

中国智能眼科发展和研究现状之我见

龚迪^{1,2}, 李王婷¹, 李小萌³, 万程⁴, 周永进⁵, 许言午^{6,7}, 张少冲¹, 杨卫华¹

引用: 龚迪, 李王婷, 李小萌, 等. 中国智能眼科发展和研究现状之我见. 国际眼科杂志, 2024, 24(3): 448-452.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No. 62306254); 深圳市医疗卫生三名工程项目 (No. SZSM202311012); 广东省高水平临床重点专科 (No. SZGSP014); 深圳市科技创新委员会可持续发展专项 (No. KCXFZ20211020163813019)

作者单位:¹(518040) 中国广东省深圳市眼科医院 深圳市眼病防治研究所;²(510632) 中国广东省广州市, 暨南大学附属第一医院眼科;³(999077) 中国香港特别行政区, 香港科技大学电子及计算机工程学系;⁴(211106) 中国江苏省南京市, 南京航空航天大学电子信息工程学院;⁵(518061) 中国广东省深圳市, 深圳大学医学部生物医学工程学院;⁶(510641) 中国广东省广州市, 华南理工大学未来技术学院;⁷(510320) 中国广东省广州市, 人工智能与数字经济广东省实验室(广州)

作者简介: 龚迪, 暨南大学在读博士研究生, 研究方向: 智能眼科、疾病风险预测模型。

通讯作者: 张少冲, 硕士, 主任医师, 博士研究生导师, 深圳市眼科医院院长, 研究方向: 智能眼科、眼底外科. zhangshaochong@gzzoc.com; 杨卫华, 博士, 主任医师, 深圳市眼科医院大数据与人工智能办公室主任, 研究方向: 智能眼科、眼科影像. benben0606@139.com

收稿日期: 2023-11-30 修回日期: 2024-01-18

摘要

本文分析了中国智能眼科领域的现状、技术发展、学术交流平台、政策支持以及未来的挑战和解决方案。在技术方面, 中国智能眼科在糖尿病视网膜病变、眼底图像分析等多个领域取得了显著进展, 包括医学人工智能产品的质量评价、临床研究方法、技术评价和产业规范等方面。研究人员通过制定一系列临床应用指南和标准, 不断提升智能眼科技术的安全性和规范水平。学术交流平台的建设为多领域专业人士提供了广泛合作的机会, 同时各类学术期刊也为智能眼科研究提供了发表平台。在公共政策方面, 中国政府通过一系列文件和法规为智能眼科的发展创造积极的政策环境的同时, 也提供了法律依据和管理框架。然而, 技术创新、数据隐私与安全、法规滞后、人才短缺等问题仍然是未来发展的挑战。为了应对这些问题, 未来需要加强技术研发、法规制度建设、人才培养, 并提高患者对新技术的认知和接受度。通过全面解决这些挑战, 中国智能眼科有望在全球范围内更进一步引领该行业的发展, 为眼科医疗领域带来更多创新和便利。

关键词: 智能眼科; 图像分析; 应用标准; 学术交流; 政策支持

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2024.3.22

Opinion on the development and research status of intelligent ophthalmology in China

Gong Di^{1,2}, Li Wangting¹, Li Xiaomeng³, Wan Cheng⁴, Zhou Yongjin⁵, Xu Yanwu^{6,7}, Zhang Shaochong¹, Yang Weihua¹

Foundation items: Youth Science Foundation Project of National Natural Science Foundation of China (No. 62306254); SanMing Project of Medicine in Shenzhen (No. SZSM202311012); Guangdong Provincial High-level Clinical Key Specialties (No. SZGSP014); Sustainable Development Project of Shenzhen Science and Technology Innovation Committee (No. KCXFZ20211020163813019)

¹Shenzhen Eye Hospital; Shenzhen Eye Institute, Shenzhen 518040, Guangdong Province, China; ²Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong Province, China; ³Department of Electronic and Computer Engineering, the Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong SAR 999077, China; ⁴College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu Province, China; ⁵School of Biomedical Engineering, Health Science Center, Shenzhen University, Shenzhen 518061, Guangdong Province, China; ⁶School of Future Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China; ⁷Pazhou Lab, Guangzhou 510320, Guangdong Province, China

Correspondence to: Zhang Shaochong. Shenzhen Eye Hospital; Shenzhen Eye Institute, Shenzhen 518040, Guangdong Province, China. zhangshaochong@gzzoc.com; Yang Weihua. Shenzhen Eye Hospital; Shenzhen Eye Institute, Shenzhen 518040, Guangdong Province, China. benben0606@139.com

Received: 2023-11-30 Accepted: 2024-01-18

Abstract

This paper provides a comprehensive analysis of the current state of intelligent ophthalmology in China, including technological advancements, academic exchange platforms, policy support, future challenges, and potential solutions. Technologically, remarkable progress has been made in various areas of intelligent ophthalmology in China, including diabetic retinopathy, fundus image analysis, and crucial aspects such as quality assessment of medical artificial intelligence products, clinical research methods, technological evaluation, and industrial standards. Researchers are constantly improving the safety and standardization of intelligent ophthalmology technology by formulating clinical

application guidelines and standards. Academic exchange platforms have been established to provide extensive collaboration opportunities for professionals across diverse fields, and various academic journals serve as publication platforms for intelligent ophthalmology research. Regarding public policy, the Chinese government has not only established a supportive policy environment for the advancement of intelligent ophthalmology through various documents and regulations, but provided a legal basis and management framework. However, there are still challenges to overcome, such as technological innovation, data privacy and security, outdated regulations, and talent shortages. To tackle these issues, there is a requirement for increased technological research and development, the establishment of regulatory frameworks, talent cultivation, and greater awareness and acceptance of new technologies among patients. By comprehensively addressing these challenges, intelligent ophthalmology in China is expected to continue leading the industry's global development, bringing more innovation and convenience to the field of ophthalmic healthcare.

• **KEYWORDS:** intelligent ophthalmology; image analysis; application standards; academic exchange; policy support

Citation: Gong D, Li WT, Li XM, et al. Opinion on the development and research status of intelligent ophthalmology in China. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2024,24(3):448-452.

0 引言

随着科技的飞速发展和医疗领域的不断创新,智能眼科作为医学领域的新兴力量,正迅速崛起并深刻改变着眼科医疗的面貌。智能眼科这一领域的兴起,既源于中国医学科研的创新活力和智能眼科专家的齐心协力,也受益于庞大的患者基数积累的海量眼科医学数据以及强大的软硬件智能技术支持。

本论文将深入探讨中国智能眼科的发展历程、关键技术创新、临床应用现状、标准与规范的制定、学术交流平台的构建,以及政策与支持的方向。通过对这一新兴领域的综合分析,我们期望能够更全面地理解智能眼科对眼科医疗所带来的深远影响,并为未来该领域的发展提供有益的借鉴和启示。

1 智能眼科的概念及内涵

“智能眼科(intelligent ophthalmology)”是智能技术与眼科领域的深度融合和应用,这一概念最早由湖州师范学院医学人工智能重点实验室杨卫华等人于2017年提出,并在筹备中国医药教育协会智能眼科学组(以下简称:智能眼科学组)期间不断丰富和扩充了其内涵^[1]。“智能眼科”核心理念是将包括人工智能技术在内的一系列智能技术与眼科医学相结合,融合先进的智能技术,推动眼科疾病筛查、诊断、治疗、监测和预测的不断提升,为眼病患者提供更准确、更快速、更全面且个性化的医疗服务。

智能眼科的内涵是通过计算机视觉、大数据分析、机器学习、虚拟现实、可穿戴设备、5G等新一代信息技术,对眼部影像学数据如眼底彩照(color fundus photography, CFP)、光学相干断层扫描(optical coherence tomography,

OCT)、眼前段图像、角膜地形图、视野检查等进行综合分析,同时可以结合其他相关结构化医疗数据,以揭示眼科疾病的发展规律^[2-4]。

总体而言,智能眼科旨在借助先进的智能科技手段,加强对全生命周期眼科健康的各个方面的管理,为患者提供更好的医疗体验和更优越的健康保障。

2 中国智能眼科的诞生与爆发

智能眼科技术来源于医疗机构和智能技术人员的合作,这是由于该技术对优质眼科医疗数据和对提供数据标注的专业眼科专家团队的依赖,以及科学家们致力于改善眼科诊疗状况的决心所决定的。自2017年开始,智能眼科领域的研究爆发开始了,涌现出许多卓越的智能眼科技术成果,至今保持着每年研究数量大幅增多的趋势。2017年,中山大学中山眼科中心(Zhongshan Ophthalmic Center, ZOC)林浩添团队研发了先天性白内障人工智能诊疗决策平台CC-Cruiser,标志着中国智能眼科当前这一阶段爆发的开始。该智能眼科技术可用于先天性白内障的诊断、风险评估和提供治疗建议,并在*Nature Biomedical Engineering*上以“前途远大的机器学习”为题作为封面文章,成为当期的精选新闻^[5]。

2018年,何明光团队运用10万余张眼底图像成功训练出自动筛查威胁视力的糖尿病性视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)的技术,其诊断准确率高达95.5%,相关研究发表于*Diabetes Care*,并受到国际同行的高度认可^[6]。2019年,林浩添团队研发了超广域眼底照相人工智能系统^[7],ZOC张秀兰团队推出了首个青光眼人工智能手机应用IGlaucoma^[8],杨卫华团队研发了针对中心性浆液性脉络膜视网膜病变的智能诊疗技术等^[9-10]。2022年,首都医科大学附属北京同仁医院魏文斌团队开发了可识别多种疾病的视网膜人工智能诊断系统(retinal artificial intelligence diagnosis system, RAIDS)^[11],澳门科技大学张康联合张秀兰共同研发了基于眼底彩照预测青光眼的发病和进展的深度学习系统^[12]。2023年,林浩添团队使用晶状体照片开发LensAge指数作为基于深度学习的生物年龄,用于自我监测与年龄相关的疾病和死亡风险,成果发表于*Nature Communications*^[13]。这些技术在特异度、敏感度、稳定性等多个方面超越了人类专家,为早期大规模筛查致盲眼病和精准诊断疑难眼病提供了可能性。

中国智能眼科技术在医疗机构的临床实践工作中展现了强大的发展势头,这些技术的成功应用使得智能眼科技术逐渐融入眼科临床实践,尤其是为基层眼科和人群筛查提供了新的解决方案。

3 中国智能眼科的技术转化

智能眼科在眼科公共卫生与大众眼健康管理方面展现出巨大的价值和潜力。为了将这些先进技术应用于临床实践,许多研发团队积极主导应用开发和临床测试,并与企业单位展开合作,推动智能眼科领域的产品化转化。与此同时,国家药品监督管理局(以下简称:药监局)高度重视AI医疗器械的科学监管和产业发展,在产品分类、标准制定、产品审评等方面给予了大力支持^[14]。

在大量爆发式增长的眼科人工智能应用当中,DR智能诊断技术首先得到了市场认可^[15]。为了建立AI辅助眼科疾病筛查的统一标准,推动AI诊断系统的临床应用,提升我国基于AI技术的眼科疾病诊疗水平。2019-08,袁进牵头智能眼科学组起草并通过了《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》^[16]。2020-08-10,深圳硅基智能科技有限公司的“糖尿病视网膜病变眼底图像辅助诊断软件”、上海鹰瞳医疗科技有限公司(Airdoc)的“糖尿病视网膜病变眼底图像辅助诊断软件”通过了国家药监局批准,并获得三类证^[17]。2022-08-19,北京康夫子健康技术有限公司“眼底病变眼底图像辅助诊断软件”正式获批全国首张多病种 AI 三类证,也是全国首张青光眼 AI 三类证^[18-19]。2022-09,由百度智慧医疗许言午牵头中华医学会眼科学分会眼底病学组、人工智能研发应用专家指导组,起草并发布了《面向基层的人工智能眼底彩色照相黄斑区域病变体征筛查系统规范化设计及应用指南》^[20]。这些里程碑不仅标志着中国智能眼科技术商业化转化阶段的开启,同时也意味着相关疾病领域的标准数据集和临床试验标准逐渐趋于完善。

同时,眼科专家们也从医疗安全和临床需求的角度对智能眼科技术进行了广泛探索。2019年,林浩添团队率先开设全球首个人工智能眼科门诊,与全国5家不同地区、不同级别医院的眼科门诊合作完成了CC-Cruiser多中心随机对照临床研究,验证了CC-Cruiser在真实世界临床实践中的有效性和可行性,成果发表于*EClinicalMedicine*^[21]。2021年,林浩添团队与Airdoc、广东省医疗器械质量监督检验所等18家机构联合完成了全球首个眼科多病种人工智能真实世界研究,成果发表于国际顶级期刊*The Lancet Digital Health*^[7]。

这些商业化转化标志着中国智能眼科技术在医疗领域取得了显著进展研究,同时也佐证了智能眼科产品的安全性和有效性,为更多智能眼科技术的实际应用和转化提供了成功范例。

4 中国智能眼科临床应用标准的建立

不同于传统的医疗器械,智能眼科领域的商业化转化涉及从“科研成果”到“商业产品”的过程,其中重新建立临床应用标准和完善审批流程至关重要。早在2018年初,中国食品药品检定研究院就启动了医疗人工智能产品的质量评价与研究。通过借鉴国内外智能眼科研发与转化的经验,结合《医疗器械软件注册技术审查指导原则》《移动医疗器械注册技术指导原则》《医疗器械网络安全注册技术审查指导原则》三项原则,中国食品药品检定研究院建成了包含6327例数据的彩色眼底图像标准数据集,这也是中国最早的医学人工智能测评标准数据集。

针对国际上智能眼科临床研究、技术评价和产业规范缺乏标准化的问题,中国医药教育协会眼科影像与智能医疗分会和智能医学专业委员会主导、回顾和总结了国内外智能眼科相关研究,撰写并发布了多项临床标准。2021-09,由张秀兰、许言午、杨卫华共同牵头,联合ZOC、广东省医疗器械质量监督检验所、中国信息通信研究院、南方科技大学、深圳市眼科医院等27家单位,共同参与制定我国首个关于眼底彩照数据质量控制规范团体标准——《眼底彩照标注与质量控制规范(T/CAQI 166-2020)》,并在中华医学会旗下《中华实验眼科杂志》和英文期刊*Intelligent Medicine*发表^[22-23]。此外,还有2022-12出版的第一项整理可公开获得的眼科图像数据库的指南——《全球眼科图像公开数据库使用指南(2022)》^[24],2023-07发表的第一部关于眼科人工智能临床研究评价的指南——《眼科人工智能临床应用伦理专家共识

(2023)》^[25]《眼科人工智能临床研究评价指南(2023)》^[2-3]《人工智能在眼前节疾病诊断中的应用指南(2023)》^[26]《人工智能辅助诊断早产儿视网膜病变应用指南(2023)》^[27]《人工智能在甲状腺相关性眼病中的应用指南(2023)》^[28]等智能眼科系列指南。这些指南为智能眼科的临床研究人员提供了指导和规范,并推动了智能眼科临床研究的评价向着规范化和标准化方向发展。

由此可见,中国智能眼科研究人员不断致力于建立和完善相关的临床应用标准,这些标准和指南的制定为智能眼科领域的临床转化提供了有力的支持,为其安全、高效、规范的应用提供了明确的指导,也为国际合作和技术交流提供了范本。

5 中国智能眼科的学术交流平台

当前,我国已构建了多层次、多领域的智能眼科学术交流平台,为学术界提供了丰富的合作与探讨空间。这些平台不仅加强了国内外专家之间的交流,也促进了科研成果的共享和技术的创新。

2018-08,浙江省数理医学学会、湖州市第一人民医院在浙江省湖州市成功主办了国内首次智能眼科峰会“2018年智能眼科论坛”,正式搭建了国内智能眼科交流的重要平台。该论坛的召开随即引起了业内积极的反响,纷纷敦促智能眼科学组早日成立。2018-10,在中国医药教育协会智能医学专委会的大力支持下,决定由ZOC、湖州师范学院医学人工智能重点实验室牵头组建智能眼科学组,学组集合了国内从事智能眼科研究行业精英并成功召开第一届全国眼科人工智能大会^[29]。这一大型学术会议每年召开一次,是推动智能眼科的前沿知识和技术交流最重要的学术盛会之一。随后,各级智能眼科论坛呈百花齐放、百家争鸣之态。2022-01,苏州大学牵头举办了首届国际眼科人工智能高峰论坛;2023-05,首届中国-新加坡眼科人工智能创新论坛于北京首钢园隆重举办;一些大学、医疗机构和研究机构也定期举办智能眼科的学术研讨会和论坛。这些论坛邀请了来自国内外的多位知名教授、学者,涵盖了眼科与人工智能创新的发展趋势和挑战,为参会者提供了一个深入了解、广泛交流、互相学习、寻求合作的平台。

此外,在论文发表方面,《中华眼科杂志》《中华实验眼科杂志》《中华眼底病杂志》《国际眼科杂志》《医学影像及计算机辅助诊断》、*IEEE Transactions on Medical Imaging*等多个国内外学术期刊和学术会议也为智能眼科研究提供了发表平台,目前已发表了大量智能眼科研究型论著、综述等论文^[30-37]。其中,《国际眼科杂志》设立了专门的“智能眼科”专栏,作为固定栏目长期接受智能眼科相关论文的投稿^[38]。2023-02 SCIE期刊*International Journal of Ophthalmology (IJO)*也正式设立了“Intelligent Ophthalmology”专栏,作为固定栏目长期接受智能眼科相关论文的投稿,为国内外学术界提供了一个更大的展示和交流智能眼科研究成果的平台^[3, 39-41]。

这些学术交流平台的建设不仅促进了学科内的深入合作,也为智能眼科领域的跨学科研究和应用提供了重要支持。通过这些平台,不但内地与港澳台在眼科的临床与科研合作日渐紧密,而越来越多的国际合作也使得各方能够借鉴全球最先进的眼科技术和治疗经验,领域内智能眼科专业人士共同分享知识,探讨未来发展方向,推动了中国智能眼科的不断创新和进步。

6 公共政策与支持

为推动健康中国建设、提高人民健康水平,中共中央、国务院于2016-10-25正式印发并实施了《“健康中国2030”规划纲要》(国发[2016]77号)^[42]。该纲要在优化我国医疗卫生改革顶层设计方面明确提出了战略目标,为数字健康和智能医疗的发展提供了重要推动力。

同时,我国在医学大数据管理、共享和应用方面也采取了积极的公共政策和支持措施,以推动科技创新、促进医学数据共享,并保障相关领域的合法权益。其中包括于2021年实施的《中华人民共和国民法典》(简称《民法典》)以及《中华人民共和国数据安全法》和《中华人民共和国个人信息保护法》等法规,为医学数据共享应用提供了法律依据,规范了数据安全和个体权益保护^[43]。

由此可见,我国通过多层次的法规制度和全方位的政策支持,为医学数据治理和智能眼科的发展奠定了坚实基础,并为其未来提供了积极的发展环境。

7 未来挑战和解决方案

虽然当前智能眼科的快速发展已经取得了显著的成就,但也面临着一系列挑战,需要采取有效的解决方案以推动其可持续发展。

在技术方面,数据隐私和安全性问题凸显为一个主要挑战。随着医学数据的急剧增加,确保患者信息的隐私和数据的安全性成为至关重要的问题。解决这一问题的途径包括建立更为健全的数据加密和安全传输机制,制定明确的数据共享标准,以及进一步强化法规和监管来确保患者隐私得到充分保护。因此,医疗法规的滞后也是一个亟待解决的问题。针对智能眼科的快速发展,医疗法规需要保持与时俱进,建立更为高效的审批流程,同时制定明确的技术标准,以确保新技术的质量和安全性^[25, 44]。

人才短缺也是智能眼科发展过程中的一个潜在问题。由于该领域需要跨学科的专业人才,包括医生、工程师和数据科学家等,因此应当加强相关领域的培训计划,以及鼓励更多的跨学科研究。同时可在大学本科、研究生专业培养方向中设立“智能医学”专业方向,采取“医+工、医+理、医+文结合的跨学科联合培养”模式,以加快智能医疗人才培养。

另外,医患沟通和患者对新技术的接受度也是需要关注的问题,未来应积极倡导患者参与医疗决策,这有助于提高智能眼科技术的实际应用和接受度^[43, 45]。

因此,未来智能眼科的发展需要从多个角度进行努力,包括技术创新、法规制度、人才培养、国际学术交流和患者教育等方面的全面支持。通过积极应对这些挑战,智能眼科技术有望更好地服务于眼科医疗,为患者提供更准确、更快速、更全面且个性化的医疗体验。

8 思考与展望

中国智能眼科的崛起标志着医疗领域的一场变革,其取得的显著进展和国家政策的有力支持使其在全球范围内处于领先地位。然而,随着技术的深入发展,一系列挑战和问题也逐渐浮现,需要全面思考和解决:(1)尽管中国在智能眼科领域的研发方面取得了显著的成果,但仍然存在算法原创性不足的问题。在技术创新的道路上,加强算法的原创性研究,提高技术的核心竞争力是未来发展的重要方向。此外,临床安全、数据质量和算法结果的可解释性等方面的挑战也亟待解决。在将智能眼科技术引入实际应用中,确保其在临床环境中的安全性和稳定性是必

不可少的。(2)智能眼科在实践中遇到的医学伦理和法律问题也不容忽视^[46]。随着技术的不断发展,相关法规和伦理框架需要及时跟进,以确保患者的权益得到充分保护。此外,提高算法结果的可解释性,使医疗从业者和患者能够理解技术的运作机制,有助于消除潜在的疑虑和不信任,提升技术在医学实践中的可接受性。

DR眼底图像辅助诊断软件是眼科领域获得医疗器械三类证的企业数量最多的辅助诊断软件。尽管DR智能筛诊系统已经在基层眼科及人群普筛中展示了潜在的应用前景,但在国内相关临床筛查指南中尚未被充分纳入,加上其他收费政策、患者接受度等客观限制因素,其大规模落地应用仍然举步维艰,表明了智能眼科研究成果向临床商业实践转化的困难。此问题需要深入研究,通过与医学界及卫生管理部门的紧密协作,促进智能眼科技术在卫生医疗领域更为顺畅的实施。

总体而言,尽管中国的智能眼科发展已经取得了显著的进展,但仍需要在科技研发、法规伦理、临床实践等多个方面进行全面而深入的努力。未来,随着智能眼科研究应用的不断完善和社会认知的提升,相信中国的智能眼科将迎来更广阔的发展前景,为眼科医疗领域带来更多创新和便利。

9 局限性

本文仍存在一些局限性:(1)由于受到可获得的文献和资料的限制,可能未能涵盖领域内所有最新的研究和进展;(2)由于研究篇幅有限,对于一些细节和特定方面的讨论可能较为精简;(3)本文缺乏对中国智能眼科领域内不同地区和机构之间差异的深入考察。这些局限性影响了本文对中国智能眼科全貌的完整把握,未来可在这些方面展开更为详尽的探讨。

参考文献

- [1] 全国智能眼科学组筹建通知(初定 08.17-19 湖州)[EB/OL]. (2018-05-09)[2023/12/25]. <https://www.yanke360.com/news/f02ec02e-74df-4542-1caa-a25dee366a0c.shtml>.
- [2] 杨卫华,邵毅,许言午,等.眼科人工智能临床研究评价指南(2023).国际眼科杂志,2023,23(7):1064-1071.
- [3] Yang WH, Shao Y, Xu YW, et al. Guidelines on clinical research evaluation of artificial intelligence in ophthalmology (2023). Int J Ophthalmol, 2023,16(9):1361-1372.
- [4] Peter Wiedemann, 惠延年.眼科学人工智能.国际眼科杂志,2023,23(9):1417-1420.
- [5] Long EP, Lin HT, Liu ZZ, et al. An artificial intelligence platform for the multihospital collaborative management of congenital cataracts. Nat Biomed Eng, 2017,1(2):24.
- [6] Li ZX, Keel S, Liu C, et al. An automated grading system for detection of vision-threatening referable diabetic retinopathy on the basis of color fundus photographs. Diabetes Care, 2018,41(12):2509-2516.
- [7] Lin DR, Xiong JH, Liu CX, et al. Application of Comprehensive Artificial intelligence Retinal Expert (CARE) system: a national real-world evidence study. Lancet Digit Health, 2021,3(8):e486-e495.
- [8] Li F, Song DP, Chen H, et al. Development and clinical deployment of a smartphone-based visual field deep learning system for glaucoma detection. NPJ Digit Med, 2020,3:123.
- [9] Xu JG, Shen JX, Yan ZP, et al. An intelligent location method of key boundary points for assisting the diameter measurement of central serous chorioretinopathy lesion area. Comput Biol Med, 2022, 147:105730.

- [10] Xu JG, Shen JX, Jiang Q, et al. A multi-modal fundus image based auxiliary location method of lesion boundary for guiding the layout of laser spot in central serous chorioretinopathy therapy. *Comput Biol Med*, 2023,155:106648.
- [11] Dong L, He WJ, Zhang RH, et al. Artificial intelligence for screening of multiple retinal and optic nerve diseases. *JAMA Netw Open*, 2022,5(5):e229960.
- [12] Li F, Su YD, Lin FB, et al. A deep-learning system predicts glaucoma incidence and progression using retinal photographs. *J Clin Invest*, 2022,132(11):e157968.
- [13] Li RY, Chen WB, Li MY, et al. LensAge index as a deep learning-based biological age for self-monitoring the risks of age-related diseases and mortality. *Nat Commun*, 2023,14(1):7126.
- [14] 国家药品监督管理局. 关于政协十三届全国委员会第三次会议第4859号(医疗体育530号)提案答复的函[EB/OL]. (2020-10-10) [2023/12/28]. <https://www.nmpa.gov.cn/zwgk/jyta/zhxta/20201010093210128.html>.
- [15] 王若羽, 李王婷, 张少冲, 等. 基于文献计量学和高影响力论文的糖尿病视网膜病变人工智能研究热点和趋势分析. *国际眼科杂志*, 2023,23(11):1803-1810.
- [16] 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.
- [17] 曹晓莉, 陈羽中. 糖尿病视网膜病变眼底图像辅助诊断软件的NMPA注册经验. *眼科学报*, 2021,36(1):111-114.
- [18] 国家药品监督管理局. 2022年08月19日医疗器械批准证明文件(准产)待领取信息发布[EB/OL]. (2022-08-19) [2023/12/28]. <https://www.nmpa.gov.cn/zwfw/sdxx/sdxxylqx/qxpjfb/20220819124259134.html>.
- [19] Li F, Pan JY, Yang DL, et al. A multicenter clinical study of the automated fundus screening algorithm. *Transl Vis Sci Technol*, 2022,11(7):22.
- [20] 中华医学会眼科学分会眼底病学组, 人工智能研发应用专家指导组. 面向基层的人工智能眼底彩色照相黄斑区域病变体征筛查系统规范化设计及应用指南. *中华眼底病杂志*, 2022,38(9):711-728.
- [21] Lin HT, Li RY, Liu ZZ, et al. Diagnostic efficacy and therapeutic decision-making capacity of an artificial intelligence platform for childhood cataracts in eye clinics: a multicentre randomized controlled trial. *EClinicalMedicine*, 2019,9:52-59.
- [22] 许言午, 杨卫华, 张秀兰. 眼底彩照标注与质量控制规范(T/CAQI 166-2020). *中华实验眼科杂志*, 2021,39(9):761-768.
- [23] China Association for Quality Inspection. Annotation and quality control specifications for fundus color photograph. *Intelligent Medicine*, 2021,1(2):80-87.
- [24] 邵毅, 杨卫华, 陈蔚, 等. 全球眼科图像公开数据库使用指南(2022). *眼科新进展*, 2022,42(12):925-932.
- [25] 《眼科人工智能临床应用伦理专家共识》专家组, 中国医药教育协会数字影像与智能医疗分会, 中国医药教育协会智能医学专业委员会. 眼科人工智能临床应用伦理专家共识(2023). *中华实验眼科杂志*, 2023,41(1):1-7.
- [26] 邵毅, 接英, 刘祖国, 等. 人工智能在眼前节疾病诊断中的应用指南(2023). *国际眼科杂志*, 2023,23(9):1421-1430.
- [27] 邵毅, 迟玮, 刘秋平, 等. 人工智能辅助诊断早产儿视网膜病变应用指南(2023). *眼科新进展*, 2023,43(9):673-679.
- [28] 邵毅, 马建民, 谭佳, 等. 人工智能在甲状腺相关性眼病中的应用指南(2023). *眼科新进展*, 2023,43(11):841-847.
- [29] 中山眼科中心组建全国智能眼科学组并召开第一届全国眼科人工智能大会[EB/OL]. (2018-10-18) [2023/12/25]. <https://www.yanke360.com/news/6995ba93-69de-dad3-4394-03c6877921f9.shtml>.
- [30] 王婷, 汪瑞昕, 林浩添. 基于人工智能的白内障新诊疗模式. *中华实验眼科杂志*, 2021,39(9):832-836.
- [31] 张秀兰, 周和政, 李飞, 等. 人工智能能否基于基线数据预测青光眼病情进展. *中华眼科杂志*, 2021,57(3):187-190.
- [32] 马健, 陈淑梅, 王敏, 等. 人工智能结合光相干断层扫描技术辅助识别5种眼底病变系统的应用和价值评估. *中华眼底病杂志*, 2022,38(2):126-131.
- [33] 韩雪, 丁婧娟, 陆淑婷, 等. 人工智能在干眼诊断中的研究进展. *国际眼科杂志*, 2022,22(12):2063-2067.
- [34] Li XM, Jia MY, Islam MT, et al. Self-supervised feature learning via exploiting multi-modal data for retinal disease diagnosis. *IEEE Trans Med Imaging*, 2020,39(12):4023-4033.
- [35] Li XM, Hu XW, Yu LQ, et al. CANet: cross-disease attention network for joint diabetic retinopathy and diabetic macular edema grading. *IEEE Trans Med Imaging*, 2020,39(5):1483-1493.
- [36] Li XM, Yu LQ, Chen H, et al. Transformation-consistent self-ensembling model for semisupervised medical image segmentation. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2021,32(2):523-534.
- [37] Li XM, Hu XW, Qi XJ, et al. Rotation-oriented collaborative self-supervised learning for retinal disease diagnosis. *IEEE Trans Med Imaging*, 2021,40(9):2284-2294.
- [38] 黄光怡, 唐宁宁, 陈琦, 等. 基于迁移学习和数据增强策略构建真菌性角膜炎镰刀菌属鉴定的智能诊断系统. *国际眼科杂志*, 2022,22(5):736-740.
- [39] Wang JP, Yu MT, Xu BL, et al. Analysis of retinal arteriolar and venular parameters in primary open angle glaucoma. *Int J Ophthalmol*, 2023,16(5):671-679.
- [40] Zhu SJ, Zhan HD, Wu MN, et al. Research on classification method of high myopic maculopathy based on retinal fundus images and optimized ALFA-Mix active learning algorithm. *Int J Ophthalmol*, 2023,16(7):995-1004.
- [41] Zhou ZL, Yan YF, Chen JM, et al. Predicting visual acuity with machine learning in treated ocular trauma patients. *Int J Ophthalmol*, 2023,16(7):1005-1014.
- [42] 中共中央国务院印发《“健康中国2030”规划纲要》[EB/OL]. (2016-10-25) [2023/11/29]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5133024.htm.
- [43] 王哲, 李琳, 唐圣晟, 等. 数字健康及其面临的机遇与挑战. *数字医学与健康*, 2023,1(1):38-43.
- [44] 关键. 医学数据发挥创新和服务要素作用的实践与治理特殊性. *数字医学与健康*, 2023,1:1-6.
- [45] 王妍茜, 王成虎, 张竞月, 等. 人工智能应用于眼科的积极作用及其伦理问题. *国际眼科杂志*, 2022,22(6):1020-1024.
- [46] Zheng B, Wu MN, Zhu SJ, et al. Attitudes of medical workers in China toward artificial intelligence in ophthalmology: a comparative survey. *BMC Health Serv Res*, 2021,21(1):1067.