

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2020.10.015

人工智能应用于青光眼临床筛查及卫生效益分析*

张悦¹ 初春燕² 余双² 马锐² 杜一帆¹ 庞睿奇¹ 王宁利¹ 刘含若^{1Δ}

(1 首都医科大学附属北京同仁医院 北京同仁眼科中心\北京市眼科研究所\眼科学与视觉科学北京市重点实验室 北京 100005;

2 腾讯医疗健康有限公司 广东 深圳 518000)

摘要 目的: 探讨应用人工智能系统对青光眼患者的检出率、筛查的时间成本和经济成本,总结分析其应用于青光眼筛查的优越性与可行性。**方法:** 回顾性研究。收集 2019-2020 年使用腾讯觅影眼底照片辅助诊断系统进行青光眼筛查的 53700 例受检者, 2012-2018 年使用北京同仁医院眼科研究所远程眼科会诊中心的 493221 例患者, 邯郸眼病研究中接受基础眼病筛查的 6716 名受检者资料。评价人工智能筛查系统对青光眼的检出率,并采用 Pearson χ^2 检验,比较人工智能筛查系统与远程阅片平台、基础眼病筛查对于青光眼检出率的差异,并对三种筛查方式的时间成本和经济成本进行比较分析。**结果:** 临床应用表明,其成本效益的可靠数据及主要指标:检出率、 χ^2 值、时间成本、经济成本等效益显著。人工智能筛查系统对青光眼的检出率为 6.56%,远程眼科会诊平台的检出率为 2.78%,邯郸眼病研究的检出率为 1.70%,人工智能筛查系统与另外两种模式对青光眼诊断检出率的差异有统计学意义($P<0.05$)。而且使用人工智能筛查系统的患者其医疗时间成本和经济成本花费较低。**结论:** 可行性分析表明,相较于远程眼科会诊平台和基础眼病筛查,人工智能筛查系统对青光眼的检出率较高,同时患者的时间成本和经济成本都得到了大幅度降低,这为青光眼筛查提供了一种有效而快捷的方式,值得临床推广。

关键词: 人工智能;青光眼;时间成本;经济成本

中图分类号: R775.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6273(2020)11-1868-05

Application and Benefit Analysis of Artificial Intelligence in Clinical Screening of Glaucoma*

ZHANG Yue¹, CHU Chun-yan², YU Shuang², MA Rui², DU Yi-fan¹, PANG Rui-qi¹, WANG Ning-li¹, LIU Han-ruo^{1Δ}

(1 Beijing Tongren Eye Center/ Beijing Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Sciences/ Beijing Institute of Ophthalmology/ Beijing Tongren Hospital, Capital Medical University, Beijing, 100730, China; 2 Tencent Medical Health Co., Ltd, Shenzhen, 518000, China)

ABSTRACT Objective: To explore the detection rate, time cost and economic cost of the application of artificial intelligence system in glaucoma screening, and to summarize and analyze the advantages and feasibility of its application in glaucoma screening. **Methods:** Retrospective study. 53700 patients using Tencent Miying fundus photography diagnosis assistant system during 2019 to 2020, 493221 patients from the Center of Teleophthalmology Consultation in Beijing Tongren Eye Center from 2012 to 2018, and 6716 patients collected in Handan Eye Study were included. The detection rate of glaucoma by artificial intelligence screening system was evaluated, and compared to that of the Center of Teleophthalmology Consultation and Handan Eye Study. The difference in detection rates was analyzed by Pearson χ^2 test. The time and economic cost of these three screening methods was also compared and analyzed. **Results:** The clinical application showed that the reliable data and main indexes of cost-benefit are improved significantly, including detection rate, χ^2 value, time cost and economic cost. The detection rate of the artificial intelligence screening system for glaucoma was 6.56%, and was 2.78% and 1.70% for the Center of Teleophthalmology Consultation and Handan Eye Study, respectively. The difference between the artificial intelligence screening system and the other two modes was statistically significant ($P<0.05$). In addition, patients using artificial intelligence screening system spend less time and economic cost. **Conclusions:** The feasibility analysis showed that compared with the teleophthalmology consultation platform and basic ophthalmic screening, the detection rate of the artificial intelligence screening system for glaucoma is higher, and the time and economic cost of patients have been reduced, which provided an effective and quick way for glaucoma screening.

Key words: Artificial intelligence; Glaucoma; Time cost; Economic cost

Chinese Library Classification(CLC): R775.1 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2020)11-1868-05

* 基金项目:国家自然科学基金项目(81700813);北京市医院管理局"青苗"计划专项经费(QML20180205);

北京市优秀人才培养资助项目;北京市科技新星项目(Z191100001119072);首都医科大学附属北京同仁医院拔尖人才培养计划,医药协同科研创新研究专项(Z181100001918035);广东省重点领域研发计划项目(2018B010111001);

深圳市科技计划项目(ZDSYS201802021814180)

作者简介:张悦(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:眼科学,E-mail: 1410122920@pku.edu.cn

Δ 通讯作者:刘含若(1985-),女,助理研究员,主要研究方向:眼科学,E-mail: hanruo.liu@hotmail.co.uk,电话:18600659099

(收稿日期:2020-03-23 接受日期:2020-04-18)

前言

青光眼是全球排名首位的不可逆致盲性眼病^[1,2]。据统计,全世界约有超过 6000 万青光眼患者,2020 年将达到 7960 万,其中 1120 万人最终可能发展为双眼盲^[3,4]。而我国 40 岁以上人群的青光眼患病率为 2.6%,致盲率为 30%^[5],若对所有患者进行治疗,预计直接花费可达 150-180 亿美元,造成的间接经济损失更难以估量^[6]。由于青光眼发病隐匿,绝大多数患者到发现视功能障碍甚至视力丧失而就医时,已丧失了最佳治疗机会^[7]。此外大多数患者对青光眼的认知不足,在发达国家有大约 70% 的患者对自己的病情不了解,在发展中国家这个比例会更高^[8-11]。因此,早发现、早干预、终生随诊治疗是避免青光眼视功能损害或致盲的根本途径,有必要建立青光眼的筛查机制。人工智能(Artificial Intelligence, AI)的快速发展在眼科疾病的辅助诊断中均显示出了极大的潜力,具有准确性高、筛查效率高等优点,但目前在全国范围内有关人工智能系统应用的成本效益的可靠数据较少。本研究分析了应用人工智能系统对青光眼患者的检出率、筛查的时间成本和经济成本,总结分析其应用于青光眼筛查的优越性与可行性。

1 材料与方法

1.1 一般材料

北京同仁眼科中心、北京市眼科研究所与腾讯医疗健康

(深圳)有限公司共同搭建腾讯觅影眼底照片辅助诊断系统,收集了 2019 年至 2020 年共计 53700 例受检者的资料。通过该系统,受检者在上传基本信息和拍摄眼底图像后,可以实时得到系统出具的报告,报告内容包括诊断结果及初步转诊建议。

北京同仁医院远程眼科会诊平台选取了 2012 年至 2018 年来自全国 188 家基地医院的 493221 例患者的资料,基地医院上传患者的基本信息及眼底图像,由阅片中心医师给出诊断及诊疗建议再回传至基地医院。

基础眼病筛查资料选取了邯郸眼病研究共计 6716 名受检者的资料,包括基本信息、视力、眼压、裂隙灯显微镜检查及眼底图像等,经过筛查被确定为可疑青光眼后再进行专科检查以明确诊断。

1.2 系统操作流程

腾讯觅影眼底照片辅助诊断系统由医生客户端和 AI 引擎服务器组成。由基层机构拍摄眼底照片并上传至 AI 引擎服务器,经过深度学习算法计算的结果回传至医生客户端,具体包括图像质量判断和可疑青光样性视神经损害的风险值。用户可以在客户端查看受检者的眼底照片和初步的 AI 分析报告。经 AI 分析所得的可疑病例会转由专业的眼科医生进行复核,确认是否需要转诊至专科进行详细检查并通知受检者,该系统的应用场景包括但不限于医院、基层诊所、社区,具体操作流程可见图 1。

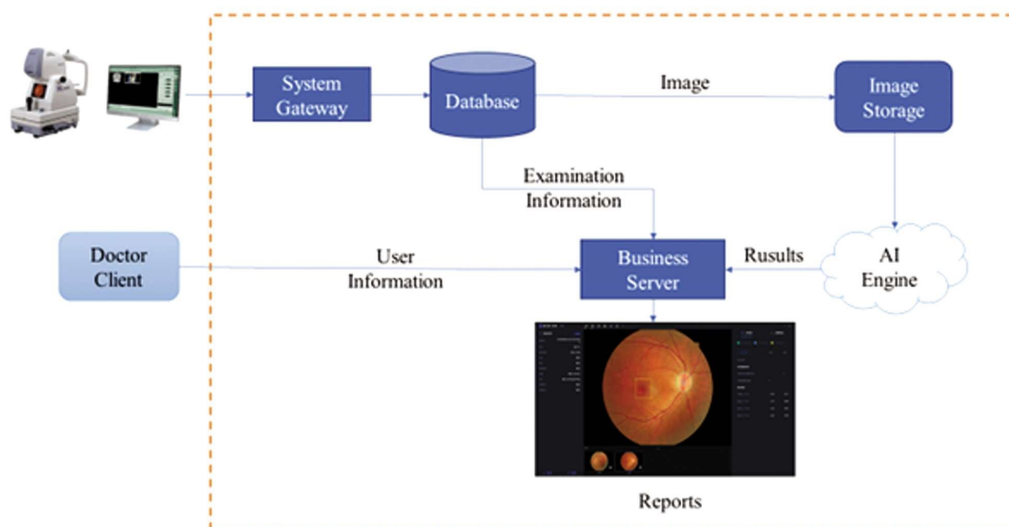


图 1 腾讯觅影眼底照片辅助诊断系统操作流程

Fig.1 Operation process of Tencent Miying fundus photography diagnosis assistant system

1.3 诊断标准

远程眼底阅片平台根据标准分别给出青光眼、可疑青光眼及无青光眼性视神经损害的诊断,而基础眼病筛查和人工智能筛查系统只给出可疑青光眼性视神经损害的诊断,并将这部分患者转由专业的眼科医生进行复核,通过这种流程可以有效降低筛查的漏诊率和误诊率,并减少人力资源的浪费。

1.4 统计学分析及检出率比较

采用 SPSS21.0 统计学软件进行统计学分析。描述性统计用于人口学特征描述,以平均值 $\pm$ 标准差表示。采用 Pearson χ^2 检验,两两比较人工智能筛查系统与远程阅片平台、基础眼病

筛查的青光眼检出率差异。 $P < 0.05$ 被认为具有统计学意义。

1.5 时间成本计算

每例患者进行一次完整的青光眼筛查所花费的时间成本包括候诊时间/等待反馈时间、医事服务时间、进行眼科检查时间、到达就医地点往返路途所需时间这几部分。

对于人工智能筛查系统,本研究所采用的人工智能筛查系统可以在完成检查后 10 秒给出反馈结果,以 4 小时工作时间内完成的筛查例数的人均时间作为眼科检查时间。

对于远程会诊平台,通过计算基层医院上传图像资料后远程阅片医师给出阅片报告的平均时间作为等待反馈时间,在

基层医院花费的医事服务时间和拍摄眼底照相的时间以 4 小时工作时间医生接诊患者和拍摄眼底照片例数的人均时间为准。

对于到北京同仁医院就诊的患者,以 4 小时工作时间内所有患者的人均候诊时间作为候诊时间,以 4 小时工作时间医生接诊患者例数的人均时间作为医事服务时间,以在北京同仁医院完成青光眼筛查的常规检查所需的平均时间作为眼科检查时间,往返路途时间以搭乘高铁从河北往返北京所需时间为例。

1.6 经济成本计算

每例患者进行一次完整的青光眼筛查所花费的经济成本包括医事服务费、眼科检查的费用、到达就医地点所需的食宿和差旅费这几部分。

对于人工智能筛查系统目前还没有确定的收费标准,本研究根据每台人工智能筛查系统的前期研发及维护费用(80 万元左右)与普通眼底照相机的成本费用(40 万元,以日本 Topcon 全自动免散瞳眼底相机 TRC-NW400 为例)做比,估算出患者缴纳的单次检查费用约为普通眼底照相检查的两倍。

对于远程会诊平台,患者需要缴纳的医事服务费包括在当地医院就诊的挂号费(10 元)及远程阅片平台的会诊费(100 元),检查费用为在当地医院进行眼底照相检查费用(40 元)。

对于到北京同仁医院(或其他大型公立三甲医院)就诊的

患者,患者需要缴纳 50 元的医事服务费,以及所需检查的费用包括:眼压(10 元)、眼底照相检查(40 元)、前节相干光断层扫描或超声生物显微镜检查(200 元)、后节相干光断层扫描检查(200 元)、视野检查(200 元)。患者所需的食宿和差旅费以搭乘高铁从河北往返北京为例。

2 结果

2.1 一般特征及检出率

腾讯觅影眼底照片青光眼筛查系统自 2019 年至 2020 年共收集了 53700 例患者,其中男性 31695 例,女性 22005 例,年龄分布为 5 至 90 岁,平均年龄 42.6 ± 17.32 岁。其中,诊断为青光眼及可疑性青光眼的患者 3523 例,占有病例的 6.56%。远程眼科会诊平台对于青光眼及可疑青光眼的检出率为 2.78%,邯郸眼病研究对可疑青光眼的检出率为 1.70%。三种筛查结果的一般特征及检出率比较见表 1。

应用 Pearson χ^2 检验,两两比较人工智能筛查系统与远程会诊平台和邯郸眼病研究对青光眼及可疑青光眼的检出率。其中,远程会诊平台和邯郸眼病研究对青光眼诊断的检出率差异无统计学意义($P > 0.05$),而人工智能筛查系统与另外两种模式对青光眼诊断检出率的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

表 1 三种筛查结果的一般特征及检出率比较

Table 1 Comparison of general characteristics and detection rate of three screening methods

Screening methods	Number	Gender (male/female)	Age, years	No. of glaucomatous optic nerve damage (%)	No. of suspected glaucomatous optic nerve damage (%)	No. of non-glaucomatous optic nerve damage (%)
Artificial intelligence system	53700	31695/22005	42.6± 17.32	11538(2.34)	3523(6.56)	6.56
Teleophthalmology consultation platform	493221	237846/255475	59.4± 9.0		2174(0.44)	2.78
Handan Eye Study	6716	3149/3567	50.6± 11.8		115(1.70)	1.70

2.2 时间成本比较

患者通过人工智能筛查系统得到反馈所需时间,与外地患者在当地医院就诊并通过远程会诊平台进行会诊的所需时间、

外地患者到首都医科大学附属北京同仁医院就诊的平均时间成本比较见表 2。

表 2 人工智能筛查系统与远程眼科会诊平台、门诊就诊对青光眼检查的时间成本比较

Table 2 Comparison of time cost of AI screening system, teleophthalmology consultation platform and outpatient consultation

Screening methods	Total time per patient	Consultation time			Time required for round trips (Take Hebei Province for example)
		Waiting time (for feedback)	Medical service time	Medical service time	
Artificial intelligence system	5 min 10 s	55 min	10 s	5 min	
Teleophthalmology consultation platform ^[14]	1.25 h		15 min	5 min	
Outpatient of Beijing Tongren Hospital	12.45 h	2 h	15 min	30 min	10 h

2.3 经济成本比较

患者通过人工智能筛查系统完成检查的费用成本,与外地患者在当地医院就诊并通过远程会诊平台进行会诊的费用成本、外地患者到首都医科大学附属北京同仁医院就诊的平均费用支出比较详见表 3。

3 讨论

3.1 进行青光眼筛查的必要性

目前已有研究证明,在早期阶段进行青光眼筛查可以提高青光眼的检出率,并在更早期给予干预与随诊^[15]。筛查的经济

学效益取决于很多因素,包括青光眼的患病率和类型、所选用筛查方式的准确性和成本、进行筛查所需的人力、每工时的成本、随访和治疗的成本、医疗服务的可及性等^[16]。根据 2007 年至 2014 年发表的健康经济研究发达国家普遍认为青光眼筛查的经济学效益并不高^[17-19]。然而,在中国和印度的研究发现,在亚洲国家进行青光眼筛查具有较高的经济学效益^[20]。特别的,中国的研究结果显示实施闭角和开角型青光眼联合筛查的成本低于人均国内生产总值的 3 倍,符合世界卫生组织所推荐的

进行卫生干预措施的标准,这提示在中国实施以人群为基础的闭角型青光眼和开角型青光眼联合筛查具备较好的成本效益比^[21]。这可能与亚洲人群患闭角型青光眼的比例更大、亚洲国家筛查人力成本更低、发展中国家对青光眼的早期诊断能力较低等因素有关^[22-24]。然而,在全人口规模实施青光眼筛查仍然是一个巨大挑战。研究表明,眼底照相是判断是否存在视神经损害最为快捷、简便且可以客观评估视盘表面结构和视网膜神经纤维层的检查方法^[25,26]。

表 3 人工智能筛查系统与远程眼科会诊平台、门诊就诊对青光眼检查的经济成本比较(人民币:元)

Table 3 Comparison of economic cost of AI screening system, teleophthalmology consultation platform and outpatient consultation (Yuan)

Screening methods	Total cost per patient	Consultation cost		Cost required for round trips (Take Hebei Province for example)
		Medical service cost	Examination cost	
Artificial intelligence system	80		80	
Teleophthalmology consultation platform	150	110	40	
Outpatient of Beijing Tongren Hospital	1000	50	650	300

3.2 远程医疗在青光眼筛查中的应用

随着移动网络的发展,远程医疗是一种将医疗保健扩展到偏远或资源受限地区的有效方法,同时也可以降低患者和医疗资源提供方的成本^[27]。首都医科大学附属北京同仁医院眼科中心、北京市眼科研究所通过成立远程眼科会诊中心与基层医院建立了协同医疗模式,通过比较发现,远程阅片平台对青光眼诊断的检出率与基础眼病筛查模式相比没有统计学差异,并大大减少了就诊的时间成本和经济成本。此外,远程医疗在糖尿病性视网膜病变筛查的应用也已经被证明是准确而经济有效的,并已大规模应用于许多筛查项目中^[28,29]。

3.3 人工智能在青光眼筛查领域的应用

近年来,人工智能在糖尿病性视网膜病变、青光眼、年龄相关性黄斑变性、白内障、角膜病等多种眼科疾病的辅助诊断中均显示出了极大的潜力^[30-33]。例如,2016 年谷歌创建了一种通过眼底图像自动检测糖尿病视网膜病变和黄斑水肿的深度学习算法,其诊断准确率甚至超过眼科医生^[34]。在青光眼领域,多种深度学习技术在识别青光眼性视神经损害的灵敏性、特异性、曲线下面积均超过了 0.9^[30,35-37]。本研究采用的人工智能青光眼筛查系统,经过专业医生对其中 20753 张眼底照相的检查结果的审阅,一致率达到 98.4 %。

3.4 三种筛查方式对青光眼的检出率及成本比较

在本研究中,通过比较发现,相较于远程会诊平台和基础眼病筛查,人工智能筛查系统与对青光眼及可疑青光眼的检出率更高,且这种差异具有统计学意义。在此前的研究中也发现了单纯通过单张眼底照相判断青光眼的诊断,与综合评估后诊断相比存在着较高的假阳性率,但这也反映了其应用于青光眼筛查的优势所在,作为面向所有人群的机会型筛查,较高的灵敏度对于识别出症状隐匿的患者来说更有意义,对于这部分人群我们建议到专业医院进行进一步评估。此外,通过对患者进行青光眼检查的时间和经济成本评估,不难发现患者选择就近

的人工智能筛查系统进行检查,可以大大缩短就诊时间,并减少患者到医院就诊的费用,从而有利于促进人群主动进行青光眼筛查,提高早期检出率。

然而,本研究也存在着较多局限性,首先,本研究只进行了针对患者角度的时间成本和经济成本分析,没有进行全面的经济学效益分析,所得结论较为不够全面。其次,本研究未考虑患者在接受检查过程中对该系统的接受度和信任度,这对其后期的转诊和复诊依从性有着重要影响。最后,该系统存在较高假阳性率,需要进一步提升系统性能,在保证灵敏度的前提下尽可能降低假阳性率,减少患者不必要的进一步就诊。

综上所述,通过在初步实践中的分析,人工智能筛查系统可以为青光眼筛查和诊断提供一种有效而快捷的方式,相较于远程眼科会诊平台和基础眼病筛查,对青光眼的检出率较高,同时患者的医疗时间成本和经济成本都得到了大幅度降低。若要进一步分析人工智能应用于青光眼筛查的经济学效应,还需从宏观角度综合前期开发投入、人力成本、筛查结果对减轻疾病负担的经济和社会效益等多方面因素,对其落地推广的可行性进行综合评估。

参考文献(References)

- [1] Pascolini D, Mariotti SP. Global estimates of visual impairment: 2010 [J]. Br J Ophthalmol, 2012, 96(5): 614-618
- [2] Flaxman SR, Bourne RRA, Resnikoff S, et al. Global causes of blindness and distance vision impairment 1990-2020: a systematic review and meta-analysis[J]. Lancet Glob Health, 2017, 5(12): e1221-e1234
- [3] Weinreb RN, Aung T, Medeiros FA. The pathophysiology and treatment of glaucoma: a review[J]. JAMA, 2014, 311(18): 1901-1911
- [4] Quigley HA, Broman AT. The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020 [J]. Br J Ophthalmol, 2006, 90 (3): 262-267
- [5] Rein DB, Zhang P, Wirth KE, et al. The economic burden of major adult visual disorders in the United States[J]. Arch Ophthalmol, 2006,

- 124(12): 1754-1760
- [6] Liang YB, Friedman DS, Zhou Q, et al. Prevalence of primary open angle glaucoma in a rural adult Chinese population: the Handan eye study[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2011, 52(11): 8250-8257
- [7] Heijl A, Bengtsson B, Oskarsdottir SE. Prevalence and severity of undetected manifest glaucoma: results from the early manifest glaucoma trial screening[J]. *Ophthalmology*, 2013, 120(8): 1541-1545
- [8] Shaikh Y, Yu F, Coleman AL. Burden of undetected and untreated glaucoma in the United States [J]. *Am J Ophthalmol*, 2014, 158(6): 1121-1129, e1121
- [9] Chua J, Baskaran M, Ong PG, et al. Prevalence, Risk Factors, and Visual Features of Undiagnosed Glaucoma: The Singapore Epidemiology of Eye Diseases Study[J]. *JAMA Ophthalmol*, 2015, 133(8): 938-946
- [10] Budenz DL, Barton K, Whiteside-de Vos J, et al. Prevalence of glaucoma in an urban West African population: the Tema Eye Survey[J]. *JAMA Ophthalmol*, 2013, 131(5): 651-658
- [11] Ramakrishnan R, Nirmalan PK, Krishnadas R, et al. Glaucoma in a rural population of southern India: the Aravind comprehensive eye survey[J]. *Ophthalmology*, 2003, 110(8): 1484-1490
- [12] 张莉, 徐捷, 曹凯, 等. 远程眼科会诊对青光眼检出效果影响的研究[J]. *中华眼科医学杂志(电子版)*, 2019, 9(4): 206-211
- [13] Liang Y, Friedman DS, Zhou Q, et al. Prevalence and characteristics of primary angle-closure diseases in a rural adult Chinese population: the Handan Eye Study [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2011, 52(12): 8672-8679
- [14] 李建军, 徐亮, 路从磊, 等. 远程眼科阅片及时性及阅片报告详细性的初步研究[J]. *眼科*, 2016, 25(1): 13-17
- [15] Liang Y, Jiang J, Ou W, et al. Effect of Community Screening on the Demographic Makeup and Clinical Severity of Glaucoma Patients Receiving Care in Urban China[J]. *Am J Ophthalmol*, 2018, 195: 1-7
- [16] 李建军. 在人群中筛查青光眼的意义及实施方案 [J]. *眼科*, 2014, 23(1): 71-73
- [17] Rein DB, Wittenborn JS, Lee PP, et al. The cost-effectiveness of routine office-based identification and subsequent medical treatment of primary open-angle glaucoma in the United States[J]. *Ophthalmology*, 2009, 116(5): 823-832
- [18] Burr J, Hernandez R, Ramsay C, et al. Is it worthwhile to conduct a randomized controlled trial of glaucoma screening in the United Kingdom?[J]. *J Health Serv Res Policy*, 2014, 19(1): 42-51
- [19] Khawaja AP, Sherratt MA, Royal College of Ophthalmologists Glaucoma Commissioning Guidance Development G. The Royal College of Ophthalmologists' Glaucoma Commissioning Guidance: executive summary[J]. *Eye (Lond)*, 2017, 31(5): 818-822
- [20] Muecke J, Sia DI, Newland H, et al. Perspective on ophthalmic support in countries of the developing world [J]. *Clin Exp Ophthalmol*, 2013, 41(3): 263-271
- [21] 李建军, 徐亮, 王爽, 等. 北京市社区青光眼筛查模式初步研究[J]. *眼科*, 2009, 18(1): 24-28
- [22] John D, Parikh R. Cost-effectiveness of community screening for glaucoma in rural India: a decision analytical model[J]. *Public Health*, 2018, 155: 142-151
- [23] Tang J, Liang Y, O'Neill C, et al. Cost-effectiveness and cost-utility of population-based glaucoma screening in China: a decision-analytic Markov model[J]. *Lancet Glob Health*, 2019, 7(7): e968-e978
- [24] Varma R, Lee PP, Goldberg I, et al. An assessment of the health and economic burdens of glaucoma [J]. *Am J Ophthalmol*, 2011, 152(4): 515-522
- [25] Zeyen T, Miglior S, Pfeiffer N, et al. Reproducibility of evaluation of optic disc change for glaucoma with stereo optic disc photographs[J]. *Ophthalmology*, 2003, 110(2): 340-344
- [26] Parrish RK, Schiffman JC, Feuer WJ, et al. Test-retest reproducibility of optic disk deterioration detected from stereophotographs by masked graders[J]. *Am J Ophthalmol*, 2005, 140(4): 762-764
- [27] Thomas SM, Jeyaraman MM, Hodge WG, et al. The effectiveness of teleglaucoma versus in-patient examination for glaucoma screening: a systematic review and meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2014, 9(12): e113779
- [28] Owsley C, McGwin G, Jr., Lee DJ, et al. Diabetes eye screening in urban settings serving minority populations: detection of diabetic retinopathy and other ocular findings using telemedicine [J]. *JAMA Ophthalmol*, 2015, 133(2): 174-181
- [29] Kroenke K. Telemedicine screening for eye disease[J]. *JAMA*, 2015, 313(16): 1666-1667
- [30] Li Z, He Y, Keel S, et al. Color Fundus Photographs[J]. *Ophthalmology*, 2018, 125(8): 1199-1206
- [31] Burlina PM, Joshi N, Pekala M, et al. Automated Grading of Age-Related Macular Degeneration From Color Fundus Images Using Deep Convolutional Neural Networks [J]. *JAMA Ophthalmol*, 2017, 135(11): 1170-1176
- [32] Raumviboonsuk P, Krause J, Chotcomwongse P, et al. Deep learning versus human graders for classifying diabetic retinopathy severity in a nationwide screening program[J]. *NPJ Digit Med*, 2019, 2: 25
- [33] Ting DSW, Peng L, Varadarajan AV, et al. Deep learning in ophthalmology: The technical and clinical considerations [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2019, 72: 100759
- [34] 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[J]. *JAMA*, 2016, 316(22): 2402-2410
- [35] Almazroa A, Burman R, Raahemifar K, et al. Optic Disc and Optic Cup Segmentation Methodologies for Glaucoma Image Detection: A Survey[J]. *J Ophthalmol*, 2015, 2015: 180972
- [36] Chakrabarty L, Joshi GD, Chakravarty A, et al. Automated Detection of Glaucoma From Topographic Features of the Optic Nerve Head in Color Fundus Photographs[J]. *J Glaucoma*, 2016, 25(7): 590-597
- [37] Liu H, Li L, Wormstone IM, et al. Development and Validation of a Deep Learning System to Detect Glaucomatous Optic Neuropathy Using Fundus Photographs[J]. *JAMA Ophthalmol*, 2019
- [38] Bellema V, Lim G, Rim TH, et al. Artificial Intelligence Screening for Diabetic Retinopathy: the Real-World Emerging Application[J]. *Curr Diab Rep*, 2019, 19(9): 72