科学通报 2026 年 第 71 卷 第 15 期: 3414 ~ 3425
人工智能驱动的数字医疗新实践专题 论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

基于人工智能眼底定量技术量化评估黄斑前膜视网膜血管特征

汤稷旸[1], 姚昱欧[1], 金恩忠[1], 凌赛广[2], 才艺[1], 曾巧珠[1], 赵明威[1], 孙摇遥[1], 苗恒[1*]

1. 北京大学人民医院眼科, 眼病与视光医学北京市重点实验室, 北京 100044
2. 依未科技(北京)有限公司, 北京 100085
* 联系人, E-mail: sawyer_young@sina.com

2025-07-01 收稿, 2025-08-16 修回, 2025-10-16 接受, 2025-10-16 网络版发表
星辰黄斑病公益基金会课题(2159000375)资助

摘要 本研究使用基于人工智能的EVisionAI眼底图像分析系统分析特发性黄斑前膜(ERM)患眼视网膜血管形态特征, 回顾性分析了北京大学人民医院2023年1月~2025年3月的146名ERM患者292只眼的眼底彩照视网膜血管特征. 根据患眼光相干断层眼底扫描检查记录患眼基于连续的异位中心凹内层结构(EIFL)的ERM分期、EIFL厚度及黄斑中心凹视网膜(CFT)厚度. 统计分析视网膜血管形态特征参数的不同ERM分期的组间差异及其与ERM分期的相关性. 结果表明, 单侧ERM患者中, ERM眼较对侧健康眼血管平均分支夹角、血管平均管径、血管平均弯曲度更大, 血管分形维数、血管弓和黄斑夹角更小(P<0.05); 血管分形维数(P=0.004)、血管平均管径(P<0.001)、血管平均弯曲度(P<0.001)与ERM分期相关. 血管分形维数<1.553(OR=7.247, P<0.001)、血管平均管径>61.93 μm (OR=2.277, P=0.013)、血管平均弯曲度>0.893×10^4(OR=5.044, P<0.001)、血管弓和黄斑夹角<88.84°(OR=4.628, P<0.001)是ERM患眼达到ERM 3或4期的危险因素. 本研究探索了各项视网膜血管参数与ERM分期的相关性及更高ERM分期的危险因素, 为利用眼底彩照进行ERM分级、严重程度提供了一种新的建模思路.

关键词 特发性黄斑前膜, 人工智能, 眼底影像, 视网膜血管管径, 血管分形维数

特发性黄斑前膜(idiopathic epiretinal membrane, iERM)是一类在视网膜内界膜(inner limiting membrane, ILM)表面异常纤维细胞增生导致的玻璃体视网膜交界疾病, 文献报道其发病率为2.2%~28.9%, 随年龄增长而上升[1,2]. 早期ERM无明显症状, 随着病情进展患者可出现视物变形及视力下降等症状. 眼底彩照作为一种成本较低、便携易完成的眼底检查已被广泛应用到眼底疾病筛查中. 目前, 使用眼底照相相关的深度学习模型已经可以识别患眼中的ERM, 但目前少有研究对ERM患眼进行眼底参数, 尤其是视网膜血管形态参数的量化评估[3,4], 并根据眼底彩照中的眼底量化指标预测或评估患眼ERM严重程度. 光相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)是临床诊断、评估ERM的金标准. 然而, 因成本较高、仪器便携性差, 在人群中难以开展大规模的OCT筛查, 因此在人群疾病筛查情境下, 难以对ERM患眼的严重程度进行评估. 基于OCT上连续的异位中心凹内层结构(ectopic inner foveal layer, EIFL)的ERM分期是Govetto等人[1]提出的根据ERM患眼黄斑区OCT形态进行的临床分期. 多个研究提示, 存在EIFL, 既ERM分期为3及4期患眼, 玻璃体切割术后视力预后更差[2,5,6]. 因此, 在进行眼底疾病筛查时通过眼底彩照初步评估ERM患眼的严重程度、可能的ERM分期对指导患者后续诊疗有较大的临床意义. 本研究利用人工智能眼底定量技术量化回顾性分析了

引用格式: 汤稷旸, 姚昱欧, 金恩忠, 等. 基于人工智能眼底定量技术量化评估黄斑前膜视网膜血管特征. 科学通报, 2026, 71: 3414–3425
Tang J, Yao Y, Jin E, et al. Quantitative assessment of retinal vascular morphological parameter analyses in eyes with idiopathic epiretinal membrane using artificial intelligence (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3414–3425, doi: 10.1360/CSB-2025-5180

© 2025《中国科学》杂志社

我中心2023年1月~2025年3月的146例ERM患者292眼的视网膜血管形态特征，并探索视网膜血管相关指标与基于EIFL的黄斑前膜分期的相关性，以期为本病的人群筛查、预后评估、人工智能辅助诊断及预后预测提供更多临床依据. 现将结果报道如下.

1 对象和方法

本课题使用回顾性临床研究. 本研究经医院伦理委员会审核(2022PHB032-001)，遵循《赫尔辛基宣言》原则. 本研究纳入北京大学人民医院2023年1月1日~2025年3月31日符合纳入标准及无排除标准的146名ERM患者292只眼. 纳入标准: 临床诊断为单侧或双侧ERM. 排除标准: 纳入患者双眼任意一只眼(1) 合并可能导致继发性ERM的玻璃体视网膜疾病, 如葡萄膜炎、糖尿病视网膜病变、视网膜血管阻塞、视网膜脱离、玻璃体黄斑牵引、脉络膜新生血管、年龄相关性黄斑变性等; (2) 合并全层或板层黄斑裂孔; (3) 除年龄相关性白内障外任何其他影响视力的眼部疾病，如弱视、青光眼、视神经病变或外伤等; (4) 因其他原因接受过玻璃体切割术; (5) 临床和OCT检查可见光感受器层大面积损伤、中心凹下萎缩或瘢痕形成; (6) OCT或眼底彩照图像质量不佳，影响相关参数测量; (7) 眼底彩照未通过EVisionAI系统的图像成像质量评价模块(既被系统判定为“不合格”)[7,8]. 采用美国Carl Zeiss公司Cirrus HD-OCT 5000、美国Optovue公司Avanti RTVue XR 100-2或视微影像(河南)科技有限公司VG200D仪行OCT检查. 以黄斑中心凹为中心进行辐射扫描. 应用设备自带软件测量EIFL和黄斑中心凹厚度(central foveal thickness, CFT). 采用美国Carl Zeiss公司CLARUS 500进行彩色眼底照相(图1). ERM的OCT分期使用Govetto等人[1]提出的基于EIFL的临床分期; EIFL定义为内核层(inner nuclear layer, INL)延伸至内丛状层并跨过中心凹区的连续弱反射和强反射条带，并据此将ERM分为1~4期: 1期: 视网膜层次清晰, 中心凹形态存在; 2期: 外核层增厚, 中心凹陷消失, 视网膜层次清晰; 3期: 中心凹凹陷消失，存在连续的EIFL，视网膜层次清晰; 4期: 存在EIFL, 视网膜各层解剖结构紊乱, 不能识别.

基于人工智能的视网膜血管特征定量分析采用眼底图像分析软件EVisionAI对眼底图像处理; 该软件基于人类视觉仿生机理设计，深度融合计算机视觉和深度学习等图像技术、感兴趣区域(region of interest, ROI)提取、去噪、归一化、增强等预处理操作，去除眼底相上的非视网膜区域并降低图像间的差异性，提升眼底内部特征边缘的锐利度; 该软件采用深度学习目标检测网络ResNet-50对视盘和黄斑定位，获得的黄斑目标检测框的中心点作为黄斑中心[7,9]. 本研究采用EVisionAI测量计算眼底彩照上包括血管平均分支夹角、静脉平均分支夹角、血管分形维数、血管平均管径、黄斑中心凹3 mm范围内平均管径值、黄斑中心凹5 mm范围内平均管径值、血管平均弯曲率、黄斑中心凹5 mm范围内血管弯曲度、动脉平均弯曲度、黄斑中心凹3 mm范围内动脉弯曲度、黄斑中心凹5 mm范围内静脉弯曲度、动脉平均弯曲度、黄斑中心凹3 mm范围内动脉弯曲度、黄斑中心凹5 mm范围内动脉弯曲度、静脉平均弯曲度、黄斑中心凹5 mm范围内静脉弯曲度、血管弓和黄斑夹角、血管弓和黄斑交点距离、视盘到黄斑距离等形态学指标(图2). EVisionAI在包括视网膜血管分割及参数测量等眼底定量指标中的可重复性及可靠性已经过验证，并被应用于对包括高度近视眼底、糖尿病视网膜病变、视网膜静脉阻塞等眼底病变的视网膜及视网膜血管特征分析[10~13]. 血管分形维数体现了一定区域内视网膜血管分支的复杂程度，反映了复杂形体占有空间的有效性，是血管不规则性的量度, 分形维数使用盒计数法计算; 血管平均弯曲度定义为一定区域内，血管中心线上点的曲率的平均值; 血管平均管径定义为一定区域内，血管中心线上的点做垂直于切线方向的直线交于血管壁的距离的平均值.

使用SPSS 26.0软件行统计分析. 计量资料以均数±标准差表示. 连续变量应用Shapiro-Wilk检验进行正态性检验, Levene检验进行方差齐性检验. 符合正态分布及方差齐性, 两组间比较采用独立样本t检验, 多组间比较采用方差分析; 连续变量的配对样本间比较采用配对样本t检验. 不符合正态分布和方差齐性，两组间比较采用Mann-Whitney U检验，多组间比较采用Kruskal-Wallis H检验; 连续变量的配对样本间比较使用Wilcoxon符号秩检验. 分类变量假设检验采用Fisher精确检验. 使用有序多分类回归分析评估自变量与有序分类因变量的相关性. 多组间比较时，组间两两比较，连续变量的多重假设检验的显著性水平使用Bonferroni法校正, P值使用调整后P值表示(使用Bonferroni法调整, 如一共5组数据需进行10次组间两两比较, 则将P值乘以10作为调整后P值，此时调整后P<0.05认为有统计学意义). 使用GraphPad Prism 9.3.0软件对二分类结局及相关因变量制作受试者工作特征曲线(receiver oper-

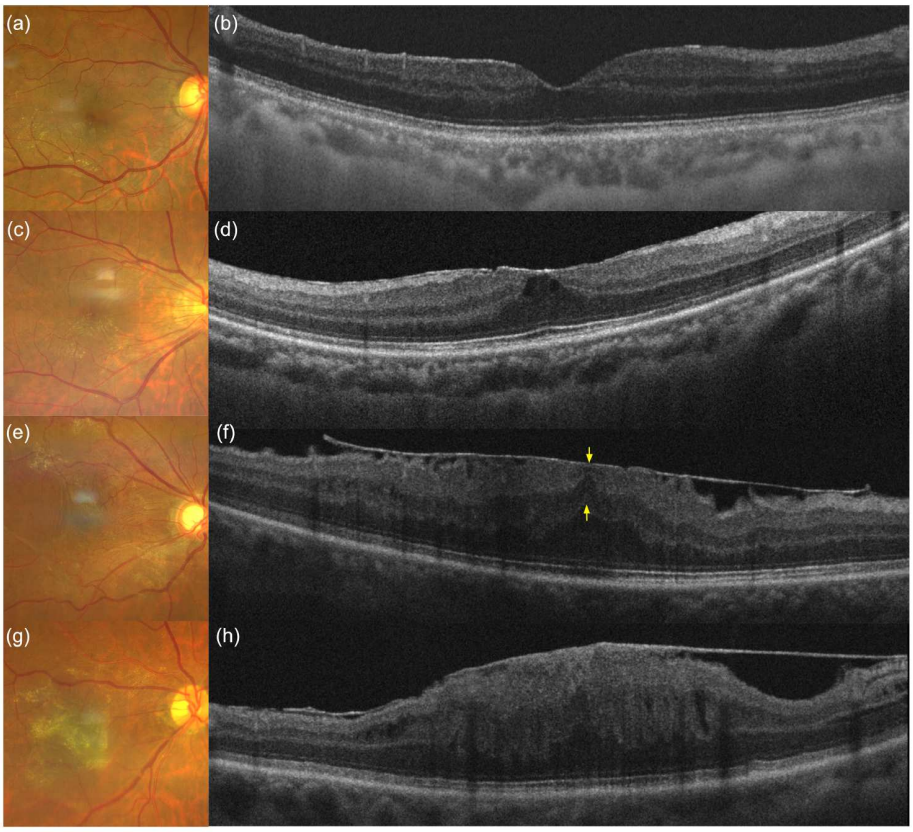


图 1 1~4期ERM眼底彩照及OCT扫描. (a, b) 1期ERM, OCT上可见视网膜前高反射条带, 视网膜结构层次清晰, 黄斑中心小凹存在. (c, d) 2期ERM, OCT上可见黄斑中心小凹消失, 但视网膜结构层次仍清晰. (e, f) 3期ERM, OCT上可见中心凹处视网膜内核及内丛状层增厚病形成连续的弱反射及强反射条带, 既连续的异位中心凹内层结构(EIFL)(黄色箭头标示), 但视网膜层次仍清晰. (g, h) 4期ERM, OCT上可见EIFL, 视网膜明显增厚、各层解剖结构紊乱

Figure 1 Color fundus images and OCT scan images for stage 1–4 ERM. (a, b) Stage 1 ERM, OCT shows epiretinal hyperreflective band, clearly defined retinal layers and preserverd foveal depression. (c, d) Stage 2 ERM, OCT shows loss of foveal depression but clearly defined retinal layers. (e, f) Stage 3 ERM, OCT reveals continuous hypo-and hyper-reflective bands indicating the thickening of inner nuclear layer and inner plexiform layer, defined as continuous ectopic inner foveal layer (EIFL)(indicated with yellow arrow); the retinal layers are still clearly distinguishable. (g, h) Stage 4 ERM, OCT shows EIFL, significantly thickened retina and disordered anatomical structure of retinal layers

ating characteristic curve, ROC曲线)并分析预测指标的敏感度、特异度和临界值双侧检验, $P<0.05$为差异有统计学意义. 本研究使用Python编程语言(v3.10.18)中的scikit-learn机器学习库(v1.7.1)构建对视网膜血管形态及人口学特征预测ERM是否到达3级及以上的二分类模型, 采用集成学习方法随机森林, 评价指标覆盖准确率、精确率、召回率、F1与ROC曲线下面积(area under curve, AUC).

2 结果

本研究共纳入146名ERM患者292只眼. 其中, 男性35例, 女性77例. 年龄66.6±8.0(43.0~89.0)岁; 112名患者诊断单眼ERM, 34名患者诊断双眼ERM. 对比112名单眼ERM患者ERM患眼及对侧眼的视网膜血管特征指标. ERM眼基于EIFL分期分为1期2例, 2期19例, 3期71例, 4期20例. 将112名患者ERM眼及正常对侧眼的视网膜血管特征参数进行配对比较. ERM眼较对侧眼血管平均分支夹角更大($P=0.037$)、血管分形维数更小($P<0.001$)、血管平均管径更大($P<0.001$)、血管平均弯曲度更大($P<0.001$)、血管弓和黄斑夹角更小($P<0.001$); 动脉平均分支夹角、黄斑中心凹3 mm范围内血管弯曲度、黄斑中心凹3 mm范围内静脉弯曲度、黄斑视盘连线夹角、视盘黄斑连线与视盘最长轴夹角无组间统计学差异(表1).

将所有146名患者292眼分为ERM 1~4期及无ERM眼分组, 分析不同ERM分期视网膜血管特征指标的差

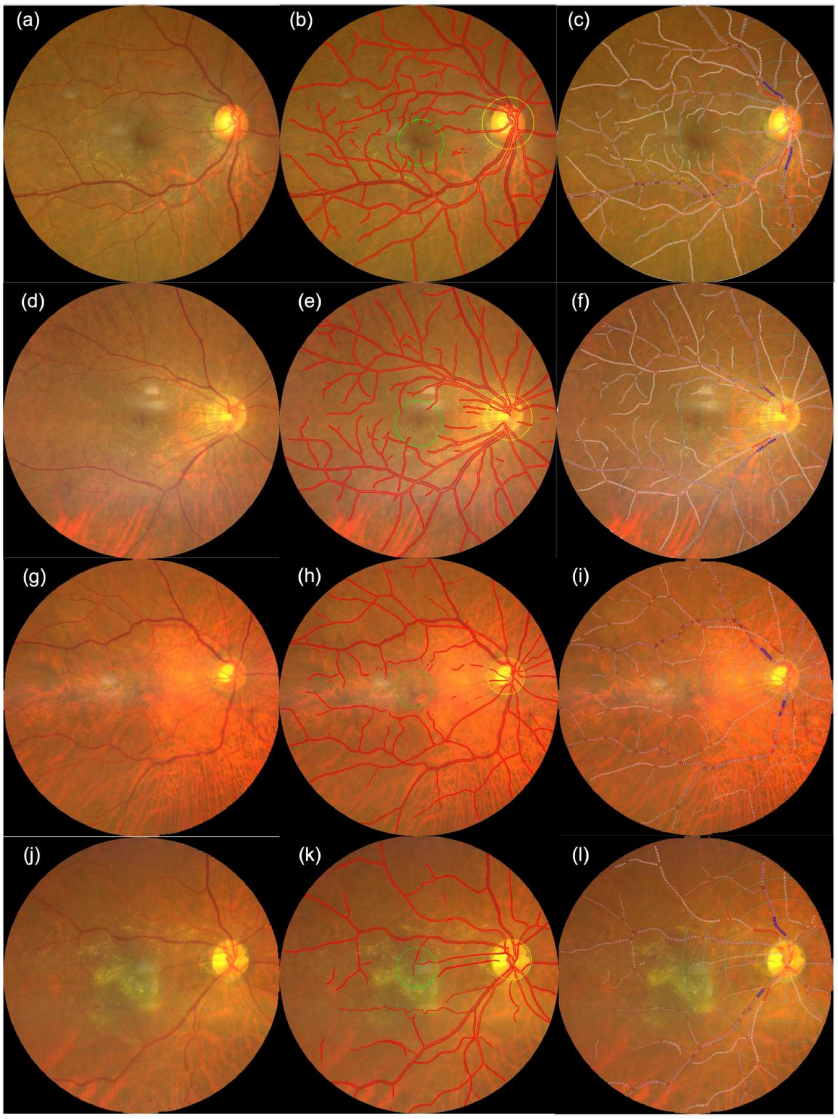


图 2 眼底彩图及其血管分析示意图. 左图为眼底彩照原图, 中图为视网膜血管识别结果, 右图为视网膜血管分析示意图, 在视网膜血管识别结果基础上, 蓝色标注示意该血管被识别为静脉, 红色标注示意该血管识别为动脉, 白色标注为计算血管管径所取位置, 每间隔10个像素取血管两端的点, 连线为该点的血管管径. (a~c) 1期ERM患眼; (d~f) 2期ERM患眼; (g~i) 3期ERM患眼; (j~l) 4期ERM患眼

Figure 2 Color fundus images and vascular morphological analyses. Left images showed original color fundus photographs, middle images showed results of identification of retinal vasculature by EVision AI, right images showed analyses of retinal vasculature by EVision AI; blue vessels were identified as veins, red vessels were identified as arteries, white lines marked locations used to calculate the vessel diameter, points on vessels were selected at ten-pixel interval, the length of the line between two points were calculated to be the diameter of the retinal vessel at aforementional points. (a–c) Stage 1 ERM eye; (d–f) stage 2 ERM eye; (g–i) stage 3 ERM eye; (j–l) stage 4 ERM eye

异(表2). 如患者双眼均诊断ERM, 则随机选取其中一眼纳入统计, 统计共纳入258只眼. 性别、年龄、2型糖尿病、高血压病、冠状动脉粥样硬化性心脏病、陈旧性脑梗死均无组间显著差异. 无ERM和1期ERM(调整后P=0.428)、2期和3期ERM(调整后P=1.000)、3期和4期ERM(调整后P=0.113)无组间差异, 其余各组间CFT均有显著差异(调整后P<0.05). 3期ERM(调整后P<0.001)及4期ERM(调整后P<0.001)较无ERM眼血管分形维数显著降低, 其余各组间无显著差异; 2期ERM较无ERM眼血管分形维数较低, 尽管这种差异无显著统计学意义(调整后P=0.074). 3期ERM(调整后P<0.001)及4期ERM(调整后P<0.001)较无ERM眼血管平均管径显著增加; 3期ERM(调整后P=0.001)及4期ERM(调整后P=0.004)较1期ERM眼血管平均管径显著增加; 其余各

表 1 ERM眼及对侧眼视网膜血管特征指标[a)]

Table 1 Retinal vascular parameters for ERM eyes and healthy contralateral eyes

	ERM眼(n=112)	对侧眼(n=112)	P
血管平均分支夹角(度)	68.65±4.50(53.48~78.19)	67.53±5.03(53.19~80.66)	0.037*
动脉平均分支夹角(度)	72.85±7.98(50.28~88.39)	71.32±9.52(45.23~85.45)	0.248†
静脉平均分支夹角(度)	67.50±5.22(51.68~78.97)	65.75±6.06(46.22~78.34)	0.013†
血管分形维数	1.52±0.04(1.34~1.59)	1.55±0.04(1.35~1.62)	<0.001†
血管平均管径(μm)	65.77±9.62(37.67~101.22)	58.85±6.98(45.90~85.29)	<0.001†
黄斑中心凹3 mm范围内平均管径值(μm)	60.02±9.78(41.61~103.01)	50.39±6.07(39.63~71.70)	<0.001†
黄斑中心凹5 mm范围内平均管径值(μm)	70.18±9.32(40.18~106.72)	63.01±6.34(51.35~91.15)	<0.001†
血管平均弯曲度($\times10^4$)	0.98±0.18(0.67~1.60)	0.91±0.15(0.66~1.31)	<0.001†
黄斑中心凹3 mm范围内血管弯曲度($\times10^4$)	1.34±0.36(0.53~2.68)	1.27±0.26(0.72~1.91)	0.066†
黄斑中心凹5 mm范围内血管弯曲度($\times10^4$)	1.05±0.21(0.65~1.65)	0.98±0.17(0.68~1.45)	<0.001†
动脉平均弯曲度($\times10^4$)	0.83±0.20(0.54~1.49)	0.77±0.19(0.52~1.43)	<0.001†
黄斑中心凹3 mm范围内动脉弯曲度($\times10^4$)	1.04±0.47(0.53~2.74)	0.98±0.31(0.49~2.26)	0.005†
黄斑中心凹5 mm范围内动脉弯曲度($\times10^4$)	0.88±0.22(0.52~1.61)	0.81±0.22(0.49~1.63)	<0.001†
静脉平均弯曲度($\times10^4$)	1.11±0.21(0.72~1.82)	1.04±0.16(0.73~1.62)	0.003†
黄斑中心凹3 mm范围内静脉弯曲度($\times10^4$)	1.51±0.44(0.49~2.94)	1.55±0.32(0.87~2.89)	0.155†
黄斑中心凹5 mm范围内静脉弯曲度($\times10^4$)	1.19±0.25(0.67~1.92)	1.13±0.19(0.77~1.71)	0.028†
血管弓和黄斑夹角(度)	80.62±10.01(60.62~109.27)	90.00±8.96(63.91~106.45)	<0.001†
血管弓和黄斑交点距离(μm)	7367.73±1247.11 (5276.40~11057.45)	8447.34±1197.47 (5503.25~10874.30)	<0.001†
视盘到黄斑距离(μm)	4322.83±417.96(2077.23~5703.81)	4185.76±213.79(3821.76~5074.06)	<0.001†
黄斑视盘连线夹角(度)	8.72±4.85(–1.84~26.21)	9.32±4.21(–1.36~18.83)	0.304†
视盘黄斑连线与视盘最长轴夹角(度)	56.73±24.91(4.17~89.63)	56.00±25.24(1.84~89.63)	0.846†
CFT(μm)	500±99(230~776)	214±25(169~289)	<0.001†

a) *, 配对t检验; †, Wilcoxon符号秩检验

组间无显著差异. 2期ERM(调整后P=0.002)、3期ERM(调整后P<0.001)及4期ERM(调整后P<0.001)较无ERM眼黄斑中心凹3 mm范围内血管平均管径显著增加; 3期ERM(调整后P<0.001)及4期ERM(调整后P<0.001)较1期ERM眼黄斑中心凹3 mm范围血管平均管径显著增加; 其余各组间无显著差异. 2期ERM(调整后P=0.011)、3期ERM(调整后P<0.001)及4期ERM(调整后P<0.001)较无ERM眼黄斑中心凹5 mm范围内血管平均管径显著增加; 3期ERM(调整后P<0.001)及4期ERM(调整后P=0.002)较1期ERM眼黄斑中心凹5 mm范围血管平均管径显著增加; 2期ERM较1期ERM眼黄斑中心凹5 mm范围血管平均管径增加, 尽管这种差异无显著统计学意义(调整后P=0.056); 其余各组间无显著差异. 3期ERM(调整后P=0.038)较无ERM眼血管平均弯曲度显著增加, 其余各组间无显著差异. 3期ERM(调整后P=0.055)较无ERM眼黄斑中心凹5 mm范围内血管平均弯曲度增加, 但无统计学显著意义, 各组间均无显著差异. 4期ERM(调整后P=0.028和0.045)较无ERM眼动脉平均弯曲度、黄斑中心凹5 mm范围内动脉弯曲度增加; 其余各组间无显著差异. 4期ERM(调整后P<0.001)及3期ERM(调整后P<0.001)较无ERM血管弓和黄斑夹角显著减小; 其余各组间无显著差异. 4期ERM(调整后P<0.001)及3期ERM(调整后P<0.001)较无ERM眼血管弓和黄斑交点距离显著增加; 2期ERM较无ERM眼血管弓和黄斑交点距离增加, 尽管这种差异无显著统计学意义(调整后P=0.052); 其余各组间无显著差异. 4期ERM(调整后P=0.002)及3期ERM(调整后P=0.007)较无ERM眼、4期ERM较1期ERM眼(调整后P=0.027)视盘到黄斑距离显著增加; 4期ERM较2期ERM眼视盘到黄斑距离增加, 尽管这种差异无显著统计学意义(调整后P=0.054); 其余各组间无显著差异. 血管平均分支夹角、动脉平均分支夹角、静脉平均分支夹角、黄斑中心凹3 mm范围内血管弯曲度及动脉弯曲度、静脉平均弯曲度、黄斑中心凹3 mm及5 mm范围内静脉弯曲度、黄斑视盘连线夹角及视盘黄斑连线与视盘最长轴夹角无显著组间差异.

表 2　不同ERM分期视网膜血管特征指标[a)]

Table 2　Retinal vascular morphological parameters for different ERM stages

	无ERM(*n*=112)	1期ERM(*n*=25)	2期ERM(*n*=24)	3期ERM(*n*=71)	4期ERM(*n*=26)	*P*值
男性/女性	35/77	11/14	9/15	19/52	11/15	0.387*
年龄(岁)	66.7±8.0(43.0~89.0)	68.0±9.1(48.0~82.0)	67.3±7.42 (50.0~83.0)	67.4±7.4(54.0~89.0)	65.3±9.3(43.0~80.0)	0.874†
合并2型糖尿病	23(29.9%)	3(12.0%)	7(29.2%)	15(21.1%)	3(11.5%)	0.505*
合并高血压病	51(45.5%)	8(32.0%)	13(54.2%)	34(47.9%)	7(26.9%)	0.196*
合并冠状动脉粥样硬化性心脏病	8(7.1%)	1(4.0%)	1(4.2%)	7(9.9%)	0(0.0%)	0.571*
合并陈旧性脑梗死	3(2.7%)	0(0.0%)	2(8.3%)	1(1.4%)	0(0.0%)	0.399*
CFT(μm)	214.0±24.6 (169.0~289.0)	237.5±30.9 (187.0~323.0)	420.4±74.4 (292.0~605.0)	492.6±73.4 (309.0~652.0)	618.7±69.5 (458.0~776.0)	<0.001†
EIFL厚度(μm)	–	–	–	131.9±72.2 (37.0~397.0)	266.4±94.4 (147.0~503.0)	<0.001‡
血管平均分支夹角	67.53±5.03 (53.19~80.66)	66.90±6.95 (51.14~77.63)	69.19±4.84 (59.83~77.75)	69.01±4.20 (59.86~78.19)	68.03±5.28 (53.48~77.41)	0.162§
动脉平均分支夹角	71.97±9.52 (50.41~85.45)	71.67±7.99 (50.56~84.16)	75.18±5.29 (65.29~86.87)	72.70±8.00 (50.28~88.39)	73.37±8.39 (52.50~85.86)	0.244†
静脉平均分支夹角	65.78±6.07 (46.22~78.34)	65.24±6.45 (48.80~80.98)	67.20±5.92 (56.85~77.72)	68.05±4.75 (59.56~78.97)	66.12±5.79 (51.68~76.53)	0.181†
血管分形维数	1.551±0.041 (1.346~1.623)	1.533±0.046 (1.398~1.590)	1.531±0.043 (1.384~1.585)	1.527±0.032 (1.418~1.588)	1.516±0.046 (1.344~1.567)	<0.001†
血管平均管径(μm)	58.85±6.98 (45.90~85.29)	58.39±6.02 (49.64~73.70)	63.36±8.29 (47.92~86.61)	66.30±10.17 (37.67~101.22)	66.65±8.82 (53.05~90.13)	<0.001†
黄斑中心凹3 mm范围内平均管径值	50.39±6.07 (39.63~71.70)	51.42±6.42 (40.58~70.33)	57.86±9.42 (46.63~84.72)	60.56±10.47 (41.61~103.01)	61.81±8.94 (44.90~80.78)	<0.001†
黄斑中心凹5 mm范围内平均管径值	63.01±6.34 (51.35~91.14)	62.48±6.54 (53.23~79.73)	68.18±7.52 (53.02~88.70)	70.84±10.06 (40.18~106.72)	70.44±8.14 (53.19~90.15)	<0.001†
血管平均弯曲度($\times10^4$)	0.915±0.149 (0.657~1.313)	0.918±0.1578 (0.696~1.371)	0.951±0.166 (0.752~1.344)	0.994±0.188 (0.668~1.601)	0.987±0.122 (0.780~1.300)	0.014†
黄斑中心凹3 mm范围内血管弯曲度($\times10^4$)	1.273±0.264 (0.716~1.912)	1.247±0.283 (0.792~1.963)	1.273±0.312 (0.896~2.197)	1.358±0.376 (0.533~2.678)	1.326±0.293 (0.820~2.020)	0.411†
黄斑中心凹5 mm范围内血管弯曲度($\times10^4$)	0.978±0.173 (0.678~1.447)	0.977±0.177 (0.797~1.531)	1.014±0.186 (0.785~1.498)	1.064±0.223 (0.651~1.646)	1.050±0.144 (0.814~1.415)	0.026†
动脉平均弯曲度($\times10^4$)	0.771±0.190 (0.523~1.426)	0.773±0.168 (0.573~1.199)	0.804±0.171 (0.567~1.192)	0.833±0.214 (0.543~1.493)	0.857±0.147 (0.636~1.282)	0.021†
黄斑中心凹3 mm范围内动脉弯曲度($\times10^4$)	0.983±0.313 (0.495~2.256)	0.979±0.270 (0.598~1.577)	0.967±0.242 (0.679~1.408)	1.154±0.423 (0.518~2.740)	0.996±0.291 (0.383~1.612)	0.053†
黄斑中心凹5 mm范围内动脉弯曲度($\times10^4$)	0.810±0.219 (0.493~1.627)	0.812±0.181 (0.630~1.232)	0.845±0.184 (0.567~1.193)	0.887±0.256 (0.524~1.611)	0.908±0.170 (0.637~1.293)	0.024†
静脉平均弯曲度($\times10^4$)	1.043±0.164 (0.731~1.622)	1.041±0.216 (0.814~1.749)	1.084±0.213 (0.805~1.694)	1.121±0.211 (0.720~1.819)	1.086±0.168 (0.866~1.538)	0.096†
黄斑中心凹3 mm范围内静脉弯曲度($\times10^4$)	1.547±0.324 (0.871~2.885)	1.463±0.441 (0.939~2.853)	1.522±0.426 (0.996~2.936)	1.494±0.422 (0.488~2.678)	1.524±0.445 (0.870~2.669)	0.276†
黄斑中心凹5 mm范围内静脉弯曲度($\times10^4$)	1.126±0.187 (0.772~1.709)	1.114±0.244 (0.840~1.906)	1.162±0.240 (0.797~1.871)	1.203±0.266 (0.668~1.924)	1.163±0.207 (0.901~1.673)	0.172†
血管弓和黄斑夹角(度)	90.004±8.956 (63.906~106.451)	85.021±9.037 (71.470~99.620)	83.977±10.334 (61.438~97.871)	80.915±10.520 (60.624~109.265)	77.534±9.497 (59.779~97.252)	<0.001†
血管弓和黄斑交点距离(μm)	8447.35±1197.47 (5503.25~10874.30)	7742.96±1285.57 (5792.26~10349.60)	7549.30±1113.87 (5795.33~9722.53)	7396.54±1358.88 (5276.40~11057.45)	7197.856±1131.77 (5403.66~10057.93)	<0.001†
视盘到黄斑距离(μm)	4185.76±213.79 (3821.76~5074.06)	4173.74±224.58 (3827.01~4773.99)	4189.09±297.999 (3470.86~5022.78)	4310.95±444.46 (2077.23~5703.81)	4473.43±403.47 (3952.98~5513.89)	<0.001†
黄斑视盘连线夹角(度)	9.32±4.21 (−1.36~18.83)	7.69±4.70 (−0.34~16.70)	8.35±4.51 (−1.84~18.26)	8.86±5.13 (−1.41~26.21)	8.92±3.86 (1.23~19.68)	0.542†
视盘黄斑连线与视盘最长轴夹角(度)	56.00±25.24 (1.84~89.63)	57.08±29.14 (0.09~89.52)	55.38±24.50 (7.15~85.25)	56.05±25.02 (6.59~89.63)	60.23±24.77 (4.17~87.59)	0.918†

a) *, Fisher精确检验; †, Kruskal-Wallis H检验; ‡, Mann-Whitney U检验; §, ANOVA统计

以ERM分期0~4期为因变量，性别、年龄、合并2型糖尿病、高血压病、冠状动脉粥样硬化性心脏病、陈旧性脑梗死、血管平均分支夹角、血管分形维数、血管平均管径、血管平均弯曲度、血管弓和黄斑夹角、血管弓和黄斑交点距离、视盘到黄斑距离、视盘黄斑连线与视盘最长轴夹角为自变量，行有序多分类回归分析. 年龄(P=0.716)、性别(P=0.601)、2型糖尿病(P=0.177)、高血压病(P=0.632)、冠状动脉粥样硬化性心脏病(P=0.289)、陈旧性脑梗死(P=0.939)、血管平均分支夹角(P=0.168)、血管弓和黄斑夹角(P=0.761)、血管弓和黄斑交点距离(P=0.684)、黄斑视盘连线夹角(P=0.411)及视盘黄斑连线与视盘最长轴夹角(P=0.658)与ERM分期无显著相关性；血管分形维数(P=0.004，系数估计值–9.7753)、血管平均管径(P<0.001，系数估计值0.064)、血管平均弯曲度(P<0.001，系数估计值2.882)与ERM分期相关.

对血管分形维数、血管平均管径、黄斑中心凹3和5 mm范围内血管平均管径、血管平均弯曲度、黄斑中心凹3和5 mm范围内血管弯曲度、血管弓和黄斑夹角预测患眼是否达到ERM 3或4期的性能进行评价做ROC曲线，取约登指数最大的拐点作为最佳临界点(cut-off值); AUC、敏感度、特异度及cut-off值见表3.

将性别、年龄、合并2型糖尿病、高血压病、冠状动脉粥样硬化性心脏病、陈旧性脑梗死、血管平均分支夹角、血管弓和黄斑交点距离、视盘到黄斑距离、视盘黄斑连线与视盘最长轴夹角、血管分形维数<1.553、血管平均管径>61.93、血管平均弯曲度>0.893、血管弓和黄斑夹角<88.84为自变量, ERM分期是否达到3或4期为二分类因变量，二分类Logistic回归分析(Forward: LR法)，模型中有统计学意义的自变量及对应回归系数、比值比见表4，模型Nagelkerke R^2=0.444(P<0.001), 敏感度88.2%, 特异度59.8%.

使用Python构建对视网膜血管形态及人口学特征预测ERM是否到达3级及以上的二分类模型, 采用集成学习方法随机森林. 纳入特征包括: 人口学特征性别、年龄、合并糖尿病、合并高血压病、合并冠心病、合并脑梗. 视网膜血管特征: 血管平均分支夹角、血管分形维数、血管平均管径、黄斑中心凹3 mm范围内平均管径、黄斑中心凹5 mm范围内平均管径、血管平均弯曲率、黄斑中心凹3 mm范围内血管弯曲度、黄斑中心凹5 mm范围内血管弯曲度、动脉平均弯曲度、黄斑中心凹3 mm范围内动脉弯曲度、黄斑中心凹5 mm范围内动脉弯曲度、静脉平均弯曲度、黄斑中心凹3 mm范围内静脉弯曲度、黄斑中心凹5 mm范围内静脉弯曲度、血管弓和黄斑夹角、血管弓和黄斑交点距离、视盘到黄斑距离、黄斑视盘连线夹角、视盘黄斑连线与视盘最长轴夹角. 采用分层随机抽样(stratify=y)按8:2切分, 固定random_state=42保证可复现. 划分后训练集

表 3 血管特征参数预测患眼是否达到ERM 3或4期的ROC曲线性能评价指标

Table 3 ROC for prediction of stage 3 or 4 ERM using retinal vascular morphological parameters

自变量	AUC(95%置信区间)	敏感度	特异度	cut-off值	P
血管分形维数	0.709(0.647~0.771)	88.7%	52.8%	<1.553	<0.001
血管平均管径(μm)	0.783(0.729~0.837)	73.7%	69.6%	>61.93	<0.001
黄斑中心凹3 mm范围内平均管径值(μm)	0.796(0.739~0.853)	73.2%	75.8%	>54.85	<0.001
黄斑中心凹5 mm范围内平均管径值(μm)	0.754(0.693~0.816)	62.9%	80.8%	>68.16	<0.001
血管平均弯曲度($\times10^4$)	0.627(0.556~0.697)	74.2%	49.7%	>0.893	<0.001
黄斑中心凹3 mm范围内血管弯曲度($\times10^4$)	0.570(0.496~0.644)	–	–	–	0.060
黄斑中心凹5 mm范围内血管弯曲度($\times10^4$)	0.620(0.549~0.691)	53.6%	67.7%	>1.032	0.001
血管弓和黄斑夹角(度)	0.729(0.663~0.794)	83.7%	53.8%	<88.84	<0.001

表 4 血管特征参数预测患眼是否达到ERM 3或4期的二分类Logistic回归分析

Table 4 Binary logistic regression analysis for prediction of stage 3 or 4 ERM using retinal vascular morphological parameters

自变量	回归系数	比值比(95%置信区间)	标准误	P
血管分形维数<1.553	1.981	7.247(3.286~15.983)	0.404	<0.001
血管平均管径>61.93(μm)	0.823	2.277(1.192~4.348)	0.330	0.013
血管平均弯曲度>0.893($\times10^4$)	1.618	5.044(2.527~10.068)	0.353	<0.001
血管弓和黄斑夹角<88.84(度)	1.532	4.628(2.241~9.556)	0.370	<0.001

206(–129,+77)，测试集52(–32,+20)，正负比例分别为62.6%:37.4%与61.5%:38.5%，与总体分布几乎一致，避免因抽样导致类别漂移. 由于各特征量纲差异大，使用StandardScaler对训练集进行标准化处理. 随机森林模型测试AUC 0.808，准确率75.9%，召回率70.0%，精确率66.7%, F1 0.683; 交叉验证AUC 0.828±0.080. 进一步分析随机森林模型中的特征重要性，前20位重要特征见图3.

3 讨论

本研究验证了基于人工智能的EVisionAI眼底图像分析系统在视网膜血管形态特征参数定量分析中的准确性, 并证实这些参数可作为黄斑前膜(ERM)分期的客观定量指标. 该研究拓展了人工智能眼底定量分析技术在视网膜疾病诊疗中的应用价值.

在临床实践中，ERM严重程度评估是制定手术方案和预测预后的关键因素. 传统评估主要依赖于OCT技术, 但受限于设备成本及可及性, 其临床应用范围远不及眼底照相技术. 既往研究表明, ERM患者的视网膜血管形态存在特征性改变: Chen等人[14]通过眼底照相发现ERM眼的视网膜动脉分形维数和血管密度显著降低, 同时静脉弯曲度和管径显著增加. Kitagawa等人[15]采用光学相干断层扫描血管成像(optical coherence tomography angiography, OCTA)的研究进一步证实，在3 mm×3 mm黄斑区图像中，血管直径增大、骨架密度降低、分形维数下降及血管弯曲度改变与ERM严重程度及视力损害显著相关. 然而, 传统眼底照相的血管参数测量依赖人工操作，存在精确度不足和效率低下等局限性. 随着人工智能技术的发展, 基于AI的血管参数测量不仅显著提高了分析的精确性和效率，更能获取传统方法难以测量的多维参数. 本研究证实，EVisionAI系统可精准量化包括血管平均分支夹角、分形维数及平均管径在内的多种血管形态学特征，为眼底参数分析提供了更为精确的技术手段. 在本研究中, 黄斑中心凹3 mm范围内的血管弯曲度不能很好地预测ERM的严重程度，但平均血管弯曲度仍与ERM的分期相关, 这一差异可能与眼底照相及OCTA对视网膜血管的分辨率不同有关, OCTA可以评估更小管径的视网膜微血管. 与本研究使用眼底照相评估ERM眼视网膜血管特征指标不同的是，既往研究多使用OCT及en face

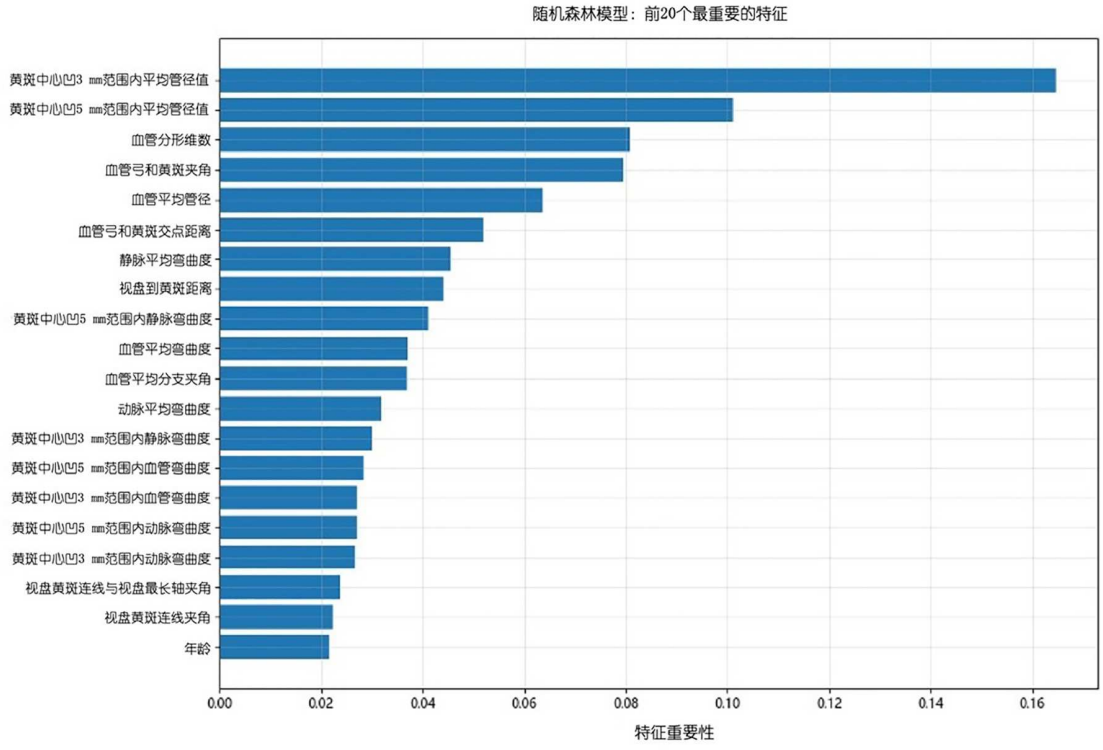


图 3 (网络版彩色)随机森林模型前20个最重要的特征
Figure 3 (Color online) 20 most important features in random forest model

OCTA评估ERM眼的血管特征指标, 且由于OCTA的检查范围限制, 既往研究多关注与黄斑中心凹无血管区(foveal avascular zone, FAZ)相关的血管特征指标: 既往研究提示, ERM患眼玻璃体切割术后3 mm×3 mm OCTA上的FAZ面积较术前减少, FAZ可能作为一个指标提示ERM的手术时机[15]. 术后的患眼视物影像不等水平与术前的FAZ面积相关[16], 术前EZ连续的患眼, 术后视力提高程度与术前FAZ周长相关[17]; OCTA上的血管密度、灌注密度与BCVA负相关、FAZ面积与BCVA正相关[18,19]; 这些研究都提示术前FAZ相关指标或许可用于预测ERM患眼术后功能的一个指标. 与使用OCTA评估ERM患眼视网膜血管指标相比, 使用眼底照相的优势是图像更易获取, 但en face OCTA对黄斑区视网膜血管的识别较眼底照相更为敏感.

本研究对视网膜血管形态指标与ERM分期严重程度的相关性进行分析, 探索了视网膜血管特征指标预测ERM分期的可行性. 既往的研究提示, EIFL的存在提示更差的术后功能及结构预后[2,5,6,20]. 在基于EIFL的ERM分期与视网膜血管特征的相关研究中, Yu等人[18]发现在3 mm×3 mm OCTA上有EIFL的ERM眼视网膜血管密度、灌注密度较无EIFL的ERM眼显著增加; 本研究将有EIFL的ERM(即ERM 3及4期)作为因变量, 评估了视网膜血管特征指标预测研究眼ERM是否有EIFL(即达到3及4期)的性能, 本研究中黄斑中心凹3 mm范围内血管平均管径预测患眼达到ERM 3或4期的ROC曲线下面积0.796, cut-off值为>54.85, 敏感度73.2%, 特异度75.8%, 预测性能尚可; 血管分形维数<1.553(OR=7.247, P<0.001)、血管平均管径>61.93 μm (OR=2.277, P=0.013)、血管平均弯曲度>0.893×10^4 (OR=5.044, P<0.001)、血管弓和黄斑夹角<88.84° (OR=4.628, P<0.001)是ERM患眼达到ERM 3或4期的危险因素. 研究为横断面研究, 仅分析了视网膜血管指标与ERM分期严重陈低估的相关性, 未对患眼病程进展、手术前后的相关视网膜血管指标变化进行分析, 本研究为未来使用视网膜血管特征指标预测ERM患眼手术功能及解剖预后提供思路及基础, 未来尚需更多关于ERM患眼视网膜血管特征指标与手术预后的更大样本量的前瞻性研究.

ERM的牵拉力量可导致ERM患眼视网膜血管相关指标包括视网膜血管分形维数、血管管径、血管弯曲度等指标的改变[21], ERM的牵拉力量在视网膜表面呈不均匀分布, 导致视网膜血管的形态出现变化, 导致视网膜血管管径、血管弯曲度发生改变; 同时机械压迫或牵拉进一步改变了血流动力学、减少局部血流及灌注、损伤视网膜毛细血管、小血管, 导致血管分形维数降低[21,22]. Coppe等人[23]通过对单眼ERM患者的ERM眼和对侧无ERM眼与正常对照眼比较OCTA上的浅层毛细血管丛(superficial capillary plexuses, SCP)和深层毛细血管丛(deep capillary plexuses, DCP)的血流测量数值, 发现ERM眼及对侧眼的黄斑、黄斑外区域SCP及DCP的血流量均低于健康对照, 提示ERM患眼的血管异常可能早于视网膜内界膜的结构改变, 这种局部的血流降低改变可能导致视网膜相对缺氧、促进Müller细胞和星形细胞增生, 进一步参与异常玻璃体后脱离、ERM发生. 因此, 对ERM视网膜血管形态及功能改变的研究也有助于对ERM发病机制的研究. 本研究主要关注于视网膜血管的形态学指标, 但因本研究仅对研究眼进行单次眼底照相, 无法评估视网膜血管功能相关指标, 既往研究中, Chen等人[14]使用不同570和610 nm波长的光获取波长依赖眼底相, 氧化血红蛋白和去氧化血红蛋白对570和610 nm的光吸收程度不同, 并由此评估视网膜血管的血氧饱和度, 得出ERM患眼视网膜动脉及静脉的血氧饱和度高于对照组, 未来研究或可利用共聚焦激光眼底照相机的不同波长激光的眼底彩照联, 进一步评估ERM患眼的血管功能.

目前, 人工智能以及机器学习在ERM中的应用多针对OCT检查, 较少研究关注机器学习利用眼底照相诊断及评估ERM, 且目前ERM的眼底照相相关深度学习模型多关注对ERM的识别及诊断, 而并未为ERM眼底相进行量化评估[3,4], 已有机器学习模型可较好识别OCT图像中的ERM、预测ERM玻璃体术后的CFT变化及术后6个月BCVA[24~30]. Shao等人[31]发表的AI模型识别眼底照片中ERM的敏感度可达到75.90%, 特异度达到78.69%, 其敏感度优于人工诊断. Choi等人[32]的生成性深度学习模型, 通过StyleGAN2, 结合正常及病理眼底彩照合成ERM眼底相, 合成眼底相训练的CNN模型识别ERM的AUC为0.926, 对两个外部验证集的识别AUC分别为0.951和0.914, 优于既往模型的0.857. 在临床实践中, 在疾病筛查时OCT因成本高、便携性差难以普及, 而眼底彩照则已经被广泛应用于体检、眼底疾病及如糖尿病、高血压等全身疾病的筛查中; 而在基层、体检中心进行眼底疾病筛查时, 往往因体检医生或人员临床经验不足, 更需要深度学习模型帮助诊断与评估眼部病情. 本研究利用人工智能眼底定量技

术对眼底照相上ERM患眼的视网膜血管形态特征进行分析，探索这些视网膜血管特征指标预测ERM分期的可行性，为未来使用视网膜血管指标辅助人工智能ERM诊断及预后预测提供思路及基础.

本研究的优势包括：使用更容易获取的眼底照相进行眼底视网膜血管指标分析，更适用于筛查情景；更全面地对视网膜血管形态指标进行了分析；首次系统性比较了不同于EIFL分期的ERM眼中视网膜血管特征指标的差异，并分析这些视网膜血管形态指标与ERM分期严重程度的相关性，探索了视网膜血管特征指标预测ERM分期的可行性，为未来使用视网膜血管指标辅助人工智能ERM诊断及预后预测提供思路及基础. 本研究的局限性包括：横断面研究，未对研究眼进行随访观察，不能动态反应疾病自然病程中视网膜血管指标的变化；使用眼底彩照对视网膜血管指标进行测量分析，因受分辨率限制，对视网膜小血管、尤其是黄斑区的微血管结构难以进行分析，主要评估的是ERM患眼视网膜中、大血管的形态学改变，未来研究中可联合黄斑区en face OCTA对黄斑区的视网膜微血管结构改变更全面地评估ERM患眼视网膜血管形态的及功能的改变；本研究使用三种不同的OCT设备行黄斑区OCT扫描，存在设备间测量差异，因此本研究中的CFT、EIFL测量值仅可作为参考，无法进行严谨可靠的定量分析，未来尚需更多前瞻性研究以更好地分析ERM患眼眼底彩照与OCT指标的关系；不同视网膜分期的样本量差异，因研究为回顾性研究，就诊诊断ERM的患者多为临床3期患者，可能增加统计的二类错误；本研究中探索了各项视网膜血管参数与不同分期的特发性ERM之间的相关性，但是在视网膜血管指标对ERM分级预测中，特异性较低，临床应用中可能导致假阳性率较高，但为利用眼底彩照进行ERM分级、严重程度评估提供思路，在未来的研究中，可利用深度学习模型，利用更大样本量数据评估模型直接进行ERM分级与进行血管形态学分析后进行ERM分级对模型预测ERM分级的特异性及敏感性是否有较大提高、视网膜血管参与与手术预后的关系.

综上，本研究表明，基于人工智能的眼底图像分析系统在视网膜血管形态特征参数定量分析中的准确性，基于此系统，ERM患眼较正常眼的血管平均分支夹角、血管平均管径、血管平均弯曲度增大，血管分形维数、血管弓和黄斑夹角减小；血管分形维数、血管平均管径及血管平均弯曲度与ERM分期相关；而血管弓和黄斑夹角、黄斑中心凹3 mm范围内血管平均管径可作为潜在的预测ERM患眼是否达到3期及以上的指标. 未来需更多前瞻性、更大样本量的研究以更好地探索眼底照相上视网膜血管指标与ERM严重程度、手术预后的关系.

参考文献

1 Govetto A, Lalane Iii R A, Sarraf D, et al. Insights into epiretinal membranes: presence of ectopic inner foveal layers and a new optical coherence tomography staging scheme. Am J Ophthalmol, 2017, 175: 99–113

2 Yang X, Wang Z, Yu Y, et al. Effects of ectopic inner foveal layers on foveal configuration and visual function after idiopathic epiretinal membrane surgery. Retina, 2022, 42: 1472–1478

3 Li B, Chen H, Zhang B, et al. Development and evaluation of a deep learning model for the detection of multiple fundus diseases based on colour fundus photography. Br J Ophthalmol, 2022, 106: 1079–1086

4 Dong L, He W, Zhang R, et al. Artificial intelligence for screening of multiple retinal and optic nerve diseases. JAMA Netw Open, 2022, 5: e229960

5 Govetto A, Virgili G, Rodriguez F J, et al. Functional and anatomical significance of the ectopic inner foveal layers in eyes with idiopathic epiretinal membranes. Retina, 2019, 39: 347–357

6 Gesualdo C, Rossi S, Iodice C M, et al. Multimodal assessment of the prognostic role of ectopic inner foveal layers on epiretinal membrane surgery. J Clin Med, 2023, 12: 4449

7 Xu Y, Ling S G, Dong Z, et al. Development and application of a fundus image quality assessment system based on computer vision technology (in Chinese). China J Ophthalmol, 2020, 56: 8 [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: 8]

8 Long T, Xu Y, Zou H, et al. A generic pixel pitch calibration method for fundus camera via automated ROI extraction. Sensors, 2022, 22: 8565

9 Zhao L, Chen Y N, Jiang B, et al. Correlation study of retinal vascular morphological parameters with ischemic stroke (in Chinese). Chin J Ocul Fundus Dis, 2022, 38: 5 [赵露, 陈雅楠, 姜彬, 等. 视网膜血管形态特征参数与缺血性脑卒中的相关性分析. 中华眼底病杂志, 2022, 38: 5]

10 He H L, Liu Y X, Liu H, et al. Deep learning-enabled vasculometry depicts phased lesion patterns in high myopia progression. Asia-Pac J

Ophthalmol, 2024, 13: 100086
11 Wang M, Zhou X, Liu D N, et al. Development and validation of a predictive risk model based on retinal geometry for an early assessment of diabetic retinopathy. Front Endocrinol, 2022, 13: 1033611
12 Wang Q, Li T, Zhang X, et al. Distinctive imaging characteristics of retinal and cerebral vessels between central and branch retinal vein occlusion by MRI and AI-based image analyzer. Diagnostics, 2024, 14: 267
13 Gong W, Zhang B, Zhou D, et al. Fundus vascular arcades angle reflects choroidal thickness in highly myopic children and adolescents. Eye, 2025, 39: 1264–1269
14 Chen K, Mao J, Liu H, et al. Screening of idiopathic epiretinal membrane using fundus images combined with blood oxygen saturation and vascular morphological features. Int Ophthalmol, 2023, 43: 1215–1228
15 Kitagawa Y, Shimada H, Shinojima A, et al. Foveal avascular zone area analysis using optical coherence tomography angiography before and after idiopathic epiretinal membrane surgery. Retina, 2019, 39: 339–346
16 Hirata A, Nakada H, Mine K, et al. Relationship between the morphology of the foveal avascular zone and the degree of aniseikonia before and after vitrectomy in patients with unilateral epiretinal membrane. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2019, 257: 507–515
17 Ersoz M G, Hocaoglu M, Sayman Muslubas I, et al. Quantitative assessment of the foveal avascular zone using optical coherence tomography angiography before and after surgery for idiopathic epiretinal membrane. Retina, 2021, 41: 54–59
18 Yu H Y, Na Y J, Lee S C, et al. Characteristics of the macular microvasculature in idiopathic epiretinal membrane patients with an ectopic inner foveal layer. Retina, 2023, 43: 574–580
19 Li J, Cheng F, Li Z, et al. Assessment of clinical outcomes and prognostic factors following membrane peeling in idiopathic epiretinal membrane using EIFL staging system: an optical coherence tomography angiography analysis. BMC Ophthalmol, 2025, 25: 54
20 Coppola M, Brambati M, Cicinelli M V, et al. The visual outcomes of idiopathic epiretinal membrane removal in eyes with ectopic inner foveal layers and preserved macular segmentation. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2021, 259: 2193–2201
21 Hsia Y, Hsieh Y T. Associations between macular retinal vasculature and severity of idiopathic epiretinal membrane. BMC Ophthalmol, 2023, 23: 200
22 Kim Y J, Kim S, Lee J Y, et al. Macular capillary plexuses after epiretinal membrane surgery: an optical coherence tomography angiography study. Br J Ophthalmol, 2018, 102: 1086–1091
23 Coppe A M, Lapucci G, Gilardi M, et al. Alterations of macular blood flow in superficial and deep capillary plexuses in the fellow and affected eyes of patients with unilateral idiopathic epiretinal membrane. Retina, 2020, 40: 1540–1548
24 Irie-Ota A, Matsui Y, Imai K, et al. Predicting postoperative visual acuity in epiretinal membrane patients and visualization of the contribution of explanatory variables in a machine learning model. PLoS One, 2024, 19: e0304281
25 Lo Y C, Lin K H, Bair H, et al. Epiretinal membrane detection at the ophthalmologist level using deep learning of optical coherence tomography. Sci Rep, 2020, 10: 8424
26 Kim S H, Ahn H, Yang S, et al. Deep learning-based prediction of outcomes following noncomplicated epiretinal membrane surgery. Retina, 2022, 42: 1465–1471
27 Wen D, Yu Z, Yang Z, et al. Deep learning-based postoperative visual acuity prediction in idiopathic epiretinal membrane. BMC Ophthalmol, 2023, 23: 361
28 Kim J, Chin H S. Deep learning-based prediction of the retinal structural alterations after epiretinal membrane surgery. Sci Rep, 2023, 13: 19275
29 Hsia Y, Lin Y Y, Wang B S, et al. Prediction of visual impairment in epiretinal membrane and feature analysis: a deep learning approach using optical coherence tomography. Asia-Pac J Ophthalmol, 2023, 12: 21–28
30 Hung C L, Lin K H, Lee Y K, et al. The classification of stages of epiretinal membrane using convolutional neural network on optical coherence tomography image. Methods, 2023, 214: 28–34
31 Shao E, Liu C, Wang L, et al. Artificial intelligence-based detection of epimacular membrane from color fundus photographs. Sci Rep, 2021, 11: 19291
32 Choi J Y, Ryu I H, Kim J K, et al. Development of a generative deep learning model to improve epiretinal membrane detection in fundus photography. BMC Med Inform Decis Mak, 2024, 24: 25

Summary for “基于人工智能眼底定量技术量化评估黄斑前膜视网膜血管特征”

Quantitative assessment of retinal vascular morphological parameter analyses in eyes with idiopathic epiretinal membrane using artificial intelligence

Jiyang Tang[1], Yuou Yao[1], Enzhong Jin[1], Saiguang Ling[2], Yi Cai[1], Qiaozhu Zeng[1], Mingwei Zhao[1], Yaoyao Sun[1] & Heng Miao[1*]

[1] *Department of Ophthalmology, Beijing Key Laboratory of Ocular Disease and Optometry Science, Peking University People's Hospital, Beijing 100044, China*
[2] *Evision Technology (Beijing) Co. Ltd, Beijing 100085, China*
* Corresponding author, E-mail: sawyer_young@sina.com

Idiopathic epiretinal membrane (iERM) is a common vitreoretinal condition caused by the proliferation of glial cells and retinal pigment epithelial cells at the surface of the inner limiting membrane (ILM). Fundus photography, as a low-cost, portable, and easy-to-perform fundus examination, has been widely used for screening fundus diseases. Currently, deep learning models based on fundus photography can identify ERM in affected eyes. However, few studies have quantitatively assessed fundus parameters, particularly retinal vascular morphology, in ERM-affected eyes and use these parameters to predict or assess ERM severity. Optical coherence tomography (OCT) is the gold standard for the clinical diagnosis and assessment of ERM, though due to the high cost and poor portability of the examining devices, it is difficult to carry out large-scale OCT screening in the population. This study aimed to evaluate the correlation between retinal vascular morphological parameters from color fundus photographs and the severity of ERM on OCT scans and explore the viability of using these parameters to predict the severity of ERM in affected eyes. This study retrospectively analyzed retinal vascular morphological characteristics of 292 eyes of 146 iERM patients at Peking University People's Hospital from January 2023 to March 2025 using quantitative technology based on a deep learning-based system EVisionAI. ERM staging based on ectopic inner foveal layer (EIFL), EIFL thickness and central foveal thickness (CFT) on OCT were recorded. Intergroup analyses of vascular morphological parameters between eyes with different stages of ERM were performed and their correlation with ERM staging were analyzed. The results showed: in patients with unilateral ERM, compared with the healthy contralateral eye, the mean vessel branch angle, mean vessel diameter, and mean vessel curvity of the ERM eye were increased, vessel fractal dimension and the angle between the vascular arch and the macula were decreased (P<0.05). The vascular fractal dimension (P=0.004), mean vessel diameter (P<0.001), and mean vessel curvity (P<0.001) were correlated with ERM stages. Vascular fractal dimension less than 1.533 (OR=7.247, P<0.001), mean vessel diameter more than 61.93μm (OR=2.277, P=0.013), mean vessel curvity more than 0.893×10^4 (OR=5.044, P<0.001), the angle between the vascular arch and the macula smaller than 88.84°(OR=4.628, P<0.001) were risk factors for stage 3 or 4 ERM. This study analyzed retinal vascular morphological characteristics and their correlation with ERM staging as well as prognostic factors in predicting stage 3 or 4 ERM eyes, providing a new modelling strategy to grade and evaluate the stage and severity of ERM eyes with color fundus images. More prospective studies with larger sample sizes are needed in the future to better explore the relationship between retinal vascular parameters on fundus photographs and the severity as well as surgical prognosis of ERM eyes.

idiopathic epiretinal membrane, artificial intelligence, fundus imaging, retinal vessel caliber, vascular fractal dimension

doi: 10.1360/CSB-2025-5180