

本文引用:王 萱,陈向东,刘志敏,欧阳红波. 人工智能在眼底病变筛查中的应用进展[J]. 湖南中医药大学学报, 2021, 41(12): 1975-1980.

人工智能在眼底病变筛查中的应用进展

王 萱^{1,2,3,4}, 陈向东^{1,3,4*}, 刘志敏^{1,3,4}, 欧阳红波⁵

(1.湖南中医药大学第一附属医院,湖南 长沙 410007;2.湖南中医药大学,湖南 长沙 410208;
3.湖南省中医药防治眼耳鼻喉疾病与视功能保护工程技术研究中心,湖南 长沙 410208;4.中医药防治眼耳鼻喉疾病
湖南省重点实验室,湖南 长沙 410208;5.安乡县第三人民医院,湖南 常德 415600)

〔摘要〕人工智能(artificial intelligence, AI)不断普及,为医学等传统行业的发展带来了前所未有的契机。眼科是一门以影像学诊断为主的学科,有着与AI深度结合的潜力。中医眼科的特色是整体观念和辨证论治,故将整体症状与舌脉象融入眼科AI系统,对疾病的诊断十分有必要。以部分眼病(糖尿病视网膜病变、早产儿视网膜病变)为例,从眼底病变的筛查与预测的重要性、远程医疗现状、眼底图像的采集及自动诊断、AI与中医辨证论治的结合等方面,介绍目前AI在部分眼底病变筛查中的新技术、新应用,阐述目前发展的不足与面临的挑战。

〔关键词〕人工智能;眼底病变;中医眼科;糖尿病视网膜病变;早产儿视网膜病变

〔中图分类号〕R276.7 〔文献标志码〕A 〔文章编号〕doi:10.3969/j.issn.1674-070X.2021.12.028

Progress of Artificial Intelligence in Fundus Disease Screening

WANG Xuan^{1,2,3,4}, CHEN Xiangdong^{1,3,4*}, LIU Zhimin^{1,3,4}, OUYANG Hongbo⁵

(1. The First Affiliated Hospital of Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410007, China; 2. Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory for Prevention and Treatment of Ophthalmology and Otolaryngology Diseases with Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China; 4. Hunan Provincial Engineering and Technological Research Center for Prevention and Treatment of Ophthalmology and Otolaryngology Diseases with Chinese Medicine and Protecting Visual Function, Changsha, Hunan 410208, China; 5. Anxiang County Third People's Hospital, Changde, Hunan 415600, China)

〔Abstract〕The continuous popularization of artificial intelligence (AI) has brought unprecedented opportunities for the development of traditional industries such as medicine. Ophthalmology is a subject based on imaging diagnosis, which has the potential of deep integration with AI. The characteristics of ophthalmology of traditional Chinese medicine are holistic concept and syndrome differentiation and treatment. Therefore, it is necessary to integrate the overall symptoms and tongue pulse into the ophthalmic AI system for the diagnosis of diseases. Taking some eye diseases as an example, this paper introduces the new technology and application of AI in screening fundus lesions from the aspects of the importance of screening and prediction of fundus lesions, the status quo of telemedicine, the collection and automatic diagnosis of fundus images, and the combination of AI

〔收稿日期〕2020-06-10

〔基金项目〕国家自然科学基金面上项目(61771192);湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30520);长沙市自然科学基金项目(kq2014226);湖南省中医药管理局重点项目(201917);湖南中医药大学中医学一级学科开放性基金项目(2018ZYX60);湖南省研究生科研创新项目(CX20190588);湖南省重点实验室开放基金项目(2018YZD10);湖南中医药大学研究生创新课题(2019CX70);湖南省教育厅重点项目(19A362)。

〔作者简介〕王 萱,女,硕士,研究方向:中医眼底病方向。

〔通信作者〕*陈向东,男,教授,主任医师,博士研究生导师,E-mail:564259166@qq.com。

and TCM syndrome differentiation and treatment, and expounds the shortcomings and challenges of current development.

[**Keywords**] artificial intelligence; fundus disease; ophthalmology of traditional Chinese medicine; diabetic retinopathy; retinopathy of prematurity

科学家艾伦·纽厄尔和奥利弗·塞弗里奇在 1955 年分别提出了下棋与计算机模式识别的研究,人工智能(artificial intelligence, AI)雏形首次出现^[1]。AI 发展迅速,截至 2018 年,中国 AI 市值规模已达 238.2 亿元。AI 正在惠及人类生活的方方面面,也推动了医疗行业的迅速发展。2017 年,中山大学眼科中心建立了白内障 AI 平台,公布了眼科 AI 诊断和治疗系统的消息,从此开启了中国眼科界 AI 的新纪元。在此基础上,眼底疾病的 AI 诊断和治疗也在悄然崛起。利用 AI 技术对部分眼底疾病进行早期筛查能够延缓病程进展,有效地降低致盲率,故本文以糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)、早产儿视网膜病变(retinopathy of prematurity, ROP)为例,简述 AI 时代下眼底病变筛查方式的进展。

1 眼底病变筛查与预测的重要性

眼科与影像学的关系十分密切,尤其是眼底病学,更是高度依赖于影像诊断学。眼底血管作为人体唯一可以无创直接观察的血管,对眼底疾病的诊断具有极其重要的意义。人体的许多全身疾病均可在视网膜上有所体现。比如糖尿病、高血压等。眼底发生的病变程度也反映了全身疾病的严重程度,能够评估疾病的转归和预后。但由于医生诊断的个体差异性较大,眼科医疗人才匮乏、优秀的眼科医生培养周期过长等现实因素,导致了有限的眼科医生无法承担过重的眼底疾病诊疗业务,致使原本可早期干预防治的眼底疾病由于发现不及时,未进行有效治疗,从而错过最佳治疗时间,延误治疗,甚至致盲。AI 的兴起,既弥补了肉眼识别图像的个体化差异,又可迅速批量处理大量图像,还可搭建起远程医疗的桥梁,节省了大量的时间、空间、人力,服务人群更加广泛。

2 眼底疾病远程医疗现状

眼病致盲是危害最严重的残疾之一,虽不致生命危险,但严重影响生活质量。而众多眼病具有群防群治的特点,且眼科的疾病诊断以影像学为主,故只

要做好早期筛查工作,便可挽救很多人的视力。基层的专科医生资源短缺,为了节省人力物力,远程医疗为众多患者提供了极大的便利,因此,眼病在远程医疗方面市场需求巨大。

2.1 部分眼底疾病国外远程医疗现状

2.1.1 DR 的国外远程医疗现状 DR 是糖尿病微血管病变在眼部的重要表现,属于糖尿病的严重并发症之一。DR 的远程医疗在国外已得到发展。英国国家卫生系统诊断性眼科筛查项目(national health system diabetic eye screening program, NDESP)是世界上第一个覆盖全国的政府级筛查和监测项目。截至 2012 年,有 200 万人参加了该项目的筛选。2013 年,近 7.4 万名 DR 患者转诊至专业眼科医生,4600 名患者得到及时治疗。研究表明,该项目使糖尿病患者的视力丧失率显著降低^[2]。英国开展了 NDESP 后,英格兰和威尔士失明的主要原因不再是 DR^[3]。JOSLIN 视觉网络是美国的一个远程医疗项目。其网络诊断结果与金标准高度一致,完全一致率和一致率分别达到了 72.5%和 89.3%,尤其是糖尿病黄斑水肿的诊断。与传统项目相比,该项目的后续效果较好,对疾病的发现和治疗效果明显。接受激光治疗的病人在 4 年内增加了 50%^[4]。一项涉及美国巴尔的摩 DigiScope 远程医疗项目 1600 人的研究表明,远程观察结果与眼科医生的一致性为 91%。目前,已经有超过 10 万人在美国和国外接受了筛查。首次筛查的患者,远程项目 DR 转诊率为 20%,与其他项目基本相同^[5]。另一项研究表明,加拿大阿尔伯塔省的远程诊断和治疗项目的图片在 CSDME、高风险 NPDR 和高危 PDR 方面与 7 视野的 ETDRS 图片相比具有很高的 consistency($R=1.00$)。截至 2009 年,法国巴黎的 ophdiat 系统已经对 3.8 万人进行了筛查和监测,2005 年至 2009 年,筛查率从 50%上升到了 74.5%,对于这些患者,专业的眼科医生节省了 60%的时间^[6]。荷兰也有 Eyecheck 系统,到 2010 年,全国 30%的糖尿病患者参与了该项目的筛查和监测^[7]。

2.1.2 ROP 的国外远程医疗现状 ROP 与 DR 相

比,病情进展较快,是造成新生儿失明的主要原因之一。据不完全统计,每年全世界有32 000例患者因ROP相关的疾病失明,尤其是在中低收入的发展中国家^[8]。eROP团队对来自13个北美中心的数据进行分析,训练有素的成像师使用数码相机进行数字成像具有94%的灵敏度,且1257名婴儿诊断检查确定了18.2%的眼睛(19.4%的婴儿)为保证转诊ROP(referral-warranted ROP, RW-ROP)^[9-10]。蒙大拿州曾做过一项基于“真实世界”回顾性研究,137名来自一个NICU的婴儿均报告了良好的结果,其中13人需要转院,9人最终需要激光治疗。在他们的回顾调查当中,超过4~5年来没有婴儿发展到4级或5级ROP^[11]。

2.2 部分眼底疾病国内远程医疗现状

2.2.1 DR的国内远程医疗现状

目前,我国部分地区也在开展DR的远程医疗。例如,北京市德胜社区DR远程筛查系统。该系统以免散瞳数码眼底相机和互联网传输技术为基础,采集社区内1355例2473只眼的2型糖尿病患者的前段和眼底图像,并将图像传输到医院阅片中心,由有经验的眼科医生对图像进行分析并反馈结果,远程筛查系统眼底图像读取与现场扩瞳检眼镜DR诊断等级一致性较好($kappa=0.895$),黄斑水肿诊断一致性良好($kappa=0.763$),有视网膜光凝与光凝分级诊断结果一致($kappa=1.000$)。单个样本的远程筛查需要10 min左右,而瞳孔扩张后眼底检查需要23 min,大大提升了诊疗效率。远程系统随访率75.2%^[12]。类似的研究上海市北新泾社区DR远程筛查系统也在进行。传统检查与眼底摄影诊断DR的眼数相同,一致性检验 $kappa$ 值为0.885。不同分级DR诊断一致性良好。每个受试者的实时筛查所需时间为5~7 min^[13],大大节省了患者的就诊时间。

2.2.2 ROP的国内远程医疗现状

深圳市眼科医院通过ROP远程筛查阅片系统筛查的早产儿1402例2804眼,主要利用标准方位眼底摄像技术,筛查阳性率为6.0%;患儿总发病率为6.3%;需要激光或抗血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)治疗的重症ROP患儿28例56眼,占2.0%;所有患儿无一例漏诊、误诊、贻误最佳治疗时机者。此研究假阴性率为0.3%,灵敏度为94.4%^[14]。

陈亦棋等^[15]的研究显示,有临床意义的ROP远程筛查的灵敏性和特异性均较高,治疗性ROP的灵敏度为100.00%,特异性为98.59%。

由此可发现,我国基于AI的眼病远程筛查系统主要集中在发达一线城市,其余城市甚至偏远地区的普及还需较长时间。但我国眼底疾病发病率在部分不发达地区极高,致盲率极高,严重威胁国人的视力健康,故我国基于AI的眼病远程筛查系统的全面普及任重道远。

3 眼病信息的自动诊断系统

大多数远程诊断和治疗中心使用蔡司散瞳眼底照相机、托普康免散瞳彩色眼底照相机或佳能免散瞳眼底照相机等设备来进行图像采集。目前的发展趋势是,发展与远程诊疗阅片配套的便携设备。正如互联网的发展使电子商务大行其道一样,即使足不出户,来自世界各地的商品也可以送货回家。同样,优质医疗资源也可以借网络、智能手机和移动应用的发展,跨越地域限制走入千家万户。智能手机便是丰富检查手段、辅助远程医疗的极佳工具。2015年,韩国三星公司生产的智能手机眼底摄影系统便携式验眼套件收集评估了各收入阶层人士的评测数据。苹果的D-EYE系统也可通过光磁连接设备与手机相连。一项对120人的研究表明,散瞳状态下的眼底图像在眼底病筛查中具有较高的灵敏度,并与远程医疗设备相匹配。目前,该手机设备除了具有眼底图像采集功能,还可以集成视力、眼压、血糖、血压等通用状态监测软件。这些功能可以为远程诊断和治疗提供一个新的角度和更全面的信息。目前,便携式OCT也在开发中。该装置的研制对糖尿病黄斑水肿的监测和随访具有重要意义^[16]。

3.1 DR的自动诊断

DR的诊断主要依靠眼底图像。随着AI技术的发展,利用智能算法或者深度学习模型进行阅片已经成为新的发展趋势。2018年,美国FDA正式批准使用IDX-DR对成人糖尿病患者进行筛查,IDX-DR作为第一个获得批准的DR筛查AI设备。北京协和医院的眼科AI团队与中国人民大学AI与媒体计算实验室合作成立了一个由20多人组成的眼底阅片小组。回顾性地对7万张彩色眼底照片100万

个病灶进行了人工标记和分类,并成功开发了基于病灶识别的DR AI深度学习模型。测试结果表明,DR转诊的敏感度为86.6%,与谷歌团队的诊断准确率相当^[17]。首都医科大学附属同仁医院内分泌科利用数学形态学和支持向量机(support vector machine, SVM)分类技术,设计了一种检测DR包括出血、渗出、微血管瘤等病变的算法。然后根据DR的临床诊断标准,对眼底图像进行自动分类诊断,实现自动筛查。国际梅西多数据库根据专家鉴定的诊断结果进行筛选和判断。在1200张眼底图像中,系统的灵敏度、特异性和检测时间分别为93.8%、94.5%和9.83 s^[18]。湖州师范大学附属医院眼科通过合作单位开发的深度学习算法智能筛选程序,发现DR筛选的准确率为0.73,灵敏度为82%,特异性为91%,特异性良好,研究表明智能诊断与人工诊断的一致性佳($kappa=0.77$),说明智能诊断与裂隙灯结合前置镜人工诊断的一致性较好,是一种较为可靠的DR筛查方法^[19]。连剑等^[20]针对多光谱眼底图像提出一系列配准、去模糊及分割算法,可对眼底微动脉瘤、视网膜出血及硬渗出物进行自动检测,并利用自动检测结果指导眼科医生工作,大幅减少医生人工标注分割所需时间。Kermany等^[21]使用卷积神经网络,对脉络膜新生血管、DME、玻璃膜疣与正常眼底图片进行分类,准确率为96.6%,灵敏度和特异度分别达97.8%和97.4%。同时创立了80 000多张已标注的OCT数据集,为后续研究者提供重要数据支持。杨柳茂^[22]、吴新^[23]等的研究,也使用卷积神经网络对OCT图像中的DR进行分类和检测取得较好效果。Walton等^[24]在美国德州在基层医疗机构按照标准流程采集15 015名患者的非散瞳、自动对焦数字眼底照片,在云端通过基于神经网络方法的自动筛查程序进行DR检测分级,敏感性66.4%,假阴性2%。

3.2 ROP的自动诊断

武汉大学人民医院眼科中心建立了38 895张图像构建眼底图像大规模数据集,利用深度学习网络,通过对模型的训练实现了ROP的自动诊断,平均准确率为0.931^[25]。Brwon等^[26]设计了“i-ROP-DL”模型来对ROP附加病变进行自动诊断,该系统对ROP附加病变的诊断准确率达91%。Wang等^[27]开发的Deep ROP模型,可完成ROP识别和分级,对

ROP的诊断敏感度达84.91%,特异度达96.90%;对ROP的分级可达到敏感度93.33%,特异度73.63%的程度,甚至优于人类专家的水平。但也有专家提出,大部分ROP筛查系统只针对眼球后极部视图,虽然很少出现有严重病变发生而后极部无改变的现象,但扩大筛查区域增加额外输出,能够使算法模型性能进一步提高,超越甚至替代人工阅片^[28]。

4 AI与眼底疾病中医辨证论治的结合

长期以来,中医辨证是中医诊断疾病的主要方法,中医眼科学强调局部辨证与整体辨证相结合,所以不仅要重视局部体征,更要重视全身表现和舌脉。北京中医药大学东直门医院眼科根据教科书上列举的各种DR的辨证分型症状及眼底表现,配上相对应的眼底图片,并结合目前眼科领域常用OCT图像,进行中医辨证论治,并用于教学^[29]。

朱贵东构建了一个“望目辨证”的数字化实验系统并初步验证其可行性^[30]。辽宁科技大学电子信息团队利用计算机视觉(computer vision),常称Open CV,利用摄像头和计算机代替人眼,将人眼分为多个区域进行数字化诊断,与中医传统目诊相结合,设计每个区域对应身体不同部位,反映身体内部不同病理改变,解决了临床的部分诊断难题^[31]。Python是目前AI开发的主流语言,国内已经有基于Python对证素辨证心系疾病的诊断方法进行研究的相关报道^[32]。宁波市海曙区中医医院也基于Python语言对中医诊疗信息管理系统进行了优化与升级,大大提高中医临床数据的整合质量,促进中医辨证诊疗管理水平的提升^[33]。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)是一种深度算法模型,它可以模拟人脑各个层次的神经结构,处理复杂的数据,使AI具有思维能力和关联推理能力。其核心是对人类意识和思维的模拟和拓展。ANN为传统中医理论与现代科学技术结合进行中医辨证论治提供了有利条件。ANN中通常包括三种类型的处理单元:输入单元、输出单元和隐含层单元^[34]。输入单元接收外部世界的信号和数据;输出单元实现系统处理结果的输出;隐藏层单元位于输入和输出单元之间,外部系统无法观察到。深度学习是一种深度神经网络,它一般通过增加隐含层的

数量,结合底层特征发现数据的分布式特征表示,形成更抽象的高层表示属性类别或特征。利用深度学习算法对眼底图像进行分类,提取疾病的局部病理特征,并结合患者全身表现,与目前已比较成熟的舌诊脉诊仪结合使用,建立新的算法模型,实现眼底疾病的中西医结合诊断和治疗。虽然目前我国这一方面尚属空白,但随着科学技术的成熟与发展,相信AI与中医筛查眼部常见病的有机结合指日可待。

5 面临的问题及原因

5.1 数据集标准不一致

很多眼底疾病表现较为相似,其诊断主要依靠经验丰富的医生,而且不同医生诊断会存在一定差异性。针对这种情况,国内外许多研发团队收集了大量不同眼病的眼底图片,邀请资深眼科阅片医生进行阅片,对图片进行分级、分区,建立了一些常见疾病的诊断数据集,但仍然有较多疾病没有官方认可的数据集,各类数据集良莠不齐,使目前的诊疗工作受到了限制。

5.2 缺乏中医眼科及AI学科交叉人才

目前,中医类院校普遍缺乏工科专业,中医药专业也未开设中医药与AI结合方向课程,大部分中医药类AI产品研发依赖于中医药人才与工科人才的合作,此种学术合作较为生硬,缺乏学术思想的碰撞。综合类院校中工科设计产品由于不具备中医药教育背景,很难达到临床诊疗标准,而中医药类学院由于技术水平的限制,无法将抽象的中医药知识融入于AI研发当中。导致国内优秀的研发团队和平台较少,未来应当增进学科之间的交流,培养更多的中医眼科与AI交叉学科高学历、高层次人才。

5.3 中医四诊信息客观化研究不足

中医学起源于远古时代的巫医,自古以来便带有浓厚的主观色彩,发展至今天,中医四诊仍旧大部分依靠医生主观判断,这跟AI算法量化、细化的标准存在极大矛盾。而AI目前在中医领域的研究主要是模拟人类的中医思维进行诊疗,但中医四诊客观化的研究太少,很多辨证分型模棱两可,无法运用到具体算法当中,这给AI算法与中医诊疗结合带来了极大的困难,是中医继承与创新道路上必须攻克的一道难关。

6 结语

AI日渐走入中医眼科领域,从检查诊断到治疗康复,带来了一系列变革。本文以部分眼病为例,从筛查与预测的重要性、远程医疗现状、眼底图像的采集及自动诊断、AI与中医辨证论治的结合等方面,介绍了目前AI在眼底疾病方面的新技术、新应用,也阐述了发展的不足与面临的挑战。不可否认AI的出现和普及为医学事业带来了极大的便利,但目前AI仍不能取代临床医生进行临床诊疗,临床仍需要大量技术过硬的医生,而一个好的医生也不能单纯依靠AI系统来进行诊疗,还需依靠过硬的专业素养。希望在不久的将来,AI与临床医生的配合可以为更多可预防的失明和低视力患者提供早期诊断和治疗,提高患者的生活质量,早日实现AI与中医眼科诊疗的有机结合。

参考文献

- [1] 张梓堃.人工智能的历史与发展[J].数字通信世界,2018(11):149-150.
- [2] SCANLON P H. The English National Screening Programme for diabetic retinopathy 2003-2016[J]. Acta Diabetologica, 2017, 54(6): 515-525.
- [3] GARGEYA R, LENG T. Automated identification of diabetic retinopathy using deep learning[J]. Ophthalmology, 2017, 124(7): 962-969.
- [4] MISRA A, BACHMANN M O, GREENWOOD R H, et al. Trends in yield and effects of screening intervals during 17-years of a large UK community-based diabetic retinopathy screening programme[J]. Diabetic Medicine, 2009, 26(10): 1040-1047.
- [5] CONLIN P R, FISCH B M, ORCUTT J C, et al. Framework for a national teleretinal imaging program to screen for diabetic retinopathy in Veterans Health Administration patients[J]. The Journal of Rehabilitation Research and Development, 2006, 43(6): 741.
- [6] JOHANSEN M A, FOSSEN K, NORUM J, et al. The potential of digital monochrome images versus colour slides in telescreening for diabetic retinopathy[J]. Journal of Telemedicine and Telecare, 2008, 14(1): 27-31.
- [7] SCHULZE-D BOLD C, ERGINAY A, ROBERT N, et al. Ophdiat: Five-year experience of a telemedical screening programme for diabetic retinopathy in Paris and the surrounding area[J]. Diabetes & Metabolism, 2012, 38(5): 450-457.
- [8] BLENCOWE H, MOXON S, GILBERT C. Update on blind-

- ness due to retinopathy of prematurity globally and in India[J]. *Indian Pediatrics*, 2016, 53(Suppl 2): S89-S92.
- [9] QUINN G E, GROUP E R COOPERATIVE. Telemedicine approaches to evaluating acute-phase retinopathy of prematurity: Study design[J]. *Ophthalmic Epidemiology*, 2014, 21 (4): 256-267.
- [10] QUINN G E, YING G S, DANIEL E, et al. Validity of a telemedicine system for the evaluation of acute-phase retinopathy of prematurity[J]. *JAMA Ophthalmology*, 2014, 132(10): 1178-1184.
- [11] WEAVER D T, MURDOCK T J. Telemedicine detection of type 1 ROP in a distant neonatal intensive care unit [J]. *Journal of AAPOS*, 2012, 16(3): 229-233.
- [12] 梁舒婷,才 艺,白向丽,等.北京市德胜社区糖尿病视网膜病变远程筛查系统的应用[J].*中华实验眼科杂志*,2018,36(1):40-45.
- [13] 彭金娟,邹海东,王伟伟,等.上海市北新泾社区糖尿病视网膜病变远程筛查系统的应用研究[J].*中华眼科杂志*,2010,46(3):258-262.
- [14] 田汝银,张国明,谢 昊,等.标准方位眼底摄像技术在早产儿视网膜病变远程筛查中的应用[J].*眼科新进展*,2019,39(6):568-570.
- [15] 陈亦棋,祝晨婷,沈丽君,等.早产儿视网膜病变远程筛查的有效性评估[J].*中华眼底病杂志*,2017,33(6):633-634.
- [16] MOHAMMADPOUR M, HEIDARI Z, MIRGHORBANI M, et al. Smartphones, tele-ophthalmology, and VISION 2020[J]. *International Journal of Ophthalmology*, 2017, 10(12): 1909-1918.
- [17] KIM D B, ROSS E, PHAM K, et al. New handheld, nonmydriatic ERG device to screen for diabetic retinopathy and other eye diseases[J]. *Hemoglobin*, 2014, 1(7):1-3.
- [18] 陈柯羽,于伟泓,张 华.眼科人工智能[J].*中国数字医学*,2019,14(3):85-87.
- [19] 朱江兵,柯 鑫,刘 畅,等.基于计算机视觉的糖尿病视网膜病变自动筛查系统[J].*首都医科大学学报*,2015,36(6):848-852.
- [20] 连 剑.多光谱眼底图像处理算法研究[D].济南:山东师范大学,2019:1-83.
- [21] KERMANY D S, GOLDBAUM M, CAI W J, et al. Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning[J]. *Cell*, 2018, 172(5): 1122-1131.
- [22] 杨柳茂.基于 OCT 图像的视网膜疾病分类方法研究[D].长沙:湖南大学,2018.
- [23] 吴 新.基于深度学习的视网膜病变光学相干断层图像识别[D].广州:广东工业大学,2018.
- [24] WALTON O B, GAROON R B, WENG C Y, et al. Evaluation of automated teleretinal screening program for diabetic retinopathy[J]. *JAMA Ophthalmology*, 2016, 134(2): 204-209.
- [25] 童 妍,卢 苇,徐阳涛,等.基于深度学习的早产儿视网膜病变的临床辅助诊断[J].*中华实验眼科杂志*,2019(8):647-651.
- [26] BROWN J M, CAMPBELL J P, BEERS A, et al. Automated diagnosis of plus disease in retinopathy of prematurity using deep convolutional neural networks[J]. *JAMA Ophthalmology*, 2018, 136(7): 803-810.
- [27] WANG J Y, JU R, CHEN Y Y, et al. Automated retinopathy of prematurity screening using deep neural networks[J]. *EBio Medicine*, 2018, 35: 361-368.
- [28] 黎 彪,丁雅璐,邵 毅.人工智能在小儿眼科领域的应用研究进展[J].*国际眼科杂志*,2020,20(8):1363-1366.
- [29] 张 南,赵静如,许家骏,等.糖尿病视网膜病变眼底图像库结合中医辨证在教学中的应用[J].*现代中医临床*,2016,23(3):42-44.
- [30] 朱贵冬.中医“望目辨证”的数字化技术研究[D].北京:中国科学院,2006.
- [31] 朱晓萌,姜 峰,庞嘉楠.数字图像处理技术在中医眼诊方面的应用[J].*科技创新导报*,2020,17(16):148-149,151.
- [32] 邓文祥,何德智,陈桂萍,等.运用 Python 优化证素辨证心系疾病诊疗系统的思考[J].*中国中医药现代远程教育*,2019,17(11):130-133.
- [33] 鲍平波.运用 Python 优化中医辨证诊疗系统的思考[J].*中医药管理杂志*,2020,28(4):61-62.
- [34] 蒋 琰,胡 涛,杨 宁.医学中的人工智能应用[J].*现代预防医学*,2009,36(8):1580-1583.

(本文编辑 贺慧娥)