

人工智能在糖尿病视网膜病变领域的研究进展

马晓宇^{1,2}, 张 力², 毕燕龙^{2,3}

引用:马晓宇, 张力, 毕燕龙. 人工智能在糖尿病视网膜病变领域的研究进展. 国际眼科杂志 2022;22(11):1818-1821

基金项目:同济大学2019年人工智能领域学科交叉重点项目(No.PA2019000663)

作者单位:¹(200092)中国上海市,同济大学医学院;²(200065)中国上海市,同济大学附属同济医院眼科;³(200092)中国上海市,同济大学眼科研究所

作者简介:马晓宇,在读硕士研究生,研究方向:眼底病、人工智能眼科。

通讯作者:毕燕龙,博士,教授,主任医师,眼科主任,博士研究生导师,研究方向:眼底病、角膜及眼表疾病、人工智能眼科。

biyanlong@tongji.edu.cn

收稿日期:2022-05-05 修回日期:2022-10-08

摘要

糖尿病视网膜病变(DR)是糖尿病的诸多并发症之一,是全球中老年人群的几大致盲原因之一,早发现、早治疗可有效降低致盲率。近些年来,人工智能(AI)在眼科的应用范围不断扩大,其在DR筛查与诊断领域的研究已经成为一个新的热点。本文旨在总结近些年来AI在DR筛查与诊断领域的研究进展,并提出问题以及对未来进行展望,为AI在该领域的进一步应用及推广提供更多信息。

关键词:糖尿病视网膜病变;人工智能;眼底照相

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2022.11.11

Research progress on artificial intelligence in diabetic retinopathy

Xiao-Yu Ma^{1,2}, Li Zhang², Yan-Long Bi^{2,3}

Foundation item: Interdisciplinary Key Project in Artificial Intelligence of Tongji University in 2019 (No.PA2019000663)

¹School of Medicine, Tongji University, Shanghai 200092, China;

²Department of Ophthalmology, Tongji Hospital of Tongji University, Shanghai 200065, China; ³Institute of Eye Research, Tongji University, Shanghai 200092, China

Correspondence to: Yan-Long Bi. Department of Ophthalmology, Tongji Hospital of Tongji University, Shanghai 200065, China; Institute of Eye Research, Tongji University, Shanghai 200092, China. biyanlong@tongji.edu.cn

Received: 2022-05-05 Accepted: 2022-10-08

Abstract

• Diabetic retinopathy (DR) is one of the many complications of diabetes and one of the major causes of blindness in middle-aged and elderly people in the world. Early detection and treatment can effectively reduce the blindness rate. In recent years, the application of artificial

intelligence (AI) in ophthalmology has been expanding, and its research in DR screening and diagnosis has become a new hotspot. This paper aims to summarize the research progress of AI in the field of DR screening and diagnosis in recent years, raise questions, and set a course for the future. Additional information related to the further application and promotion of AI in this field is also provided.

• KEYWORDS: diabetic retinopathy; artificial intelligence; fundus photography

Citation: Ma XY, Zhang L, Bi YL. Research progress on artificial intelligence in diabetic retinopathy. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2022;22(11):1818-1821

0 引言

糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)是糖尿病的常见眼部并发症,也是全球中老年人群的几大致盲原因之一^[1-3],我国糖尿病人群中的DR患病率为22.4%^[4]。在疾病的早期阶段大多无症状,很容易被患者所忽略,需要进行眼科检查才能被发现^[1]。眼底照相作为DR常规筛查项目之一,它可以早期发现、定性评估和分析DR,对于保留患者的视功能、提高患者生活质量、降低DR医疗负担具有重要意义^[5],但中国DR患者主动筛查率仍不足20%^[5-6],这可能与我国糖尿病患者对DR认识不到位、医疗资源分布不均衡有关^[7]。

近些年来,人工智能(artificial intelligence, AI)在医学领域绽放光彩^[8-9],尤其是在眼科领域,AI被广泛用于DR^[10]、年龄相关性黄斑变性^[11]、青光眼^[12]和白内障^[13]等多种眼科疾病的筛查和诊断中。自动化DR筛查系统日渐成熟^[14-16],它们均有不俗的筛查性能,其中,IDX-DR系统成为首个被美国食品药品监督管理局(Food and drug administration, FDA)批准的完全自主的DR诊断系统,也是首个医学领域内完全自主的诊断系统^[16]。AI的优势在于它可以将眼科医生从繁重的图像筛查工作解放出来,使其更专注于疾病的诊疗,而且多项研究^[10, 17-20]也表示,自动化DR筛查系统的筛查性能等同或优于受过训练的人类分级者。因此,研发更精确的自动化DR筛查系统,将有助于解决医疗资源不足的问题,促进防盲工作的全面开展。本综述总结了AI在DR筛查和诊断领域的研究进展,了解这一领域的研究现状和主要问题,并对未来进行展望。

1 基于彩色眼底照相机的自动化DR筛查系统

Abràmoff等^[21]在2013年所发表的IDP模型^[22]的基础上加入了深度学习算法,组建了新的IDX-DR X2.1模型,并对其训练,使用公开的数据集Messidor-2进行外部验证,结果显示其ROC曲线下的面积(area under curve, AUC)值为0.980,灵敏度为96.8%,特异度为87%,

该研究的结果表明 IDx-DR X2.1 模型的性能明显优于在其他方面基本相同但不使用深度学习的 IDP 模型,深度学习算法有可能提高 DR 筛查的效率。随后在 2018 年,该团队在初级医疗保健机构招募了 900 例患者进行一项试验,结果显示该系统在临床环境中的灵敏度和特异度为 87.2% 和 90.7%,AI 系统将专科诊断能力带入了基层医疗机构^[16]。基于这些结果,美国 FDA 授权该系统来检测中重度 DR 和糖尿病性黄斑水肿 (diabetic macular edema, DME),其也成为了第一个进入临床工作的自动化 DR 诊断系统,此举将有可能防止每年成千上万的糖尿病患者的视力丧失。

随后, Gulshan 等^[23]以深度神经网络 Inception-v3 为架构,收集了 10 万余张眼底彩色图像进行建模,在公开的 Messidor-2 数据集和 EyePACS 数据集上进行外部验证,该模型设置了两个不同的参数点,以满足不同的临床需求。在不同的参数设置下,模型在 2 个外部数据集的灵敏度和特异度均 >90%。有研究团队将模型部署在印度的两家眼科保健中心,在真正的临床环境中对其进行性能测试,患者的眼底图像分别由眼底病学专家、经过训练的眼科医生和模型识别,以实际临床结果作为参考标准,模型在两个不同保健中心的数据集上的 AUC 分别为 0.963 和 0.98,识别可转诊 DR 和 DME 的敏感度和特异度在 88.9%~97.5% 之间,而且研究发现模型的性能丝毫不逊色于眼底病专家和受过训练的眼科医生,而且两家保健中心所使用的眼底照相机也不同,表明了该模型的普遍适用性^[10]。

2017 年, Ting 等^[24]开发了一个深度学习系统 (deep learning system, DLS), 并且使用近 50 万张来自不同国家和种族的眼底图像来训练和验证系统,这是已知的数据集规模最大的一次实验。DLS 在验证集的检测准确性,即 AUC 值为 0.936,灵敏度为 90.5%,特异度为 91.6%。同时检测另外 10 个不同种族、不同相机类型的数据集时,其 AUC 值范围是 0.889~0.983。在 2019 年,该团队还比较了 DLS 与人类评估员的筛查与诊断性能,还估计了两者所需的时间,DLS 和人类评估员花费的总时间分别为 125.4 和 1554.8h,在 DR 筛查性能方面,DLS 和人工并无差异^[20]。

国外对于 AI 在 DR 筛查与诊断领域的研究如火如荼,国内的研究也在进行。2019 年,李萌等^[25]通过迁移学习和 NASNet 架构算法,以 4465 张 DR 彩色眼底照片作为数据集,建立一个自动化 DR 诊断系统 (ZOC-DR-V1),该系统的灵敏度和特异度分别为 96.89% 和 93.57%,AUC 值为 0.994,同时作者也进行了一个人机竞赛,另取 1000 张眼底照片作为人机对抗用图,比较 AI 阅片系统与人工阅片的诊断效率,结果表明 AI 系统的诊断正确率可达眼科专业高级职称医生水平,而且相比于眼科专业高级职称医生 5s 左右的单张阅片时间,AI 系统仅需 2s 左右即可完成单张阅片,用时短,效率高,为大规模 DR 人群筛查提供了新的思路。2020 年,李治玺等^[26]使用自研的 AI 系统作为 DR 的初筛手段,在新疆维吾尔自治区进行大规模 DR 筛查,在不遗漏可转诊 DR 病例的情况下,减少约 60% 的图片分级工作量,且相较于人工出结果的时间 1.3d,AI 系统仅需 19.2min 即可完成从图像上传到报告完成。

2 基于智能手机眼底成像的自动化 DR 筛查系统

除了使用常规眼底成像设备来拍摄眼底照片,还出现了一种便携式设备——基于智能手机的眼底成像设备,体

积小、价格低、成像清晰、对于偏远地区和基层医院来说,是性价比比较高的一款眼底成像设备。2018 年印度推出智能手机眼底检查 (fundus on Phone, FOP)^[27],它的重量仅有传统成像设备的二十分之一,无需放大瞳孔即可成像。同年,印度 Rajalakshmi 等^[27]将此设备与 EyeArt 系统相结合,测试该设备在检测 DR 方面的作用,是首个将 AI 和基于智能手机的眼底成像设备结合的实验。该算法检测 DR 的灵敏度和特异度分别为 95.8% 和 80.2%。其他同样使用该眼底相机的研究团队^[28-30]也得到了相似的结果。巴西 Phelcom Technologies 公司的 Eyer 同样也是一台基于智能手机的眼底成像设备, Malerbi 等^[31]将其与 AI 算法结合,结果显示超过 80% 的患者图像质量良好,同时,算法的灵敏度和特异度为 97.8% 和 61.4%,AUC 值是 0.89。基于智能手机的眼底成像设备对于初级医疗保健机构来说,是很好的消息,市面上的眼底成像设备价格高昂,体积大,也无法随身携带,便携式设备的问世以及其与 AI 的结合将会开启社区及偏远地区 DR 初步筛查的新阶段。

3 基于超广角照相机的自动化 DR 筛查系统

上述的研究所采用的图像都是以黄斑为中心或视乳头为中心的 45 度范围的眼底照片,可观察的区域较小,DR 并不仅是只发生于中心视网膜,其在周边视网膜也会出现。近些年来,超广角眼底成像开始在自动化 DR 筛查领域崭露头角^[32-35]。2017 年, Wang 等^[34]探讨了 EyeArt 系统在检测欧堡超广角眼底图像中可转诊 DR 的灵敏度和特异度,实验结果显示灵敏度较高,特异度为中等,考虑原因是:(1) EyeArt 系统还未针对超广角图像进行参数优化;(2) 视网膜周边出现的与 DR 无关的改变也可能潜在地对算法造成混淆,因为后来对假阳性照片进行回顾,发现病灶多表现为色素改变。2019 年 Nagasawa 等^[35]开展了一项类似的研究,检测深度学习算法评估超广角眼底图像中的增殖性 DR 的准确性,他们利用采集到的超广角眼底图像对算法进行 9 折交叉验证,最终结果显示灵敏度为 94.7%,特异度为 97.2%,AUC 值为 0.969。超广角眼底成像技术与 AI 的结合将会成为未来的一个趋势,因为视网膜周围部的图像在预测 DR 进展方面起着关键的作用^[36],任何基于眼底图像的自动化 DR 诊断/预测工具都应该考虑检查中央和周边视网膜,而不是仅局限于使用以黄斑或视乳头为中心的彩色眼底照片,所以未来需要更大的超广角眼底图像数据集去训练和验证 AI 系统。

4 问题与展望

彩色眼底照相机是常用的眼底成像设备,适用于眼科专科门诊;基于智能手机的眼底成像设备小巧便携,适用于社区医院等初级医疗保健机构;超广角照相机可以发现周边视网膜病变;无论是哪种成像设备,AI 都展现了其不俗的识别性能,以此适应不同的临床环境。作为研究最成熟的彩色眼底照相机,目前已有相关产品进入临床使用阶段,比如 IDx-DR^[16],其可以直接给出是否需要就诊的建议,因此非眼科医生也可以使用该设备,但其也并非万能的,比如曾有过眼底手术史、妊娠糖尿病等患者不建议使用该设备进行筛查^[37]。中国也于 2020 年批准了来自深圳和上海的两款 DR 辅助诊断软件产品注册^[38],这两款产品的定位是辅助诊断,为临床医生提供参考,无法独立给出建议。AI 产品已在慢慢走向临床,但距离将其全面运用到临床中,还有很长的路要走。目前还存在一些挑战:(1) 数据集中的图像的单一性。目前用于训练和验证的

数据集中的图像仅涉及正常人和 DR 患者,而在真正的临床环境中,患者的眼底是很复杂的,可能存在除 DR 之外的多种病变,AI 目前尚无法准确区分这些病变;(2)建模的准确性依赖数据集的质量与数量。一家医院所能提供的 DR 图片量少,且因为涉及到患者隐私和伦理问题,医院之间无法共享医疗数据,由此出现“数据孤岛”现象,数据集小,训练效果不如意。2016 年,一种新式机器学习方法—联邦学习的出现将有助于解决这一困境^[39],它最大的特点是能够帮助多个用户在满足隐私保护、数据安全和政策法规的情况下,利用无法共享的数据进行学习和建模,由参数共享取代数据共享,这对打破数据安全壁垒具有很好的作用,在未来有可能解决数据孤岛这一问题;(3)AI 系统识别能力有限。对于质量较高的图片,AI 系统能很好地识别,但在一些非常规情况下,比如照片模糊、对比度差、角度扭曲等,在这些情况中,AI 系统还不能显现出较优的辨识能力;(4)神经网络的黑箱性^[40]。目前的 AI 筛查系统多基于深度神经网络构建,而神经网络是一种模拟人的大脑进行思考计算的算法,该算法内部有很多计算层与节点,层与层、节点与节点之间都可能交叉交换信息,这样的计算复杂度使得神经网络在解决某些大数据问题时得到超出一般算法的准确度。但是这种规模的计算太复杂,无法通过简单直接的公式进行说明,而医学诊断需要结果准确且具有可解释性,因此,这将成为 AI 系统应用到临床的一大阻碍;(5)成像设备局限。目前所用的图像还是多以黄斑或视乳头为中心的拍摄范围为 45 度的图像,但 DR 不仅局限于中心视网膜,未来应将超广角眼底摄像的图像纳入训练集,训练 AI 系统对这类图片的识别;(6)患者对 AI 系统是否接受。之前的研究多集中在 AI 系统在 DR 筛查和诊断方面的准确性,鲜有研究去探讨患者是否接受 AI 为自己看病,澳大利亚的一项研究^[18]对此进行过探讨,但其样本量较少,不足百人,后续需要较大的样本量去阐述这一问题。

《中国 2 型糖尿病防治指南(2020 年版)》已经明确提出 AI 筛查和分级诊断在糖尿病防治中具有巨大的潜力^[41],而且近些年来随着 AI 技术的快速发展,AI 系统的功能也在不断扩展,除了能够对 DR 进行自动分级,使患者了解病变的严重程度,还可以实现病变分割,即识别病灶的特征,同时依据病灶特征进行更准确的分级诊断^[42]。AI 的出现,有望会改变当前 DR 诊疗体系,在社区或非眼科门诊部署设备,对糖尿病患者进行普筛,并给出合适的建议,将大大降低 DR 的致盲率,提高糖尿病患者的生活质量,促进防盲工作的全面开展。

综上所述,作为一种新兴技术,虽然自动化 DR 筛查系统还存在一些挑战,但其在识别可转诊 DR 方面已展现出较高的特异度和灵敏度,检测性能也等同于或优于人工,既减轻了医生的工作负担,也提升了诊疗效率。所以,我们应对其充满信心,相信在未来通过完善算法和眼底成像设备,AI 将可以走进临床协助眼科医生做出诊断。

参考文献

- 1 邵毅,周召,葛倩敏. 糖尿病视网膜病变及黄斑水肿诊疗规范:英国皇家眼科医师学会指南解读. 眼科新进展 2021;41(7):601-607
- 2 Lechner J, O'Leary OE, Stitt AW. The pathology associated with diabetic retinopathy. *Vis Res* 2017;139:7-14
- 3 杨宇,田敏,吕红彬. 糖尿病视网膜病变的治疗进展. 眼科新进展 2015;35(5):497-500

- 4 邓宇轩,叶雯青,孙艳婷,等. 中国糖尿病视网膜病变患病率的荟萃分析. *中华医学杂志* 2020;100(48):3846-3852
- 5 中国医药教育协会智能医学专委会智能眼科学组,国家重点研发计划“眼科多模态成像及人工智能诊疗系统的研发和应用”项目组. 基于眼底照相的糖尿病视网膜病变人工智能筛查系统应用指南. *中华实验眼科杂志* 2019;37(8):593-598
- 6 卢黎蓉,张龄洁,邱朝霞. 糖尿病性视网膜病变的就诊现状及影响因素分析. *中国实用眼科杂志* 2011;29(11):1170-1172
- 7 王登学,刘珏,陈再洪. 糖尿病视网膜病变的社区预防. *重庆医学* 2020;49(13):2216-2219,2244
- 8 Lakhani P, Sundaram B. Deep learning at chest radiography: automated classification of pulmonary tuberculosis by using convolutional neural networks. *Radiology* 2017;284(2):574-582
- 9 刘念,陈宏翔. 人工智能在皮肤科领域的应用与发展. *中华皮肤科杂志* 2019;52(1):63-66
- 10 Gulshan V, Rajan RP, Widner K, et al. Performance of a deep-learning algorithm vs manual grading for detecting diabetic retinopathy in India. *JAMA Ophthalmol* 2019;137(9):987-993
- 11 Lee CS, Baughman DM, Lee AY. Deep learning is effective for the classification of OCT images of normal versus Age-related Macular Degeneration. *Ophthalmol Retina* 2017;1(4):322-327
- 12 Hemelings R, Elen B, Barbosa-Breda J, et al. Accurate prediction of glaucoma from colour fundus images with a convolutional neural network that relies on active and transfer learning. *Acta Ophthalmol* 2020;98(1):e94-e100
- 13 Gao XT, Lin S, Wong TY. Automatic feature learning to grade nuclear cataracts based on deep learning. *IEEE Trans Biomed Eng* 2015;62(11):2693-2701
- 14 Arenas-Cavalli JT, Abarca I, Rojas-Contreras M, et al. Correction: Clinical validation of an artificial intelligence-based diabetic retinopathy screening tool for a national health system. *Eye* 2021;35(10):2910
- 15 Bhaskaranand M, Ramachandra C, Bhat S, et al. The value of automated diabetic retinopathy screening with the EyeArt system; a study of more than 100,000 consecutive encounters from people with diabetes. *Diabetes Technol Ther* 2019;21(11):635-643
- 16 Abràmoff MD, Lavin PT, Birch M, et al. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *Npj Digit Med* 2018;1:39
- 17 Bellemo V, Lim ZW, Lim G, et al. Artificial intelligence using deep learning to screen for referable and vision-threatening diabetic retinopathy in Africa: a clinical validation study. *Lancet Digit Health* 2019;1(1):e35-e44
- 18 Keel S, Lee PY, Scheetz J, et al. Feasibility and patient acceptability of a novel artificial intelligence-based screening model for diabetic retinopathy at endocrinology outpatient services: a pilot study. *Sci Rep* 2018;8(1):4330
- 19 Raumviboonsuk P, Krause J, Chotcomwongse P, et al. Deep learning versus human graders for classifying diabetic retinopathy severity in a nationwide screening program. *NPJ Digit Med* 2019;2:25
- 20 Ting DSW, Cheung CY, Nguyen Q, et al. Deep learning in estimating prevalence and systemic risk factors for diabetic retinopathy: a multi-ethnic study. *Npj Digit Med* 2019;2:24
- 21 Abràmoff MD, Lou YY, Erginay A, et al. Improved automated detection of diabetic retinopathy on a publicly available dataset through integration of deep learning. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2016;57(13):5200-5206
- 22 Abràmoff MD, Folk JC, Han DP, et al. Automated analysis of retinal images for detection of referable diabetic retinopathy. *JAMA Ophthalmol* 2013;131(3):351-357
- 23 Gulshan V, Peng L, Coram M, et al. Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs. *JAMA* 2016;316(22):2402-2410

- 24 Ting DSW, Cheung CY, Lim G, *et al.* Development and validation of a deep learning system for diabetic retinopathy and related eye diseases using retinal images from multiethnic populations with diabetes. *JAMA* 2017;318(22):2211-2223
- 25 李萌, 王耿媛, 夏鸿慧, 等. 眼底阅片人工智能系统在糖尿病视网膜病变筛查中的临床价值评价. *中华实验眼科杂志* 2019;37(8):663-668
- 26 李治玺, 张健, Fong Nellie, 等. 人工智能初筛分流在大规模糖尿病视网膜病变筛查中的应用. *中华医学杂志* 2020;100(48):3835-3840
- 27 Rajalakshmi R, Subashini R, Anjana RM, *et al.* Automated diabetic retinopathy detection in smartphone-based fundus photography using artificial intelligence. *Eye (Lond)* 2018;32(6):1138-1144
- 28 Natarajan S, Jain A, Krishnan R, *et al.* Diagnostic accuracy of community-based diabetic retinopathy screening with an offline artificial intelligence system on a smartphone. *JAMA Ophthalmol* 2019;137(10):1182-1188
- 29 Sosale B, Aravind SR, Murthy H, *et al.* Simple, Mobile-based Artificial Intelligence Algorithm in the detection of Diabetic Retinopathy (SMART) study. *BMJ Open Diabetes Res Care* 2020;8(1):e000892
- 30 Sosale B, Sosale AR, Murthy H, *et al.* Medios - An offline, smartphone-based artificial intelligence algorithm for the diagnosis of diabetic retinopathy. *Indian J Ophthalmol* 2020;68(2):391-395
- 31 Malerbi FK, Andrade RE, Morales PH, *et al.* Diabetic Retinopathy Screening Using Artificial Intelligence and Handheld Smartphone-Based Retinal Camera. *J Diabetes Sci Technol* 2022;16(3):716-723
- 32 Tang FY, Luenam P, Ran AR, *et al.* Detection of diabetic retinopathy from ultra-widefield scanning laser ophthalmoscope images: a multicenter deep learning analysis. *Ophthalmol Retina* 2021;5(11):1097-1106
- 33 Zhang W, Zhao XJ, Chen YY, *et al.* DeepUWF: an automated ultra-wide-field fundus screening system via deep learning. *IEEE J Biomed Health Inform* 2021;25(8):2988-2996
- 34 Wang K, Jayadev C, Nittala MG, *et al.* Automated detection of diabetic retinopathy lesions on ultrawidefield pseudocolour images. *Acta Ophthalmol* 2018;96(2):e168-e173
- 35 Nagasawa T, Tabuchi H, Masumoto H, *et al.* Accuracy of ultrawide-field fundus ophthalmoscopy - assisted deep learning for detecting treatment-naïve proliferative diabetic retinopathy. *Int Ophthalmol* 2019;39(10):2153-2159
- 36 Arcadu F, Benmansour F, Maunz A, *et al.* Deep learning algorithm predicts diabetic retinopathy progression in individual patients. *NPJ Digit Med* 2019;2:92
- 37 US Food and Drug Administration. FDA permits marketing of artificial intelligence-based device to detect certain diabetes-related eye problems [EB/OL]. <https://www.fda.gov/NewsEvents/Newsroom/PressAnnouncements/ucm604357.htm>. 2018-8-12
- 38 国家药品监督管理局. 糖尿病视网膜病变眼底图像辅助诊断软件产品获批上市 [EB/OL]. <https://www.nmpa.gov.cn/zhuanti/ypqxgg/gggzjzh/20200810093435157.html>, 2020-08-10
- 39 McMahan HB, Moore E, Ramage D, *et al.* Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. 2016; arXiv: 1602.05629. <https://arxiv.org/abs/1602.05629>
- 40 胡包钢, 王泳, 杨双红, 等. 如何增加人工神经网络的透明度? 模式识别与人工智能 2007;20(1):72-84
- 41 中华医学会糖尿病学分会, 朱大龙. 中国 2 型糖尿病防治指南 (2020 年版). *中华糖尿病杂志* 2021;13(4):315-409
- 42 陈超, 杨冰洁, 叶珂男, 等. 基于深度学习的糖尿病性视网膜病变的眼底图像辅助诊断系统. *人工智能* 2021;8(3):38-46