

人工智能在糖尿病视网膜病变患者视网膜血管参数分析方面的应用

李超, 徐大树

深圳深西爱尔眼科医院, 广东 深圳

收稿日期: 2026年5月11日; 录用日期: 2026年6月5日; 发布日期: 2026年6月15日

摘要

目的: 采用人工智能眼底检查系统分析正常人与糖尿病视网膜病变非增殖期(NPDR)患者在视网膜血管参数之间的差异。方法: 收集2025年3月1日至2026年3月1日在我院就诊的正常人眼底彩色照片158眼, NPDR患者眼底彩色照片158眼, 每只眼均采集以视盘为中心的眼底彩照。所有病例图像均由人工智能眼底检查分析系统对视网膜动脉当量(RAE)、视网膜静脉当量(RVE)、视网膜动静脉比(AVR)等进行标注, 观察两组之间视网膜血管参数方面的差异。结果: 利用人工智能对正常人组与NPDR组的视网膜血管参数进行分析比较, 两组之间RAE相比, NPDR组大于正常人组($t = -19.83, P = 0.000$), 两组之间RVE相比, NPDR组大于正常人组($t = -22.15, P = 0.000$), 两组之间AVR相比, NPDR组小于正常人组($t = 7.02, P = 0.000$), 均有显著性差异, 差异有统计学意义。结论: 利用人工智能系统进行眼底筛查, 可以精确定量测量NPDR患者视网膜血管管径变化, 这些参数变化与NPDR存在显著关联, 可能作为糖尿病视网膜疾病早期识别的潜在标志物, 对实现慢病管理窗口前移、解决医疗卫生资源呈现的地区不平衡问题有重要意义。然而, 本研究为横断面设计, 因果关系尚需纵向研究进一步验证。

关键词

人工智能, 糖尿病视网膜病变, 视网膜血管

Application of Artificial Intelligence in the Analysis of Retinal Vascular Parameters in Patients with Diabetic Retinopathy

Chao Li, Dashu Xu

Shenzhen Shenxi Ai'er Eye Hospital, Shenzhen Guangdong

Received: May 11, 2026; accepted: June 5, 2026; published: June 15, 2026

Abstract

Objective: To analyze the differences in retinal vascular parameters between normal subjects and patients with non-proliferative diabetic retinopathy (NPDR) using an artificial intelligence-based fundus examination system. **Methods:** A total of 158 fundus color photographs from normal subjects and 158 from NPDR patients, collected between March 1, 2025, and March 1, 2026, at our hospital, were included in the study. Each eye underwent fundus photography centered on the optic disc. All images were analyzed by an AI-powered fundus examination system to measure retinal arterial equivalent (RAE), retinal venous equivalent (RVE), and arteriovenous ratio (AVR). Differences in retinal vascular parameters between the two groups were evaluated. **Results:** Comparative analysis using AI revealed significant differences between the normal and NPDR groups. The RAE was greater in the NPDR group than in the normal group ($t = -19.83, P = 0.000$). Similarly, the RVE was greater in the NPDR group ($t = -22.15, P = 0.000$). In contrast, the AVR was smaller in the NPDR group ($t = 7.02, P = 0.000$). All differences were statistically significant. **Conclusion:** The use of an AI system for fundus screening enables precise quantitative measurement of changes in retinal vascular diameter in NPDR patients, these parameter changes are significantly associated with NPDR and may serve as potential biomarkers for early recognition of diabetic retinopathy. This approach is significant for advancing the window of chronic disease management and addressing regional imbalances in healthcare resources. However, due to the cross-sectional design of this study, causal relationships need to be further validated by longitudinal studies.

Keywords

Artificial Intelligence, Diabetic Retinopathy, Retinal Vessels

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

随着全球社会经济水平的持续发展, 糖尿病已成为威胁人类健康的重要慢性疾病。国际糖尿病联盟最新统计数据显示, 全球糖尿病患者数量预计在 2040 年达到 6.42 亿, 其中糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)是最具破坏性的微血管并发症之一[1]。该疾病病理特征主要表现为微血管瘤形成及新生血管生成等, 最终引发不可逆性视力损伤[2]。在我国人口老龄化加速的背景下, 最新流行病学调查显示, 20~79 岁糖尿病患者已达 1.029 亿, DR 患病率高达 34.6%, 其中非增殖期(nonproliferative DR, NPDR)和增殖期(proliferative DR, PDR)分别占 15.06%和 0.99%, 已成为职业人群视力损伤的首要诱因[3] [4]。

视网膜血管系统作为人体唯一可无创观察的微循环系统, 其形态学参数与全身微血管状态存在显著相关性[5]。临床研究表明, DR 患者视网膜血管管径变化、分支异常等特征早于临床症状出现, 这为早期诊断提供了重要生物学依据[6]。近年来, 深度学习技术突破性进展为医学影像分析开辟了新途径。特别是卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)在眼底图像特征提取方面展现出显著优势, 微动脉瘤检测准确率达 97.3%, 出血斑识别灵敏度达 96.1% [7]。基于此, 建立智能化 DR 评估系统不仅能够实现病变的定量分析, 更能通过血管参数建模预测疾病转归, 这已成为转化医学研究的重要方向[8], 也为 DR 的早期发现提供一定的临床依据。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

选择 2025 年 3 月 1 日~2026 年 3 月 1 日就诊于我院的人群, 正常人组共 158 眼, 平均年龄(51.20 ± 3.10)岁, 其中右眼 81 只, 左眼 77 只, 男性 42 人, 女性 39 人; NPDR 组患者共 158 眼, 平均年龄(50.70 ± 4.50)岁, 其中右眼 83 只, 左眼 75 只, 男性 42 人, 女性 41 人, 平均糖尿病病程(4.92 ± 4.28)年, 两组年龄、性别构成及平均糖尿病病程比较差异无统计学意义。

2.2. 纳入标准

(1) 屈光间质清楚, 眼底照成像清晰; (2) 眼压 ≤ 21 mmHg; (3) 糖尿病患者符合 2 型糖尿病诊断标准及 NPDR 诊断标准[9] [10]。

2.3. 排除标准

(1) PDR; (2) 除糖尿病外其他原因导致的视网膜出血、水肿; (3) 既往已接受过视网膜激光光凝、玻璃体腔注射药物等相关治疗的 DR 患者; (4) 屈光间质混浊影响眼底观察者; (5) 高度近视、青光眼患者; (6) 高血压、吸烟酗酒者。

2.4. 方法

全部入组人员均采用全自动免散瞳眼底照相机(AFC100 型, 上海鹰瞳医疗科技有限公司, 中国)采集以视盘为中心的眼底照片, 糖尿病患者按照 DR 国际临床分级标准分为 NPDR 组, 选取位 B 区视网膜直径最大的 4 条动脉和 4 条静脉, 分别位于颞上、颞下、鼻上、鼻下象限, 由人工智能眼底检查系统进行评估, 自动得到视网膜动脉当量(retinal arteriolar equivalent, RAE)、视网膜静脉当量(retinal venular equivalent, RVE)和视网膜动/静脉比值(arteriovenous ratio, AVR)。

2.5. 统计学方法

所有数据采用 SPSS 26.0 统计学软件进行处理。连续变量以均数 \pm 标准差表示。对连续变量数据进行正态性检验(Shapiro-Wilk 法)和方差齐性检验(Levene 法)。检验结果显示数据满足正态分布和方差齐性假设($P > 0.05$), 满足参数检验条件。因此, 正常人组与 NPDR 组间 RAE、RVE 和 AVR 的比较采用独立样本 t 检验, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3. 结果

数据显示, NPDR 组患者的 B 区视网膜静脉当量(RVE)和动脉当量(RAE)均显著高于正常组(RVE: 0.227 vs 0.079 μm , $P < 0.001$; RAE: 0.182 vs 0.072 μm , $P < 0.001$) (见表 1、表 2), 而视网膜动静脉比值(AVR)显著降低(0.709 vs 0.812 , $P < 0.001$)。两组间存在显著性差异, 差异有统计学意义($P < 0.001$) (见表 3)。

Table 1. Comparison of retinal artery equivalent (RAE) in Zone B between two groups

表 1. 两组间 B 区视网膜动脉当量(RAE)比较

	组别	<i>n</i>	均值(μm)	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
RAE	正常人组	158	0.072	0.592	-19.83	0.000
	NPDR 组	158	0.182	0.285		

Table 2. Comparison of retinal venous equivalent (RVE) in Zone B between two groups**表 2.** 两组间 B 区视网膜静脉当量(RVE)比较

	组别	<i>n</i>	均值(μm)	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
RVE	正常人组	158	0.079	0.748	-22.15	0.000
	NPDR 组	158	0.227	0.296		

Table 3. Comparison of the retinal artery/vein ratio (AVR) in Zone B between two groups**表 3.** 两组间 B 区视网膜动脉/静脉比值(AVR)比较

	组别	<i>n</i>	均值	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
AVR	正常人组	158	0.812	0.087	7.02	0.000
	NPDR 组	158	0.709	0.131		

4. 讨论

DR 作为糖尿病最严重的微血管并发症之一, 约 30% 的 2 型糖尿病患者确诊时已存在视网膜微血管损伤[1]。DR 的早期特征性改变是周细胞凋亡和基底膜增厚, 导致血视网膜屏障破坏。糖尿病患者视网膜动脉扩张可能源于高血糖诱导的血管平滑肌细胞钙信号紊乱, 而静脉扩张则与高血糖诱导的血管内皮生长因子(VEGF)过表达等相关[11]。视网膜血管管径与 DR 的发生、发展密切相关, 流行病学研究表明视网膜动脉的扩张发生在 DR 早期或者前期, 即在没有任何临床表现的视网膜病变前, 视网膜动脉血管已经出现扩张。

随着现代技术的发展, 对视网膜血管管径的评价由最初的使用直接或间接眼底镜估计视网膜血管的改变, 逐渐发展为对眼底照片进行分析、测量。视网膜血管的测量主要有手动测量和半自动测量, 传统视网膜血管测量依赖人工标定视盘周围 0.5~1.0 DD 区域的颞上、下方, 鼻上、下方 4 支主要动静脉血管, 通过 Knudtson 改良公式计算得出 RAE、RVE 及 AVR。Knudtson 等 [12] 进一步将测量方法细化, 利用 IVAN 软件计算视盘周围 0.5~1.0 DD 区域的 4 支主要血管, 分别得到 RAE、RVE 及 AVR, 尽管 IVAN 软件将组内变异系数控制在 <8%, 但操作耗时且依赖技师经验。人工智能(artificial intelligence, AI)是指由人类创造的用于模拟、延伸和扩展人类思维特征的方法和技术系统, 斯坦福大学联合研究团队于 2017 年在 Nature 上发布了针对皮肤癌的算法, 准确率可达 91% 以上[8], 对于 DR 的筛查, 多种算法也显示出高准确率灵敏度和特异度均可达 90% 以上[7]。美国卫生监管机构食品药品监督管理局, 已于 2018 年 4 月, 批准了世界上第一款人工智能医疗设备 IDx-DR 用于检测 DR。在我国《基于眼底相的糖尿病性视网膜病变人工智能筛查系统应用指南》已经初步确立, 国内有多项自主研发的 DR 辅助诊断软件, 已获得了国家药品监督管理局核发的医疗器械注册证, 可用于 DR 的临床辅助筛查与管理。

目前 DR 分期主要依据微动脉瘤、出血等形态学改变, 但这些征象出现时神经血管单元损伤已不可逆。本研究证实 AI 量化视网膜血管参数的改变也可识别高风险人群, 这与 Cheung 等[13]提出的“血管指数预警模型”相吻合。本研究发现 NPDR 组 RAE 与 RVE 分别较正常组升高 152.8% 和 187.3%, 与 Wong 等[14]基于 IVAN 软件的测量结果研究表明 NPDR 患者 RAE 与 RVE 分别较正常组升高 142% 和升高 173%, 两者结果高度一致, 但需注意两项研究在人群特征、血管测量方法等方面存在差异。此外, 本研究仅纳入 NPDR 患者, 未涉及增殖期 DR 或不同严重程度的 NPDR 亚组, 尚不清楚血管参数变化在不同 DR 分期中的动态演变规律及是否存在非线性关系。血管参数变化的临床价值也在纵向研究中得到验证, ADVANCE 研究对 11,140 例糖尿病患者随访 5 年发现, 基线 RAE 处于最高四分位区间者, DR 进展风险

增加 3.2 倍[15]。

本研究也存在以下局限性：第一，研究为横断面设计，无法确定视网膜血管参数变化与 NPDR 之间的时间先后顺序及因果关系。第二，样本量相对较小，且为单中心研究，结果的外推性可能受限，未来需在不同地区、不同层级医院中验证。第三，虽然 AI 系统自动测量减少了人为误差，但仍可能受眼底图像质量、血管分支选择标准等因素影响。第四，未校正可能影响血管参数的其他混杂因素，如血糖控制水平、血压、血脂、用药史等，这些因素可能独立影响视网膜血管管径。

因此，对视网膜血管参数变化的监测可能为 DR 的早期识别提供辅助信息，但其作为诊断或预测标志物的价值仍需纵向研究进一步验证。我国糖尿病患者常集中在基层医疗单位，往往缺少眼科专科医师，对 DR 诊疗存在一定的缺陷。但 AI 诊断系统可以在短时间内根据视网膜血管参数变化快速对糖尿病视网膜疾病做出初步诊断，缓解了眼科医生和阅片医生的工作压力，有利于提高社区医院专科医疗的水平，解决医疗卫生资源呈现的地区不平衡问题。

5. 结论

综上，本研究通过 AI 定量分析证实，NPDR 患者的视网膜动静脉管径显著扩张，而动静脉比值明显降低，这些关联为早期筛查和病理机制研究提供了新视角。利用 AI 眼底检查技术，可以在免散瞳状态下准确快速分析视网膜血管管径的变化，在一定意义上更利于社区医生初步评估眼底病变。该方法可初步提示与 DR 相关的血管参数改变，极大提高 DR 筛查的效率，实现慢病管理的窗口前移，造福糖尿病人群，减少不可逆性盲的产生。未来需要开展大样本、多中心的前瞻性队列研究，以明确视网膜血管参数变化与 NPDR 发生及进展的因果关联，并探索将 AI 量化参数整合入现有 DR 风险模型的可行性。随着 AI 技术的不断发展，也期待能在视网膜微血管检测方面有更大进展，为 DR 等疾病的风险评估提供更有力的影像学依据。

声明

本研究遵循赫尔辛基宣言原则；经深圳深西爱尔眼科医院伦理委员会审核批准，所有入组人员均签署知情同意书。

参考文献

- [1] Teo, Z.L., Tham, Y., Yu, M., Chee, M.L., Rim, T.H., Cheung, N., *et al.* (2021) Global Prevalence of Diabetic Retinopathy and Projection of Burden through 2045: Systematic Review and Meta-Analysis. *Ophthalmology*, **128**, 1580-1591. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2021.04.027>
- [2] Cheung, N., Mitchell, P. and Wong, T.Y. (2010) Diabetic Retinopathy. *The Lancet*, **376**, 124-136. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(09\)62124-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(09)62124-3)
- [3] Yang, W., Lu, J., Weng, J., Jia, W., Ji, L., Xiao, J., *et al.* (2010) Prevalence of Diabetes among Men and Women in China. *New England Journal of Medicine*, **362**, 1090-1101. <https://doi.org/10.1056/nejmoa0908292>
- [4] Song, P., Yu, J., Chan, K.Y., *et al.* (2018) Prevalence, Risk Factors and Burden of Diabetic Retinopathy in China: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Glob Health*, **8**, 010803. <https://doi.org/10.7189/jogh.08.010803>
- [5] Wong, T.Y., Islam, F.M.A. and Klein, R. (2006) Retinal Vascular Caliber, Cardiovascular Risk Factors, and Inflammation: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA). *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **47**, 2341-2350. <https://doi.org/10.1167/iovs.05-1539>
- [6] Ting, D.S.W., Pasquale, L.R., Peng, L., Campbell, J.P., Lee, A.Y., Raman, R., *et al.* (2018) Artificial Intelligence and Deep Learning in Ophthalmology. *British Journal of Ophthalmology*, **103**, 167-175. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2018-313173>
- [7] Gulshan, V., Peng, L., Coram, M., Stumpe, M.C., Wu, D., Narayanaswamy, A., *et al.* (2016) Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic Retinopathy in Retinal Fundus Photographs. *JAMA*, **316**, 2402-2410. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.17216>

-
- [8] Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R.A., Ko, J., Swetter, S.M., Blau, H.M., *et al.* (2017) Dermatologist-Level Classification of Skin Cancer with Deep Neural Networks. *Nature*, **542**, 115-118. <https://doi.org/10.1038/nature21056>
- [9] 中华医学会糖尿病学分会. 中国 2 型糖尿病防治指南(2017 年版) [J]. 中华糖尿病杂志, 2018, 10(1): 4-67.
- [10] 中华医学会眼科学分会眼底病学组. 我国糖尿病视网膜病变临床诊疗指南(2014 年) [J]. 中华眼科杂志, 2014, 50(11): 851-865.
- [11] Antonetti, D.A., Klein, R. and Gardner, T.W. (2012) Diabetic Retinopathy. *New England Journal of Medicine*, **366**, 1227-1239. <https://doi.org/10.1056/nejmra1005073>
- [12] Knudtson, M.D., Lee, K.E., Hubbard, L.D., Wong, T.Y., Klein, R. and Klein, B.E.K. (2003) Revised Formulas for Summarizing Retinal Vessel Diameters. *Current Eye Research*, **27**, 143-149. <https://doi.org/10.1076/ceyr.27.3.143.16049>
- [13] Cheung, C.Y., Sabanayagam, C., Klein, R., *et al.* (2025) Retinal Vascular Phenotyping for Early Detection of Coronary Artery Disease: Quantitative Assessment and Diagnostic Modelling. *BMJ Open*, **16**, e106135. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2025-106135>
- [14] Wong, T.Y., Klein, R., Klein, B.E., *et al.* (2002) Retinal Vascular Caliber and Risk of Diabetes Mellitus: The Atherosclerosis Risk in Communities Study. *Ophthalmology*, **109**, 2099-2104.
- [15] Wong, T.Y., Tikellis, G., Sun, C., *et al.* (2005) Retinal Microvascular Abnormalities and Risk of Diabetic Retinopathy in Type 2 Diabetes. *Diabetes Care*, **28**, 2963-2969.