视光学组,中国医师协会眼科医师分会眼视光专业委员会.低浓度阿托品滴眼液在儿童青少年近视防控中的应用专家共识(2024).*中华眼视光学与视觉科学杂志*,2024,26(9):641-648.
[3] Bourne RR, Stevens GA, White RA, et al. Causes of vision loss

worldwide, 1990-2010: a systematic analysis. *Lancet Glob Health*, 2013,1(6):e339-e349.
[4] Kawashima Y, Hata M, Miyake M, et al. Macular chorioretinal atrophy and visual outcomes in ranibizumab- or aflibercept-treated myopic choroidal neovascularization. *Retina*, 2024,44(1):127-135.
[5] Ilyas G, Burak Ipci F. Validity of the hepple classification used in the diagnosis of talus osteochondral lesions. *J Am Podiatr Med Assoc*, 2025,115(2):22-181.
[6] Wang JD, Chen CX, Liu MR, et al. National-wide survey of ophthalmic human resources in China in 2021. *BMC Health Serv Res*, 2024,24(1):1490.
[7] Meredith S, van Grinsven M, Engelberts J, et al. Performance of an artificial intelligence automated system for diabetic eye screening in a large English population. *Diabet Med*, 2023,40(6):e15055.
[8] Chai RX, Tian N, Wan GY, et al. Automated detection of early-stage osteonecrosis of the femoral head in adult using YOLOv10: Multi-institutional validation. *Eur J Radiol*, 2025,184:111983.
[9] 徐艺,凌赛广,董洲,等.一种基于计算机视觉的眼底图像质量评估系统的开发及应用.*中华眼科杂志*,2020,56(12):920-927.
[10] Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd ed. New York:Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
[11] 中华医学会眼科学分会眼视光学组,中国医师协会眼科医师分会眼视光专业委员会,中国非公立医疗机构协会眼科专业委员会视光学组,等.高度近视防控专家共识(2023).*中华眼视光学与视觉科学杂志*,2023,25(6):401-407.
[12] Shin HJ, Park HL, Ryu HK, et al. Clinical characteristics and associated factors to the development of glaucoma in eyes with myopic optic neuropathy. *Am J Ophthalmol*, 2024,260:160-171.
[13] Project I. On the quantitative effects of compression of retinal fundus images on morphometric vascular measurements in VAMPIRE. *Comput Methods Programs Biomed*, 2021,202:105969.
[14] Chen CH, Chuah JH, Ali R, et al. Retinal vessel segmentation using deep learning: a review. *IEEE Access*, 2021,9:111985-112004.
[15] Gong W, Wang JJ, Deng JJ, et al. Quantification of fundus tessellation reflects early myopic maculopathy in a large-scale population of children and adolescents. *Transl Vis Sci Technol*, 2024,13(6):22.
[16] 潘春杏,周希媛.豹纹状眼底与眼部和全身疾病的相关性及其在人工智能下的识别与量化.*国际眼科杂志*,2024,24(10):1615-1619.
[17] Cheng TY, Deng JJ, Xu X, et al. Prevalence of fundus tessellation and its associated factors in Chinese children and adolescents with high myopia. *Acta Ophthalmol*, 2021,99(8):e1524-e1533.
[18] Tan NYQ, Tham YC, Ding Y, et al. Associations of peripapillary atrophy and fundus tessellation with diabetic retinopathy. *Ophthalmol Retina*, 2018,2(6):574-581.
[19] 董力,周文达,嵒烈,等.基于深度学习技术的豹纹状眼底自动量化及分级初步研究.*中华眼科杂志*,2024,60(3):257-264.
[20] Takahashi A, Ooto S, Yamashiro K, et al. Pachychoroid geographic atrophy: clinical and genetic characteristics. *Ophthalmol Retina*, 2018,2(4):295-305.
[21] Yan YN, Wang YX, Yang Y, et al. Ten-year progression of myopic maculopathy: the Beijing eye study 2001-2011. *Ophthalmology*, 2018,125(8):1253-1263.
[22] Yan YN, Wang YX, Yang Y, et al. Long-term progression and risk factors of fundus tessellation in the Beijing eye study. *Sci Rep*, 2018,8:10625.
[23] 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.

[24] Chen QY, He JN, Hu GY, et al. Morphological characteristics and risk factors of myopic maculopathy in an older high myopia population–based on the new classification system (ATN). Am J Ophthalmol, 2019, 208:356–366.

[25] Matakai N, Tomidokoro A, Araie M, et al. Beta–peripapillary atrophy of the optic disc and its determinants in Japanese eyes: a population–based study. Acta Ophthalmol, 2018,96(6):e701–e706.

[26] Hwang YH, Jung JJ, Park YM, et al. Effect of myopia and age on optic disc margin anatomy within the parapapillary atrophy area. Jpn J Ophthalmol, 2013,57(5):463–470.

[27] Kim TW, Kim M, Weinreb RN, et al. Optic disc change with incipient myopia of childhood. Ophthalmology, 2012,119(1):21–26.e3.

[28] Sun J, Wang JL, You R, et al. Is the retinal vasculature related to β –peripapillary atrophy in nonpathological high myopia an optical coherence tomography angiography study in Chinese adults. J Ophthalmol, 2018,2018:7895238.

[29] AttaAllah HR, Omar IAN, Abdelhalim AS. Evaluation of optic nerve head parameters and retinal nerve fiber layer thickness in axial myopia using SD OCT. Ophthalmol Ther, 2017,6(2):335–341.

[30] 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.

[31] Zhang Q, Xu L, Wei WB, et al. Size and shape of bruch's membrane opening in relationship to axial length, gamma zone, and macular bruch's membrane defects. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2019, 60(7):2591–2598.

[32] Zeng C, Tang C, Tan YX, et al. Compartmental analysis of retinal vascular parameters and thickness in myopic eyes using SS–OCTA. Front Med, 2024,11:1521710.

[33] Tan CS, Hariprasad SM, Lim LW, et al. Evaluation of the retinal and choroidal vasculature with OCT angiography versus conventional angiography. Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina, 2016,47(12):1081–1085.

[34] Yii F, Bernabeu MO, Dhillon B, et al. Retinal changes from hyperopia to myopia: not all diopters are created equal. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2024,65(5):25.

[35] He HL, Liu YX, Liu HR, et al. Deep learning–enabled vasculometry depicts phased lesion patterns in high myopia progression. Asia Pac J Ophthalmol (Phila), 2024,13(4):100086.