多模态视网膜影像人工智能辅助诊断在糖尿病及其并发症筛查中的研究进展

罗雨禾[1] 伏珂荭[2] 马丽娜[3] 高语晗[2] 王星然[3*]

1.宁夏医科大学检验学院，医学检验技术专业，中国·宁夏 银川 750004

2.宁夏医科大学第一临床医学院，临床医学专业，中国·宁夏 银川 750004

3.宁夏医科大学药学院，临床药学专业，中国·宁夏 银川 750004

摘要：糖尿病属于一种全球性的公共卫生问题，所引起的各种并发症也越发受到重视。其中，糖尿病视网膜病变（Diabetic Retinopathy，DR）已发展为成人致盲的主要原因之一。近些年多模态视网膜影像人工智能技术迅速发展，且正在逐渐在临床诊疗中发挥重要的作用，是糖尿病及其它相关疾病早期诊断、精准诊断的关键手段。利用自动化特征提取、病情精细分类和量化的危险预估功能模块在提高筛查速度，提高医疗机构资源分配效率的同时也对基层医疗卫生机构的服务能力有改善的作用。目前该领域的数据标准化程度低，模型的泛化能力差，实际场景的适应性差。本文对多模态视网膜影像人工智能辅助诊断技术发展及未来趋向做全面的总结，以期给今后科研上的突破以及产业化的推进给予理论支撑和技术参考。

关键词：多模态视网膜影像；人工智能；糖尿病；糖尿病视网膜病变；辅助诊断

Research Progress of Multimodal Retinal Imaging AI-Assisted Diagnosis in the Screening of Diabetes and Its Complications

Luo Yuhe[1], Fu Kehong[2], Ma Lina[3], Gao Yuhan[2], Wang Xingran[3*]

1. College of Laboratory Medicine, Ningxia Medical University, Medical Laboratory Technology, China Ningxia Yinchuan 750004
2. First Clinical Medical College, Ningxia Medical University, Clinical Medicine, China Ningxia Yinchuan 750004
3. School of Pharmacy, Ningxia Medical University, Clinical Pharmacy, China Ningxia Yinchuan 750004

Abstract: Diabetes is a global public health issue, and its various complications are receiving increasing attention. Among them, Diabetic Retinopathy (DR) has become one of the leading causes of adult blindness. In recent years, multimodal retinal imaging AI technology has rapidly developed and is gradually playing an important role in clinical diagnosis and treatment. It is a key method for early and precise diagnosis of diabetes and other related diseases. Using automated feature extraction, fine-grained disease classification, and quantitative risk assessment modules can improve screening speed, make healthcare resource allocation more efficient, and also enhance the service capabilities of basic medical institutions. However, the data standardization in this field is currently low, model generalization is poor, and adaptability to real-world scenarios is limited. This paper provides a comprehensive summary of the development and future trends of multimodal retinal imaging AI-assisted diagnosis technology, aiming to offer theoretical support and technical reference for future research breakthroughs and industrial promotion.

Keywords: Multimodal retinal imaging; Artificial intelligence; Diabetes; Diabetic retinopathy; Assisted diagnosis

0 引言

糖尿病属于一种慢性代谢疾病，主要病理特征就是长期保持高血糖状态。随着疾病的发展，患者会出现糖尿病性视网膜病变（Diabetic Retinopathy，DR）等微血管并发症，已成为成人失明的重要原因。经过研究显示，在 DR 初期，虽然很难发现临床症状，但是通过对病人进行有针对性的筛查以及合理的干预手段，则可以有效地减缓视力损伤的速度[1]。建立高效的、准确的 DR 筛查系统具有重大的医学。实践意义，并且对提高公众健康水平有着重大的社会意义[2]。

传统的角膜病诊断大多依靠医生的肉眼观察，在大规模的筛查工作中存在效率低、结果受个体经验影响大、缺乏基层医疗资源等许多不足之处。这些问题显示出了其在面对慢性疾病高发的场景时所存在的问题[1]。伴随着彩色眼底成像技术、OCT 和 OCTA 等先进影像工具的不断发展和完善，新型成像技术可以从组织学的角度来对视网膜的结构异常进行详细的分析，并且还可以利用血流动力学和局部的病理变化来阐明视网膜损伤的过程，这就使得疾病的早期准确识别得到了更加丰富可靠的临床证据[1]。

近些年来，以深度学习为驱动的医学影像人工智能（AI）技术发展迅猛，在医疗影像学领域应用取得了重要突破。该技术依靠自身的特征提取功能可以达成数字放射线摄影 (DR) 筛查、疾病分期诊断、黄斑水肿检测和风险评估等诸多方面的任务，而且逐渐深入到基层医疗影像筛查、远程医疗服务和智能化临床决策支持系统创建中[1,3]。尤其是一类以多模态视网膜成像数据为支撑的 AI 辅助诊断研究，在智慧医疗领域已经占据着很重要的位置，它给糖尿病及并发症早期发现、合理安排医疗资源提供了一种可能，对糖尿病等慢性病的精准治疗也起到推进作用。本文主要对多模态视网膜影像 AI 辅助诊断的技术发展过程、主要因素及在糖尿病及其并发症早期预警中的应用案例进行论述，并对未来的走向做进一步的探究。

1 多模态视网膜影像及人工智能关键技术

多模态视网膜成像技术依靠多种成像手段的结合使用，把视网膜解剖结构、血管分布特点和病理改变的信息结合起来，在全面剖析眼底组织细微异常时具有明显的好处。该技术给糖尿病及其并发症早期诊断赋予了更加准确而且全面的影像学支撑[4]。其中，彩色眼底照相（Color Fundus Photography，CFP）因其操作简便和成本低廉的特点，在糖尿病视网膜病变（Diabetic Retinopathy，DR）筛查中具有重要价值。其主要优点就是能够通过直观的表现来识别微动脉瘤、出血、渗出等典型的临床症状，可以广泛地用于大规模人群的筛查[4]。由于二维成像分辨率低，CFP 对于黄斑水肿和深部病理性损伤的检测能力较弱，一般要配合高分辨光学相干断层扫描 (Optical Coherence Tomography，OCT) 等辅助检查来改善以上缺陷[4]。

由于光学相干断层扫描（OCT）是非侵入性的，所以它能够对视网膜受损部位给出高空间分辨率的图像。多模态影像数据对于黄斑区、神经纤维层、视网膜厚度评价来说，有着较高的准确性和较好的适用性。由于无创性和高分辨率，OCTA 在糖尿病黄斑水肿 (DME) 以及其他眼科疾病的诊断上具有非常大的优势[5]。该技术属于一种新的非侵入性血管成像技术，被普遍应用到视网膜和脉络膜微循环结构的详细剖析研究当中。用可视化技术对血管密度做精确的量化分析，在评价无灌注区、黄斑水肿等指标上具有明显的优势，给早期糖尿病视网膜病变（DR）微血管异常的研究指明了新的道路。将多种形态、功能的影像数据进行融合之后，既可以得到结构以及功能上综合的信息，也能大大提高疾病的检测精确度和临床诊断的水平。

近些年来，由于深度学习技术能完成智能化的任务而被广泛应用，成为图像处理方面的主要方法。特别是卷积神经网络，它具有很强的特征提取以及模式分类的能力，在该领域得到了广泛的应用，并且取得了很好的效果。

卷积神经网络（CNN）由于具有很强的图像特征提取能力，在眼部跟踪、医学影像分割、疾病分类等各种场景下有着出色的表现，而且比传统机器学习模型更好。伴随着大规模数据集应用的普及，ResNet、DenseNet、EfficientNet 等经典结构也成为了眼底成像研究中主要使用的工具。

通过分析，显著提高了 DR 自动筛选的准确性和稳定性[5]。与此同时，Vision Transformer（ViT）和其他新的凭借全局特征建模的能力，该模型可以识别复杂的眼底图像。它显示出良好的应用潜力[6]。

多模态融合学习是当前人工智能辅助诊断的重点。本文把共聚焦荧光显微成像（CFP）、光学相干断层扫描（OCT）、OCT 血管成像（OCTA）的原始影像数据综合起来，加上患者年龄、病程长短、血糖水平以及糖化血红蛋白这些临床变量，创建出包含多种生物医学信息的数据集。该方法主要是为了提高模型对于早期病灶的识别能力，从而大幅改善模型在复杂的医疗环境中使用时的表现以及准确率。

大模型和多模态基础架构创新的设计，促使了眼科人工智能由原来的一个领域进入到智能辅助诊断方面的发展。该类技术对于糖尿病视网膜病变等疾病的早期筛查和初步干预有着较大的作用，但是其医学上的可靠性以及临床适用性还要依靠多中心、大样本数据集做进一步的实证研究和科学检验[6]。

2 人工智能在糖尿病及其并发症筛查中的应用

以深度学习为技术核心的人工智能技术依靠出色的图像处理和模式识别能力，在糖尿病及其它并发症的早期预警、精准诊断、风险预测、全程管理等方面起到了重要的

作用，逐渐发展成慢性病智能化管理的技术支撑。近些年，研究人员把眼底彩色摄影、光学相干断层扫描 (OCT) 和 OCT 血管成像等众多影像数据纳入其中，创建出诸多依靠多源信息融合开展分析的自动化系统，大大加强了对糖尿病视网膜病变 (DR) 的筛查速度和分类精确度[7]。实验结果表明，这四个模型对于微动脉瘤、出血斑、硬性渗出物、新生血管等典型病理性改变的识别率都很高，它们的敏感性和特异性比传统的手工阅片要高得多，很好地缓解了基层医疗资源缺乏造成的筛查压力，推进了诊疗标准化、规范化的发展。

人工智能技术依靠对 OCT 影像数据的分析，可以准确测量出层间液体积、视网膜厚度的改变、神经上皮脱离这些主要指标，给疾病的早期预警提供可靠的数据支持[8]。和传统的手工阅片相比，用深度学习训练出来的机器学习方法大大加快了诊断速度，对于一些比较复杂或者难以诊断的病例，也可以得到较好的结果，进而帮助医生做出决策[8]。伴随着多模态成像技术的发展，人工智能也渐渐将眼底血管分布特征以及血流动力学参数纳入其中，从而提升了对于 DME 及其关联视网膜疾病检测的准确性及综合评价水平[8]。

从研究角度看，视网膜微血管病变已经超越了传统的以眼科为对象的眼科疾病范畴，和全身代谢紊乱、心脑血管疾病存在密切的关系。利用深度学习算法对视网膜影像数据展开剖析，融合年龄，血压以及糖化血红蛋白这些临床指标之后，可以创建出精确的风险预估模型，以此来判定糖尿病病人出现冠心病，脑梗塞或者脑出血这些疾病的风险以及并发症的危险程度，给个性化治疗方案赋予理论支持。该种方法既可以对糖尿病肾病等微循环障碍进行早期筛查，又可以促进单一疾病检测向多因素联合预警系统发展[9]。

在远程医疗以及智能健康管理迅速发展之际，以人工智能为依托的诊疗系统已经渐渐融入到基层医疗机构和移动医疗当中，在眼底疾病诊断方面具备重要的应用价值。依靠便携式眼底相机、云端深度学习平台、高效数据交互这三种手段，这个系统可以达成眼底图像的即时采集，自动剖析，并且还能进行远端专家咨询，特别适合于改善偏远地域内对糖尿病视网膜病变展开筛查的效能[9]。随着研究的不断深入，采用更先进的机器学习算法、获取更多的分散在各个医疗机构的大数据、增加模型的透明度等方法，可以使得人工智能更好的发挥作用，在糖尿病前期风险评估以及个性化治疗上起到技术性支撑的作用。

3 挑战与展望

近些年来，多模态视网膜影像同人工智能技术的融合已经给糖尿病视网膜病变等疾病早期筛查赋予了革新成果。该领域的临床应用还存在着许多问题，在广泛的推广上还存在很多困难。首先，高质量、标准化、多中心协同的医学图像大样本数据集还没有形成。现有的大多数研究采用单中心样本训练模型，而医疗机构在设备配备、成像参数、标注标准等各方面存在较大差别，因此导致所建算法对于不同的地区来说不能具有普适性[10]。由于技术条件的限制，一些基层医疗单位不能得到清楚稳定的图像数据，导致人工智能辅助诊断系统实用性差，可靠性不高[10]。

目前人工智能模型的可解释性还存在着较大的不足。以深度学习为代表的一种典型的框架由于其具有黑箱的特性而受到广泛批评，虽然它在预测性能上很好，但是内部运行机制的不可知性极大地降低了医疗专业人士对于它的结论的可信度以及决策信心。在模型训练的过程中存在着数据隐私泄露、算法本身带有偏见、伦理上的约束等等的问题。尤其在多中心合作或者跨地域的环境下，怎样有效调配数据资源并且保证个人敏感信息的安全，成了制约这项技术得到全面推行的主要障碍[11]。

未来多式联运一体化和智能医疗互相促进，促使人工智能技术应用领域越来越大。把彩色眼底影像，光学相干断层扫描（OCT），光学相干断层血管成像（OCTA）这些不同的医学检查方法结合起来，再和患者的临床信息一起加以考察，就能对糖尿病及并发症的发展趋向有更深刻的认识，从而使早期发觉变得更加精准[11]。依靠远程诊疗网络、高性能计算平台、联邦学习框架等技术创新，创建起覆盖基层和高端医疗机构的眼科疾病联合监测体系，既可改善医疗资源的调配水平，又可以慢慢塑造起预防为主、重视个体化干预、形成全程闭环管理体系的糖尿病等慢性病防控体系[11-12]。

4 结语

人工智能结合多模态视网膜影像，在糖尿病及其并发症筛查中展现出重要应用价值。多模态影像可提供视网膜结构、微循环等多维度疾病信息，人工智能依托图像识别与数据分析，实现糖尿病视网膜病变的早筛、病情评估与风险预测，助力提升筛查效率、优化医疗资源配置。当前该技术仍面临数据标准化不足、模型泛化能力有限、算法可解释性欠缺等现实挑战。未来需推进多中心数据库建设与算法优化，深化多学科交叉协作，推动技术临床落地，为糖尿病早筛早诊提供支撑，助力智慧眼科与健康中国建设。

参考文献：

[1] 董力，李赫妍，魏文斌. 人工智能在糖尿病视网膜病变中的应用进展[J/OL]. 中华眼科医学杂志 (电子版)，2024, 14(1):57-61.

[2] 陈艺璇，刘勤，汪向利. 人工智能在糖尿病视网膜病变应用的研究进展[J]. 临床医学进展，2024, 14(3):1462-1467.

[3] 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[J]. 国际眼科杂志，2025, 25(7).

[4] 吴丽丽，曲毅. OCTA 在病理性近视脉络膜新生血管应用及其在人工智能的研究进展[J]. 山东大学耳鼻喉眼学报，2024, 38(2): 120-127.

[5] 李大伟，Ran A, Cheung CY等. 光学相干断层扫描深度学习研究进展（对应英文综述）[J]. Clin Exp Ophthalmol, 2023, 51(8):853-863.

[6] Wang S, He X, Jian Z, et al. Advances and prospects of multi-modal ophthalmic artificial intelligence based on deep learning: a review[J]. Eye and Vision, 2024, 11:38.

[7] 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[J]. 国际眼科杂志，2025, 25(7): 1275-1282.

[8] 金玲，王成虎. 人工智能在视网膜新生血管性疾病中的应用进展[J]. 国际眼科杂志，2026, 26(1): 135-141.

[9] Bazargani Y S, Mirzaei M, Sobhi N, et al. Artificial Intelligence and Diabetes Mellitus: An Inside Look Through the Retina[J]. Artificial Intelligence Review, 2024.

[10] 李京珂，张妍春，武佳懿等. 深度学习在糖尿病视网膜病变筛查、评级及管理中的研究进展[J/OL]. 中华眼科医学杂志 (电子版)，2023, 13(4):241-246.

[11] 董力，李赫妍，魏文斌. 人工智能在糖尿病视网膜病变中的应用进展[J/OL]. 中华眼科医学杂志 (电子版)，2024, 14(1):57-61.

[12] 罗桂彬，沈强，张蓝月等. 晚期糖化终末产物与糖尿病视网膜病变相关性的研究进展[J/OL]. 中华眼科医学杂志 (电子版)，2024, 14(4):247-251.

基金项目：宁夏医科大学大学生创新创业训练计划项目（项目编号：202610752033）。

* 通讯作者：王星然，E-mail：18088144475@163.com。