

面向人工智能应用的青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制指南

杨卫华¹, 许言午^{2,3}, 《面向人工智能应用的青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制指南》专家组, 中国医药教育协会眼科影像与智能医疗分会

引用: 杨卫华, 许言午, 《面向人工智能应用的青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制指南》专家组, 等. 面向人工智能应用的青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制指南. 国际眼科杂志, 2025, 25(4): 511-522.

基金项目: 深圳市医疗卫生三名工程项目 (No.SZSM202311012)

作者单位: ¹(518040) 中国广东省深圳市眼科医院 南方医科大学深圳眼科医学中心; ²(510641) 中国广东省广州市, 华南理工大学未来技术学院; ³(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

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, 深圳市眼病防治研究所常务副所长, 中国医药教育协会眼科影像与智能医疗分会副主任委员兼秘书长, 中国医药教育协会智能眼科分会副主任委员, 中国质量检验协会眼镜质量检验与视光学专委会副理事长。主编专著《智能医学工程丛书》《眼底病人工智能研究》《智能眼科概论》《眼科人工智能》等, 发表 SCI 论文 100 余篇, 80 余本 SCI 期刊的客座编辑或审稿专家。获得眼科发明专利授权 18 项。起草团体标准 4 份, 执笔智能眼科、眼科影像等领域临床指南 (专家共识) 20 余份。研究方向: 智能眼科、眼科影像。



许言午 博士, 华南理工大学长聘教授, 前百度智慧医疗科学家, 人工智能与数字经济广东省实验室 (广州) 研究员, WHO 数字健康咨询委员会专家, 新加坡眼科研究所客座教授, IEEE 高级会员, 中国医药教育协会眼科影像与智能医疗分会副主任委员, 中国计算机学会 (CCF) 数字医学分会常委, 中国医药教育协会智能眼科分会常委。累计发表了 200 余篇国际期刊及会议论文 (含 30 多篇十分以上顶刊论文和 3 篇高被引论文), 谷歌引用 11 000 余次, H 指数 48, 已主持 3 500 万纵向经费与 4 800 万横向经费项目。从 0 到 1 负责获批全国首张多病种 AI 三类证, 并先后获聘公安部引智计划特聘专家、浙江省特聘专家、北京市特聘专家, 连续 3 年入选斯坦福大学发布的“全球前 2% 顶尖科学家”榜单。



通讯作者: 杨卫华. benben0606@139.com; 许言午. ywxu@ieee.org

收稿日期: 2024-12-02

修回日期: 2025-02-24

摘要

青光眼是以病理性眼压升高、视神经萎缩和视野缺损为共同特征的眼病, 可能导致不可逆的视力丧失。近年来, 人工智能 (AI) 技术的迅速发展为青光眼的早期诊断和管理提供了新的手段。通过对青光眼相关影像进行分类和标注, AI 模型能够学习并识别青光眼特有的病理特征, 从而实现影像的自动化分析与诊断。青光眼影像分类和标注的研究主要涉及彩色眼底照相 (CFP)、光学相干断层扫描 (OCT)、眼前节光学相干断层扫描 (AS-OCT) 以及超声生物显微镜 (UBM) 等。彩色眼底照相主要用于视杯与视盘的标注, OCT 用于视神经纤维层的厚度测量与标注, AS-OCT 和 UBM 则聚焦于前房角结构的标注与眼前节结构参数的测量。为了规范青光眼影像分类和标注, 提升标注数据的质量和一致性, 推动智能眼科的临床应用, 特制定本指南。本指南系统阐述了青光眼影像分类和标注的原则、方法、流程及质量控制要求, 为青光眼影像的分类和标注提供标准化指导。

关键词: 青光眼; 人工智能; 分类; 标注; 流程; 质量控制; 指南

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2025.4.01

Guidelines for glaucoma imaging classification, annotation, and quality control for artificial intelligence applications

Yang Weihua¹, Xu Yanwu^{2,3}, Expert Workgroup of Guidelines for Glaucoma Imaging Classification, Annotation, and Quality Control for Artificial Intelligence Applications, Ophthalmic Imaging and Intelligent Medicine Branch of Chinese Medicine Education Association

Foundation item: San Ming Project of Medicine in Shenzhen (No. SZSM202311012)

¹Shenzhen Eye Hospital; Shenzhen Eye Medical Center, Southern Medical University, Shenzhen 518040, Guangdong Province, China; ²School of Future Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China; ³Pazhou Lab, Guangzhou 510320, Guangdong Province, China

Correspondence to: Yang Weihua. Shenzhen Eye Hospital; Shenzhen Eye Medical Center, Southern Medical University, Shenzhen 518040, Guangdong Province, China. benben0606@139.com; Xu Yanwu. School of Future Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China; Pazhou Lab, Guangzhou 510320, Guangdong Province, China. ywxu@ieee.org

Received: 2024-12-02

Accepted: 2025-02-24

Abstract

• Glaucoma is an eye disease characterized by pathologically elevated intraocular pressure, optic nerve atrophy, and visual field defects, which can lead to irreversible vision loss. In recent years, the rapid development of artificial intelligence (AI) technology has provided new approaches for the early diagnosis and management of glaucoma. By classifying and annotating glaucoma-related images, AI models can learn and recognize the specific pathological features of glaucoma, thereby achieving automated image analysis and classification. Research on glaucoma imaging classification and annotation mainly involves color fundus photography (CFP), optical coherence tomography (OCT), anterior segment optical coherence tomography (AS-OCT), and ultrasound biomicroscopy (UBM) images. Color fundus photography is primarily used for the annotation of the optic cup and disc, OCT is used for measuring and annotating of the thickness of the retinal nerve fiber layer, and AS-OCT and UBM focus on the annotation of the anterior chamber angle structure and the measurement of anterior segment structural parameters. To standardize the classification and annotation of glaucoma images, enhance the quality and consistency of annotated data, and promote the clinical application of intelligent ophthalmology, this guideline has been developed. This guideline systematically elaborates on the principles, methods, processes, and quality control requirements for the classification and annotation of glaucoma images, providing standardized guidance for the classification and annotation of glaucoma images.

• **KEYWORDS:** glaucoma; artificial intelligence; classification; annotation; processes; quality control; guideline

Citation: Yang WH, Xu YW, Expert Workgroup of Guidelines for Glaucoma Imaging Classification, Annotation, and Quality Control for Artificial Intelligence Applications, et al. Guidelines for glaucoma imaging classification, annotation, and quality control for artificial intelligence applications. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2025, 25(4): 511-522.

0 引言

青光眼是一种慢性眼病,通常伴随着眼内压升高,可导致视神经受损,最终引发不可逆的视力损失^[1]。早期的青光眼症状并不明显,因此准确且及时的诊断对于预防患者视力丧失至关重要。随着人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术在医学领域的快速发展,眼科疾病的诊断和治疗正朝着更加精准、个体化的方向迈进。在青光眼的诊疗中,影像学检查、分类和标注为 AI 模型提供了重要的基础数据,使得 AI 在青光眼的早期筛查和诊断中具有巨大潜力。青光眼影像分类和标注通过对青光眼特征性结构的准确识别,为 AI 算法的训练提供了关键支持。彩色眼底照相、光学相干断层扫描 (optical coherence tomography, OCT)、眼前节光学相干断层扫描 (anterior segment optical coherence tomography, AS-OCT) 和超声生物显微镜 (ultrasound biomicroscopy, UBM) 等多种影像技术的联合使用,不仅提升了青光眼诊断的准确性,还为其早期检测和进展监测提供了更多的影像依据。

近 10 a,眼科 AI 研究呈现出明显的增长趋势,主要集中在利用先进的计算方法分析和处理眼科图像数据^[2]。现有的眼科 AI 临床研究评价指南为 AI 技术在眼科的应用提供了广泛指导^[3],然而,针对青光眼这一特定病种的影像分类和标注,仍存在技术标准不统一、操作方法不规范等问题,导致 AI 模型的准确性和可推广性受到限制。为此,我们组织了眼科临床专家、影像学专家及人工智能研究人员,成立了《面向人工智能应用的青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制指南》执笔专家组。2023 年初,执笔专家组对国内青光眼影像标注的现状进行了深入调研,收集了临床和研究中存在的主要问题及标注实践中的技术需求。

本指南编制过程中,专家组成员通过查阅国内外相关文献资料,采用线上线下相结合的形式,组织专家讨论和反复论证,对青光眼影像分类和标注的关键技术要点进行详细梳理。执笔专家组根据讨论结果撰写了指南初稿,并通过电子邮件、微信等方式广泛征求各位专家的意见,反复修改和完善,最终形成指南终稿,本指南制定过程历时约 2 a。本指南旨在为青光眼影像的分类和标注提供规范化的操作依据,以提升影像数据的质量和一致性,从而推动 AI 技术在青光眼早期诊断和疾病管理中的应用。

1 青光眼影像分类和标注的常用影像模态和任务

青光眼分类和标注的目的是通过对不同类型的眼底影像进行准确的标注,使计算机视觉系统能够学习和理解青光眼相关的眼部结构和病变,从而实现青光眼的自动化诊断和分析。以下是不同青光眼影像和相应任务的分类和标注的研究范围:

(1) 彩色眼底照相,研究范围:对彩色眼底照相中的视杯和视盘标注,并进行分类;任务:通过标注视杯和视盘的边界、形态和颜色等特征,实现青光眼的诊断和视盘改变的监测。

(2) OCT,研究范围:对 OCT 图像中的视神经纤维层 (retinal nerve fiber layer, RNFL) 进行测量和标注;任务:标注 RNFL 的厚度、形态和异常,用于早期青光眼的诊断和病程监测。

(3) AS-OCT,研究范围:对 AS-OCT 图像进行前房角的标注和参数计算;任务:标注虹膜根部和小梁网等结构,用于评估前房角的解剖结构,帮助青光眼的诊断和治疗。

(4) UBM,研究范围:对 UBM 图像进行前房角的标注和参数计算;任务:标注前房角、虹膜根部、睫状体和巩膜等结构,以获取更详细的房角解剖信息,对明确青光眼的发病机制提供支持。

2 青光眼影像分类和标注的原则和方法

2.1 青光眼影像分类原则

2.1.1 青光眼彩色眼底照相分类 青光眼是一种以视网膜神经节细胞 (retinal ganglion cell, RGC) 及其轴突丢失为特征的慢性退行性视神经病变。在眼底影像中,通常可观察到特征性视杯/视盘改变、盘沿组织丢失等问题^[4]。

2.1.1.1 视杯比扩大 青光眼通常会导致视杯和视盘的形状、颜色和深度的改变,在眼底影像中可观察到视杯和视盘的明亮中心区域的扩张及青光眼典型的视盘凹陷。视盘是眼底图像中的一个结构区域,位于眼球的后部,是视神经穿出眼球的部位。视盘通常呈现为圆形或椭圆形,大小和形态因人而异,但通常都具有淡红色调;视杯是眼底图像中视盘的中央凹陷部分,其形态呈圆形或椭圆形,颜

色明亮。视杯和视盘重合,但相对于视盘来说,视杯的面积更小^[5]。图1展示了正常眼底图像与青光眼眼底图像在杯盘比(cup to disc ratio, CDR)上的差异,可以很明显地看到青光眼眼底图像的 CDR 大于正常眼底图像的 CDR。

临床上,CDR 是由视杯的垂直直径(vertical cup diameter, VCD)和视盘的垂直直径(vertical disc diameter, VDD)决定的。CDR 的计算公式如下:

$$CDR = \frac{VCD}{VDD}$$

一般来说,眼底影像中,CDR 大于 0.6,提示可能存在青光眼的风险^[6]。

2.1.1.2 盘沿异常 盘沿区域的组织丢失或盘沿厚度异常可能与青光眼疾病的发展有关^[7]。图2展示了正常眼底与盘沿不同类型缺失状态下的图像。局限性丢失:表现为在视盘上下极偏颞侧的区域,形成切迹或假性小凹,同时伴随血管呈屈膝状。弥漫性盘沿组织丢失:表现为整个视盘沿呈虫蚀样,其颜色苍白,且周围萎缩弧明显。

2.1.1.3 不符合正常视神经 ISNT 法则 在正常眼底图像中,视盘盘沿通常呈现出一种特征性的形态,遵循 ISNT 法则(图3),即盘沿在下方(inferior)最宽,上方(superior)次之,鼻侧(nasal)较上方或下方稍窄,而颞侧(temporal)最窄^[8]。具体来说,盘沿宽度的分布模式为:下方>上方>鼻侧>颞侧。这种盘沿宽度的分布模式对于识别视盘的异

常变化,特别是青光眼引起的盘沿丢失,具有重要意义。如果视盘盘沿的宽度不符合 ISNT 法则,即下方盘沿窄于鼻侧,或者下方盘沿窄于上方盘沿,甚至鼻侧盘沿宽于预期,都需要考虑青光眼的可能性。

2.1.2 青光眼眼底 OCT 影像分类 由于青光眼引起的视网膜内层结构的动态变化,以及视野计阈值敏感度受到相应计量方法(对数关系)的影响,视网膜神经节细胞在丢失 40%–50%时,才会出现可以通过临床视野检查观察到的损伤^[9]。然而,OCT 可以检测微小的视网膜内层结构变化,而且不受患者配合程度的影响,对于早期青光眼性眼部损伤的诊断具有重要价值。即使在青光眼视野发生损伤之前,OCT 也能进行诊断,这被称为视野前青光眼。近年来,OCT 在青光眼的临床诊疗中应用越来越广泛。OCT 在青光眼早期诊断的应用主要体现在对视网膜神经纤维层及视盘的监测上。

2.1.2.1 RNFL 变薄 视盘和视野未发生改变时,即可在 OCT 图像中出现 RNFL 变薄。OCT 可定量观测视网膜神经纤维,能更早地发现 RNFL 的损害。RNFL 在正常眼,平均厚度在 100 μm 左右,左右两侧(较薄)厚度约为 70 μm,上下(较厚)约为 120–130 μm,图4是正常眼睛的 OCT 图像。而 Alasil 等^[10] 研究发现原发性开角型青光眼(primary open-angle glaucoma, POAG)患者 RNFL 的平均厚度 89 μm、上方厚度 100 μm 和下方厚度 73 μm 为其发生重要视野损伤的临界点。

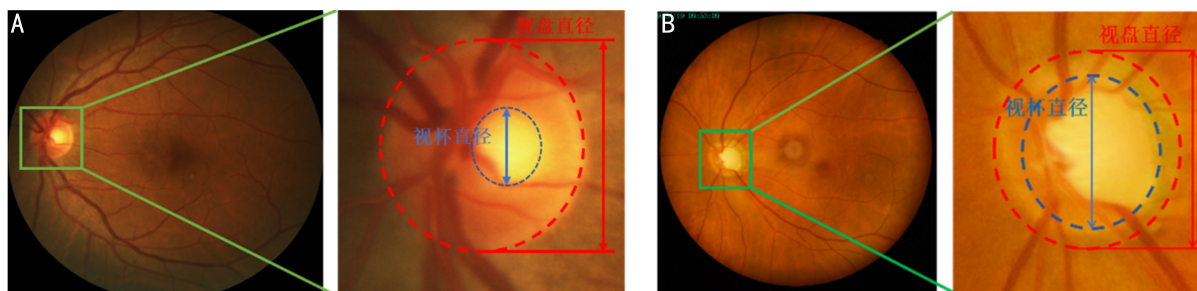


图1 正常眼底图像与青光眼眼底图像的 CDR A:正常眼底图像中视杯与视盘直径;B:青光眼眼底图像中视杯与视盘直径。

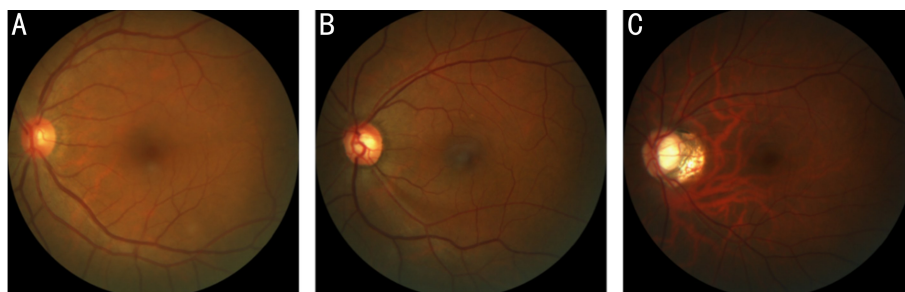


图2 正常眼底图像与盘沿异常眼底图像对比 A:正常眼底图像;B:盘沿局限性丢失眼底图像,视盘边缘局部区域出现萎缩;C:弥漫性盘沿组织丢失图像,视盘边缘广泛区域出现萎缩。

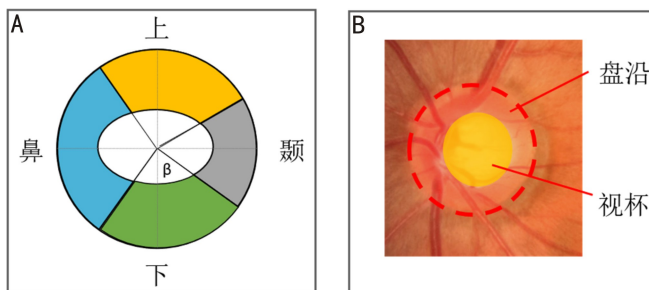


图3 ISNT 法则示意图 A:视盘分区示意图,按照鼻侧(N)、上方(S)、颞侧(T)、下方(I)四个象限划分;B:视盘结构示意图,显示了盘沿和视杯的位置关系。

2.1.2.2 视盘凹陷及视杯扩大 以视盘为中心做通过视盘的多条放射状断层扫描,可清楚地显示视盘轮廓、视盘凹陷和视盘周围的RNFL。在OCT图像中可定量测量视盘凹陷加深和视杯扩大的程度,CDR>0.6时,可能存在青光眼的风险。图5展示了正常状态下的视盘 CDR 和青光眼患者 CDR 的差异。

2.1.3 青光眼眼前节影像分类 眼前节又名眼前段,位于眼球晶状体前部,包括角膜、巩膜、前房、虹膜、瞳孔和晶状体等结构。利用AS-OCT和UBM检查技术,可以清晰地显示眼前节结构的横断面形态。这些技术对于青光眼的诊断和治疗至关重要。图6展示了前房角的AS-OCT图像和UBM图像,其中AS-OCT图像能完整地成像前房角结构,而UBM图像除了能显示前房角,更有利于深层结构的成像,如睫状体、晶状体等。图7展示了前房角结构示意图,有利于理解前房角的解剖特征。通过AS-OCT图像和UBM图像分析青光眼疾病,主要关注前

房角和虹膜状态。

2.1.3.1 POAG 与原发性闭角型青光眼 在美国,最常见的青光眼类型是POAG,而在世界上其它地区,原发性闭角型青光眼(primary angle-closure glaucoma, PACG)是主要的青光眼类型^[11-13]。POAG的发病机制目前尚不完全明确,前房角外观未见明显异常,可能与小梁网功能与结构受损有关,从而导致房水生成增加或房水排出受阻^[14]。PACG的发病机制是由于虹膜和角膜之间狭窄的前房角阻塞了房水的排泄通道,从而导致眼压升高,造成视神经损伤^[15]。图8展示了POAG与PACG的UBM图像。POAG患者与PACG患者在前房角、眼生物特征参数上存在明显的结构性差异,包括前房角狭窄、眼轴长度较短、晶状体较厚等^[15]。POAG图像呈现前房角入口宽,虹膜平坦,可见全部前房角结构;而PACG图像呈现前房角入口狭窄、周边虹膜膨隆,不见前房角结构。

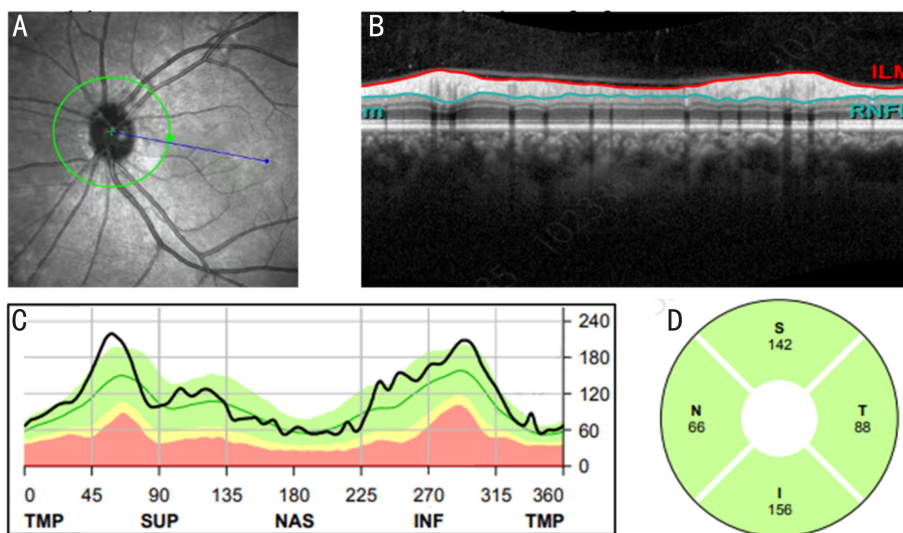


图4 RNFL正常的OCT图像及分析 A:视盘和乳头周围区域的OCT扫描;B:视网膜内界膜(ILM)和RNFL的展开图,对应于OCT红外扫描中(绿色)环的位置。这两条线代表了pRNFL的边界;C:与(绿色)环对应的pRNFL的厚度分布,并位于正常值(绿色/顶部=正常,黄色/中间=边缘,红色/底部=病理);D:不同扇区的pRNFL平均厚度样本。

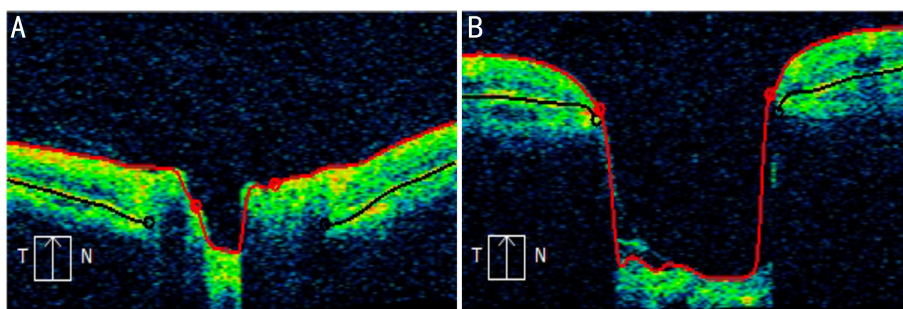


图5 正常人与青光眼患者的CDR A:正常人CDR;B:青光眼患者CDR。红色小圈水平距离为视杯直径,黑色小圈水平距离为视盘直径。

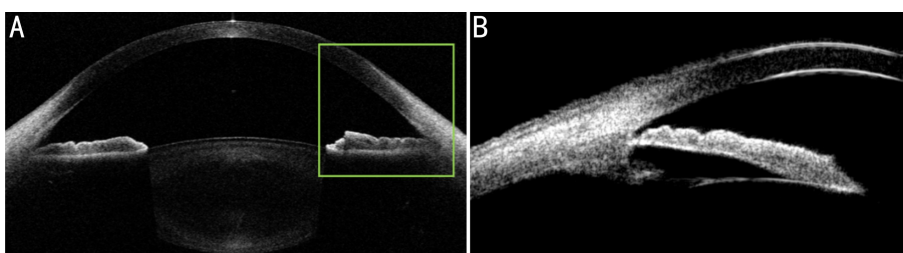


图6 前房角结构的横断面形态 A:AS-OCT图像;B:UBM图像。

2.1.3.2 PACG 分级 前房角分级方法是指对前房角宽度(开放程度)进行数字分级,进而对前房角潜在的闭合风险进行评估。常用的前房角分级方法有 Scheie 分级法^[16]、Shaffer 分级法^[17]、Van Herick 分级法^[18]和 Spaeth 分级法^[19]等。Scheie 分级法根据前房角镜中是否能观察到相应的眼前节解剖结构(如睫状体带、虹膜、小梁网和 Schwalbe 线等)来对前房角进行分级。Van Herick 分级法通过评估周边前房深度(peripheral anterior chamber depth, pACD)(角膜缘周边角膜内皮与周边虹膜前表面距离)与角膜厚度的占比来初步评估前房角宽度,当 pACD 小于角膜厚度的 1/4 时,前房角存在闭合的风险。Spaeth 分级法是最为细致也是最为复杂的分级方法,综合了虹膜角膜角宽度、周边虹膜形态以及虹膜根部的附着位置进行前房角分级。当虹膜角膜角宽度小于 10°、周边虹膜膨隆或虹膜根部附着位置在 SS 或者 Schwalbe 线前后时,前房角存在闭合的风险。目前国际上使用最广泛的方法是 Shaffer 分级法,Shaffer 分级法将角膜-小梁网内表面和周边虹膜前表面两条假想切线夹角宽度(前房角宽度)作为分级标准,该角度的宽度取决于前房角入口和周边虹膜的形态,其示意图如图 9 所示。

根据 Shaffer 分级法,前房角宽度可分为 0°-45°。一般情况下,当前房角宽度小于 20°(前房角狭窄、鸟嘴状)时,可判断为可关闭窄房角;当前房角宽度小于 10°时,可判断为高危前房角狭窄,应做进一步检查。详细分级标准如表 1 所示。

2.1.3.3 急性 PACG 与慢性 PACG PACG 的临床表现比较复杂,可以分为急性和慢性两种临床表现型。(1)急性 PACG:在眼前节结构影像中多见虹膜明显膨胀型的窄前房角,前房角呈“全”或“无”的方式关闭,可伴有程度上的不同,前房角突然关闭且范围较大^[14]。图 10 展示了由瞳孔阻滞导致的虹膜膨隆。(2)慢性 PACG:原发性慢性闭角型青光眼,具有与原发性急性闭角型青光眼相似的解剖特征,如小眼球、小角膜、短眼轴、厚晶状体、浅前房等。慢性发展,前房角狭窄至完全关闭,眼压逐渐升高,无急性闭角型青光眼相应的瞳孔散大和虹膜萎缩等表现。慢性闭角型青光眼更强调视神经的损害和视野缺损。原发性慢性闭角型青光眼的发病机制尚未完全清楚,UBM 多以高褶虹膜构型或混合机制表现^[14]。图 11 展示了原发性慢性闭角型青光眼的两种发病机制的 UBM 表现。

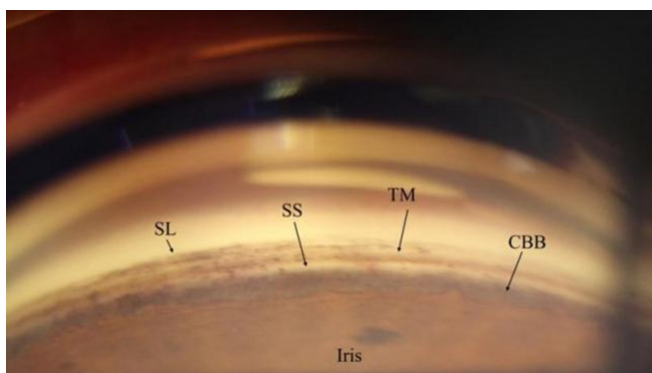


图 7 前房角结构示意图 Schwalbe 线(SL);巩膜突(scleral spur, SS);小梁网(TM);睫状体带(CBB);虹膜(Iris)。

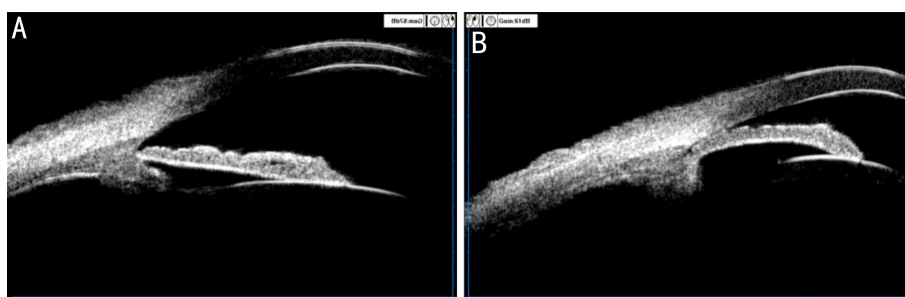


图 8 青光眼前房角 UBM 图像 A:开角型青光眼前房角 UBM 图像,可见前房角开放,虹膜平坦;B:闭角型青光眼前房角 UBM 图像,可见前房角关闭,虹膜向前凸起。

表 1 Shaffer 分级法分级标准

前房角宽度	前房角描述	前房角分级	前房角闭合判断
35°-45°	宽角开放	4	不可能闭合
20°-35°	宽角开放	3	不可能闭合
10°-20°	中等窄	2	可能闭合
≤10°	非常窄	1	可疑闭角
裂隙或闭合	呈裂隙状或闭合	裂隙-0	最终会闭合或已经闭合

2.1.3.4 按前房角结构参数分类 对 AS-OCT 或 UBM 影像进行分析处理,可以得到前房角结构参数的精确测量结果。根据这些结果,可以一定程度上判断患者是否患有 PACG。目前常用的前房角开放参数包括小梁虹膜角 (trabecular iris angle, TIA),房角开放距离 (angle opening distance, AOD),房角隐窝面积 (angle recess area, ARA) 等^[20-22]。图 12 展示了前房角开放参数在 UBM 图像上

的标注示意。表 2 列举了眼前节解剖结构相关参数的介绍及其与青光眼相关性。在以上参数中,前房深度 (anterior chamber depth, ACD) 的筛查性能优于虹膜厚度 (iris thickness, IT)、虹膜曲率 (iris curvature, I-CURV) 等虹膜参数,仅利用虹膜参数则不能进行前房角狭窄的筛选,TIA 是较 AOD 更为敏感的前房角开放程度评估指标。

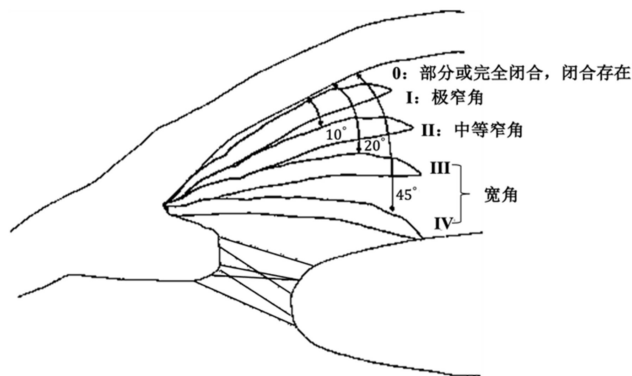


图 9 Shaffer 分级方法示意图。



图 10 急性 PACG 该病例的 UBM 显示由于瞳孔阻滞而后房压力高 (白箭头),导致虹膜膨隆,机械关闭前房角。

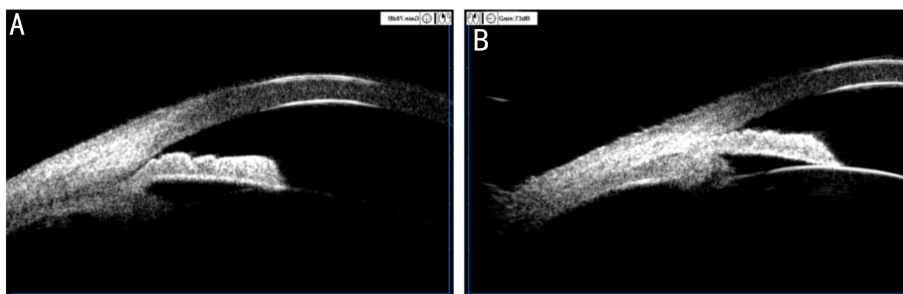


图 11 慢性 PACG A:虹膜高褶型 UBM 表现;B:周边虹膜肥厚型 UBM 表现。

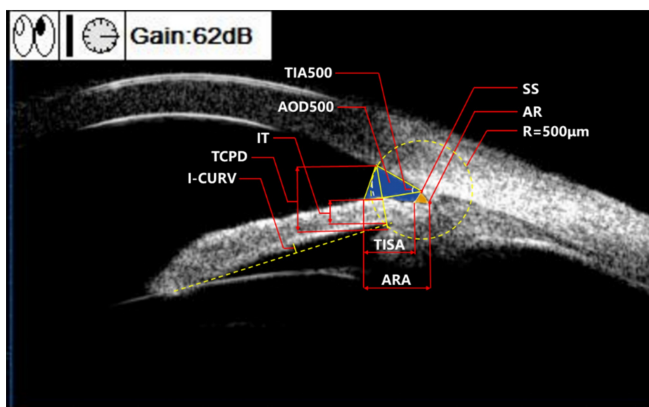


图 12 前房角开放参数在 UBM 图像上的标注示意 小梁睫状体距离 (TCPD);房角隐窝 (angle recess, AR);小梁网虹膜间面积 (trabecular iris space area, TISA);参数后的“500”指测量的标志点距离 SS 500 μm 。

表 2 眼前节解剖结构相关参数及其与青光眼相关性的介绍

参数类型	参数名	参数介绍	相关性
虹膜参数	IT	虹膜前表面上距 SS 500 μm 或 750 μm 或 2 000 μm 的点,经该点向虹膜后表面作垂线,与虹膜前后表面相交,两交点间的距离即 IT。	正相关 ^[12]
	I-CURV	以虹膜色素上皮最周边点至最中央点连线作为参考线,虹膜背面拱起的最高点与参考线的垂直距离。	正相关 ^[13]
眼前房参数	ACD	ACD 指角膜后侧至晶状体前侧的空间,包括中央前房深度 (central anterior chamber depth, cACD) 和 pACD。	负相关 ^[14]
	前房面积 (anterior chamber area, ACA) 与前房体积 (anterior chamber volume, ACV)	ACA 是由角膜内皮、虹膜前表面及位于瞳孔以内的晶状体前表面围成的横截面积。ACV 是以 ACA 为旋转面,围绕角膜反光点和晶状体顶点的连线旋转 360° 所围成的体积。	负相关 ^[15]
前房角参数	AOD	在 SS 前 500 μm 或 750 μm 的小梁网,垂直于角膜作直线与虹膜前表面相交,两交点之间距离为 AOD。	负相关 ^[16]
	ARA 和 TISA	ARA 是由 AOD、虹膜前表面、角膜后表面所围成的图形的面积。TISA 为经 SS 垂直于巩膜壁作直线与虹膜相交,SS 与虹膜交点间连线为此范围的后边界,前边界为 AOD,上边界为前后界之间的角巩膜缘内壁,下边界为前后界之间的虹膜表面,此四条边界围成的面积。	负相关 ^[17]
	TIA	以 SS 为圆心、500 μm 为半径作圆,与角膜内皮面及虹膜前表面相交;以 SS 为顶点,该顶点与两交点连线所形成的夹角即 TIA。	负相关 ^[18]

注:正相关表示该参数越大,患青光眼的概率越高,负相关则相反。

2.2 青光眼影像中的结构标注原则和方法

2.2.1 彩色眼底照相中视杯视盘结构标注

青光眼是一种常见的眼部疾病,其主要特征是视盘形成病理性扩大的杯状凹陷。杯状凹陷是由于眼内压力增高,增加视神经乳头(视盘)及其血管的压迫所造成的^[23]。视盘是眼底内一个淡红色圆盘状结构,是视神经穿出眼球的位置,也是青光眼诊断的关键部位之一。视杯是视盘中心区域的深凹部分,具有一定的深度。视盘和视杯在颜色和亮度上具有部分相似性和延续性,它们之间没有明显的分界线。因此,在医学实践中,标注者通常需要准确地识别视杯和视盘的区域,手动勾勒出视盘和视杯的边缘。图 13^[24]展示了彩色眼底照相的基本结构。当标注者在标注视杯和视盘时,应当遵循以下区分原则:(1)辨认视盘位置:视盘是眼底内一个淡红色圆盘状结构,是视神经穿出眼球的位置,通常位于眼球后部略偏鼻侧,标注者可以依据这些信息定位视盘。(2)确认视盘边缘:视盘的颜色通常相对较浅,而周围视网膜组织较为丰富,呈现较暗的颜色。通过注意颜色对比和变化,可以勾画出视盘的边界。(3)辨认视杯的位置:视杯位于视盘内部,视杯是视盘内的凹陷区域。通过分析彩色眼底照相,视杯是视盘内较亮的区域,相对于周围的视盘和 RNFL,形成颜色对比。(4)确认视杯边缘:通过视杯与周围盘沿区域的颜色以及亮度对比,可以确认视杯的边缘。

2.2.2 OCT 影像中眼底结构分层标注

许多眼科疾病都会使人体眼球中的视网膜和脉络膜层的厚度发生改变,严重的甚至会导致其中某一细胞层退化消失,如青光眼会导致视网膜中的 RNFL 变薄^[25]。在众多模态的眼科成像方式中,OCT 是一种非接触式、非侵入性眼科影像诊断技术,能够反映出视网膜的剖面形态,从而更加精确地对视网膜进行解剖。OCT 扫描主要分为以中央凹为中心的扫描

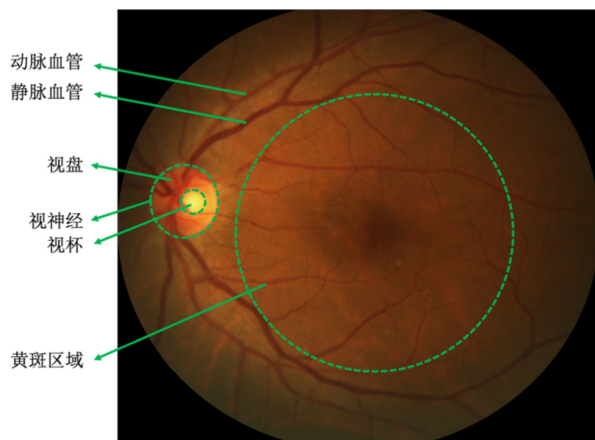


图 13 彩色眼底照相中眼底基本结构图 黄斑区域位置示意参考中华医学会眼科学分会眼底病学组发布的指南^[24]。

(黄斑扫描)和以视盘为中心的扫描^[26]。此外,图 14 展示了一张黄斑区域和视盘区域全覆盖的广角 OCT 扫描图像。

通过对 OCT 图像进行层分割可以准确定量地分析视网膜各层厚度与疾病的相关性。在临床应用和诊断中,往往需要标记人员手动标注 OCT 图像眼底结构层。图 15 展示了以黄斑中心凹为中心扫描的 OCT 图像及其人工分层标注示意图。

在诊断青光眼时,标记人员需要清晰地区分不同的眼底结构层,尤其是标注 RNFL,测量 RNFL 的厚度,通过 RNFL 厚度的变化来监测青光眼。以下是 OCT 图像中标注 RNFL 的一般原则:(1)定位视神经乳头(视盘):RNFL 汇聚于视神经乳头(视盘),所以首先需要准确定位和标注视神经乳头(视盘)的位置。(2)定位黄斑:如果图像是

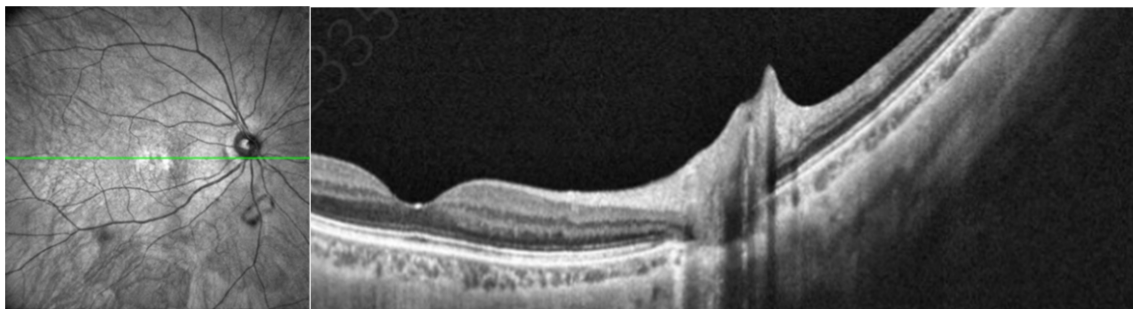


图 14 广角 OCT 扫描图像示例。

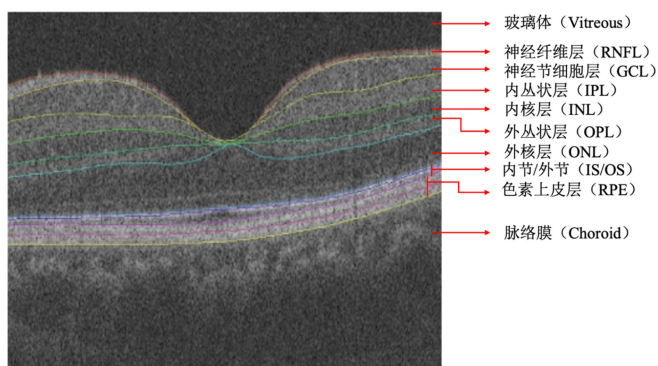


图 15 以黄斑为中心的视网膜 OCT 图像的一个 B-scan 以及眼底结构层标注示意。

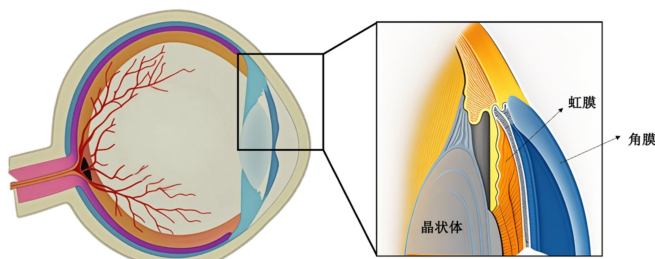


图 16 前房角解剖结构示意图。



图 17 SS 点在横断面中的位置。

以黄斑为中心的扫描,需要标注黄斑区域。黄斑区是视网膜中央的结构,与视力密切相关。(3)标注 RNFL 边缘:标注 RNFL 的边缘,包括内侧和外侧边界。这有助于测量 RNFL 的厚度和评估其结构。(4)分段测量 RNFL 厚度:根据需要将 OCT 图像进行分段,通常分为不同的方向(上、下、颞侧、鼻侧等)或分为不同的扇形区域。在局部区域测量 RNFL 的厚度,然后求平均值等。

2.2.3 AS-OCT 和 UBM 影像中前房角标注 前房角作为房水排出眼球的主要通路,指的是虹膜根部与角膜之间的夹角,是由前后壁和两壁所夹的隐窝组成。眼前节及前房角的解剖结构如图 16 所示。前房角作为房水流出的通路具有非常重要的功能,若前房角阻塞,就会使房水流出受阻,眼内压力因房水的积聚而升高,最终导致青光眼的发生。前房角评估是青光眼诊断以及治疗效果评价的关键性检查,而前房角的可视化是其准确评估的前提。目前前房角的可视化主要依赖于眼前节影像诊断技术,包括 AS-OCT 和 UBM 等。

AS-OCT 和 UBM 能够清晰地显示前房角的子午切面,为前房角开放参数的定量测量提供了可能。这些参数包括 TIA, AOD, ARA 等。这些参数的量化都依赖于一个特定解剖标志的定位,即 SS,它是角膜后曲率和巩膜曲率的连接点,虹膜根部和睫状体位于 SS 的后方^[15]。在横断面图像中,SS 点表现为从巩膜内侧突出的楔形突起,如图 17 所示。

SS 点由巩膜内表面向前约 500 μm 包含了全部的小梁网结构,是房水排出的主要通道,由于小梁网在 AS-OCT 和 UBM 图像上难以准确分辨,因此小梁网点应该作为另一个关键标记点。房水窝是房水流动的区域,其在图像上表现为一个凹陷区域,用于标注 AR 的位置,以评估

前房角的深度和结构。以这 3 个点为基本参考点,可以标注和计算各个前房角开放参数^[27]。图 18 展示了各个前房角开放参数在 AS-OCT 图像中的标注,其中晶状体失高 (crystalline lens rise, CLR) 作为评估晶状体位置的重要参数,是指晶状体前极到水平位两 SS 连线的垂直距离。以下是标注前房角时的一些原则:(1)识别图像结构:首先需要准确识别前房角相关的结构,包括角膜内皮、小梁虹膜根部、房角隐窝等。确保图像清晰,使这些结构可辨认。(2)定位 SS 点和小梁网点:识别 SS 点和距离 SS 点 500 μm 的小梁网点。(3)定位 AR 点:识别和定位房角隐窝点。(4)测量前房角结构参数:使用软件工具进行测量,包括 AOD500、TIA500 等参数。这些参数对于评估前房角的宽度和深度非常有用。(5)多角度测量:在不同方向上进行多角度的测量,以获取全面的前房角结构信息。这有助于更全面地了解前房角的形态。

3 青光眼影像分类和标注的流程

青光眼影像眼结构标注的流程规范化对于确保一致性、可比性和准确性至关重要。以下是一些通用的青光眼影像分类和标注的流程:(1)分类和标注者资格要求:分类和标注者应具备眼科或眼视光学的医学背景,熟悉青光眼的临床特征和相关影像学表现。具备解读眼底图像、AS-OCT、UBM、OCT 等技术的经验。(2)图像筛选和预处理

理:确保使用高质量的眼科影像,对于含有治疗痕迹和不可读的图像,应当舍弃。检查图像以排除任何伪影或干扰,确保图像质量满足标准。(3)识别结构:在影像中准确识别和标记关键结构,包括视网膜、视盘、黄斑、前房角、小梁、虹膜根部等。(4)分类和标注青光眼影像:在各个模态图像上标记青光眼诊断相关区域,并判断是否患有青光眼和青光眼类型。(5)异常区域标注:标注任何异常的区域,如断裂、缺损、变薄等,这些可能与青光眼或其他眼部疾病相关。(6)数据记录与报告:记录所有测量结果,包括结构参数和异常区域。根据需要生成标准化的报告,以便医生和其他医疗专业人员能够更好地理解患者的眼部状况。(7)一致性和标准化:遵循一致性和标准化的原则,以确保不同医生或设备之间的标注结果具有可比性。

3.1 青光眼影像分类和标注流程规范化建议

3.1.1 眼底影像分类和标注流程 图 19 展示了眼底图像分类和标注的流程:(1)对眼底影像进行初步筛查,确认图像质量,排除模糊或不清晰的图像。(2)标注视杯和视

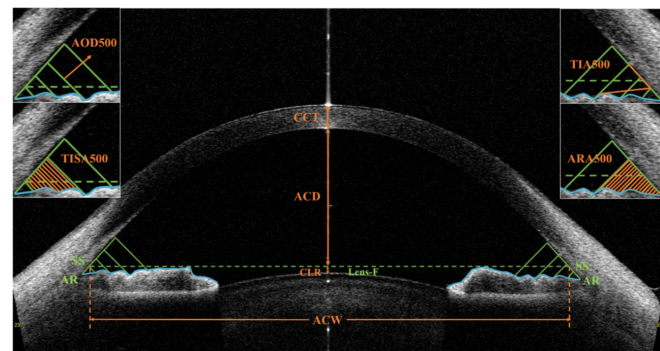


图 18 眼前节各参数示意图 中央角膜厚度(CCT);前房宽度(ACW);晶状体矢高(CLR);参数后的“500”指测量的标志点距离SS 500 μm。

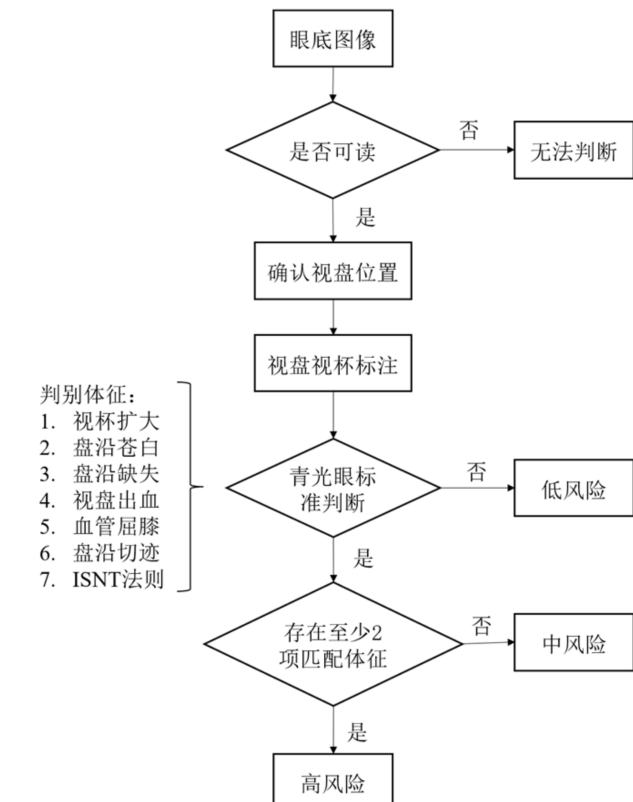


图 19 眼底图像分类和标注流程。

盘位置。(3)根据 CDR 和盘沿特征判断是否患青光眼以及患青光眼的风险。

3.1.2 眼前节影像分类和标注流程 图 20 展示了眼前节图像分类和标注的流程:(1)对 AS-OCT/UBM 图像进行初步筛查,确保图像质量和清晰度。(2)关注 AS-OCT/UBM 图像中的前房角区域,进行前房角参数的测量,如 TIA、AOD、ARA 等。(3)结合前房角参数以及图像特征,根据分级法,对前房角形态进行分类。(4)针对闭角型青光眼,标注患者的临床表现,包括急性和慢性闭角型青光眼的特征。

3.1.3 青光眼 OCT 影像分类和标注流程 图 21 展示了 OCT 图像分类的流程:(1)对 OCT 图像进行质量检查,排除不清晰或有干扰的图像。(2)判断 OCT 图像的扫描方式:黄斑为中心扫描或视盘为中心扫描。(3)标注 RNFL 的厚度变化,注明是否存在早期损伤。(4)标注视盘的凹陷程度和视杯的扩大情况,结合正常眼 OCT 图像进行对比。

3.2 青光眼影像中的结构标注流程规范化建议 青光眼影像中的结构标注可自行开发标注软件,或使用开源的医学影像以及通用影像标注软件,如 MD.ai, 3D Slicer, ITK-SNAP, LabelImg 等。无论使用何种标注形式,均需遵循标注流程规范。

3.2.1 彩色眼底照相中视杯视盘标注流程 彩色眼底照相中视杯视盘标注的主要观测范围为两个视盘直径区域的局部彩色眼底照相,主要标注流程如图 22 所示。(1)图像质量检查。(2)视盘标注:标注时需要确定视盘的边

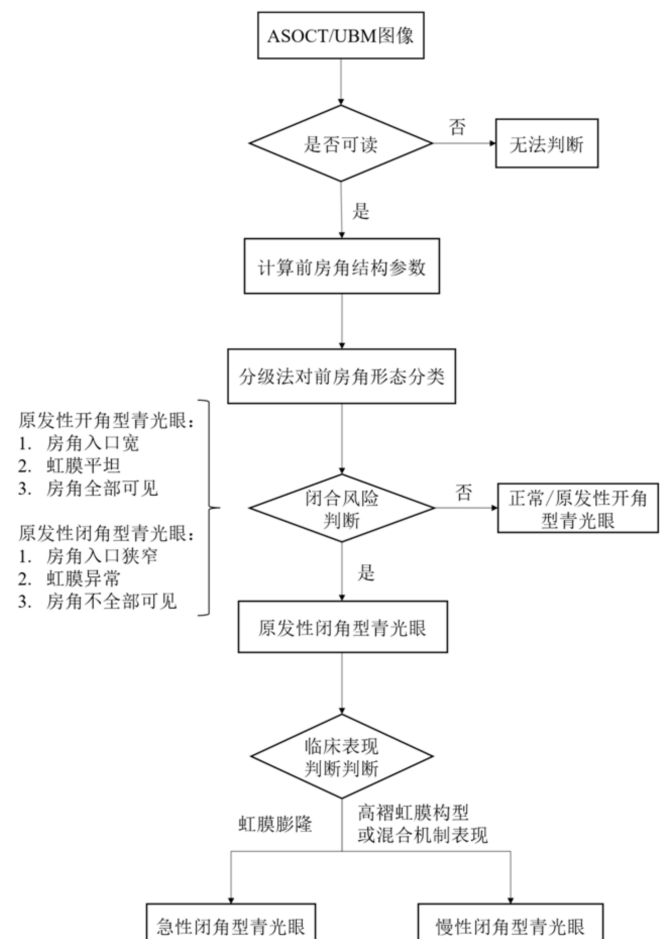


图 20 眼前节图像分类和标注流程。

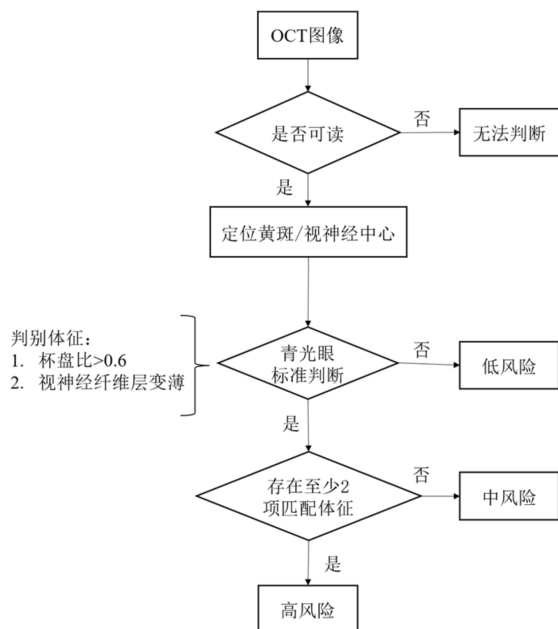


图 21 OCT 图像分类和标注流程。

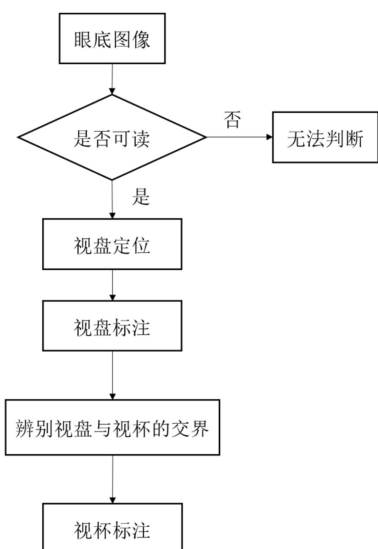


图 22 彩色眼底照相中视杯视盘标注流程。

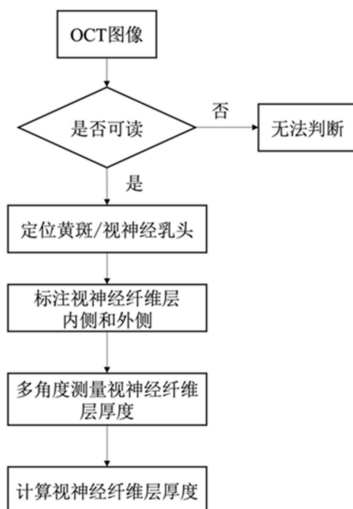


图 23 OCT 图像中 RNFL 标注。

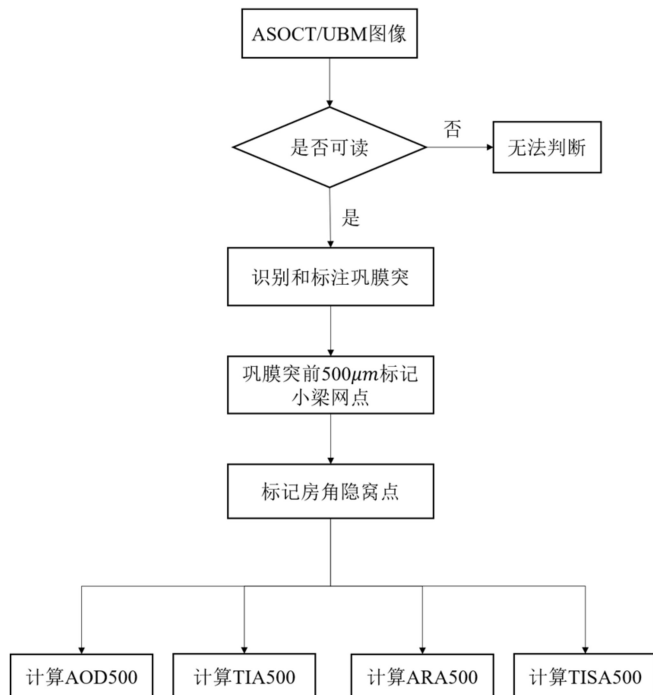


图 24 AS-OCT/UBM 图像前房角标注。

缘,一般是视神经乳头(视盘)周围颜色变化的地方。标注者需要仔细观察图像,准确勾勒出视盘的边缘,确保标注的准确性。(3)辨别视盘与视杯的交界:视盘与视杯之间存在一个边缘区域,即视盘边缘和视杯边缘的交界处。标注者需要准确地标注这一过渡区域,以提供更详细的结构信息。(4)视杯标注:视杯是位于视盘中心的凹陷区域,其形状和大小因人而异。标注时需要确定视杯的边缘,并与视盘的边缘有所区分。同样,标注者需要根据图像的颜色和纹理变化,准确勾勒出视杯的形状。

3.2.2 OCT 图像中 RNFL 标注流程 图 23 展示了 OCT 图像中 RNFL 标注和厚度计算的流程:(1)对 OCT 图像进行质量检查。(2)根据 OCT 图像扫描方式定位黄斑和视神经乳头。(3)标注 RNFL 的内侧和外侧边界。(4)多角度测量和计算 RNFL 的厚度。

3.2.3 AS-OCT/UBM 图像中前房角标注流程 图 24 展示了 AS-OCT/UBM 图像中前房角标注的流程:(1)对 AS-OCT/UBM 图像进行质量检查。(2)识别和标注 SS, 巩膜组织与睫状体组织分界线与角膜内表面延长线的交

点即为 SS 位置^[28]。(3)SS 由巩膜内表面向前约 500 μm, 在小梁网上标记小梁网点。(4)标记房角隐窝点,其为虹膜根部顶点位置。(5)计算前房角相关参数: AOD500、TIA500、ARA500 和 TISA500。

4 青光眼影像分类和标注的质量控制要求

4.1 质量控制 挑战:青光眼眼底影像的质量波动大,可能受到患者协作程度、设备性能和环境因素的影响,导致图像模糊或细节不清晰。**解决方案:**(1)标准化采集设备和条件:为了降低差异性,使用标准化的眼部摄影设备和拍摄条件,确保图像的一致性。(2)质量评估工具:开发自动或半自动的质量评估工具,用于检测图像模糊、曝光不足等问题,以及排除低质量图像的影响。(3)培训标注人员:对标注人员进行专业培训,使其能够正确识别并排除低质量图像,提高标注结果的准确性。

4.2 专业约束 挑战:青光眼眼底影像的分类涉及多种影像类型,需要标注人员具备深厚的眼科专业尤其是青光眼专科知识,能够理解不同青光眼影像中复杂病变的挑战。**解决方案:**(1)明确专业标准:制定详细的专业标准,明确

各类青光眼影像中病变的特征和分类标准,为标注人员提供清晰的指导。(2)标注者培训:提供标注者必要的医学知识培训和标注工具培训。此外,还应提供丰富的实际案例以进行练习。让标注者在真实图像上进行标注,以培养他们的实际技能和应用知识。(3)多标注者参与:单一标注者可能存在主观误差。提高标注任务的质量,对于同一样本,可以考虑采用多标注者的平均值或集成结果,以降低个别标注者的主观影响。

4.3 流程监督 挑战:长期标注过程中可能存在人为错误或标注漏洞,需要有效的监督机制来提高标注质量。监督标注流程对于保证青光眼眼底影像分类和标注的质量至关重要。解决方案:(1)实时反馈系统:部署实时反馈系统,及时发现并纠正标注错误,以减小可能的误差。(2)定期审查和培训:定期对标注与分类结果进行审查,发现问题并进行及时纠正。此外,进行定期培训以更新标注人员的知识和技能。(3)建立审核机制:设立独立的审核机制,由专业人员对标注与分类结果进行审查,确保标注的准确性和一致性。

5 结论

AI技术在临床工作中的应用广泛且具有显著优势^[29],青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制的规范化对于提高青光眼诊断的精准性和推动人工智能技术在眼科领域的应用具有重要意义。本指南通过详细阐述青光眼影像的分类原则和标注流程,明确了彩色眼底照相、OCT、AS-OCT和UBM等多模态影像的分类标准及标注要求,为规范化操作提供了参考依据。规范的影像分类和标注不仅能帮助临床医生和研究人员更准确地识别和评估青光眼相关的病理结构,还为人工智能模型的开发和优化提供了高质量的训练数据。这将有助于提升AI模型在青光眼自动诊断中的准确性和效率,促进AI技术在青光眼早期筛查、疾病监测和个体化治疗中的临床转化。本指南的制定旨在统一青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制,提高标注数据的一致性与可比性,为多中心研究数据的共享与分析提供基础支持,从而推动青光眼领域的科学研究与临床实践向更高水平迈进。

形成指南专家组成员:

执笔专家:

杨卫华 深圳市眼科医院,南方医科大学深圳眼科医学中心
许言午 华南理工大学未来技术学院,人工智能与数字经济广东省实验室(广州)
方慧卉 人工智能与数字经济广东省实验室(广州)
梁远波 温州医科大学附属眼视光医院
邵毅 上海交通大学医学院附属第一人民医院
毕燕龙 同济大学附属同济医院
郭竞敏 华中科技大学同济医学院附属同济医院
蓝育青 中山大学孙逸仙纪念医院
宋宗明 河南省立眼科医院,河南省人民医院
王军明 广州医科大学附属第二医院
王凯军 浙江大学医学院附属第二医院眼科中心
张弘 哈尔滨医科大学附属第一医院眼科医院
肖璇 武汉大学人民医院眼科中心
曹国凡 南京医科大学附属眼科医院

唐莉 四川大学华西医院
钟华 昆明医科大学第一附属医院
汪建涛 深圳市眼科医院,南方医科大学深圳眼科医学中心
崔颖 南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)
曲超 电子科技大学附属四川省医学科学院·四川省人民医院

参与起草的专家(按姓氏拼音排列):

陈新建 苏州大学
陈琴 南京医科大学第一附属医院
戴伟伟 爱尔数字眼科研究所
邓爱军 潍坊医学院附属医院
丁大勇 北京致远慧图科技有限公司
丁琳 新疆维吾尔自治区人民医院
丁喜艳 南京医科大学附属眼科医院
杜绍林 东莞东华医院
段立新 电子科技大学(深圳)高等研究院
付华柱 新加坡科技研究局高性能计算研究所
高鹏 同济大学附属上海第十人民医院
韩伟 浙江大学医学院附属第二医院
胡柯 重庆医科大学附属第一医院
胡建章 福建医科大学附属协和医院
胡勇平 西湖大学医学院附属杭州市第一人民医院
黄楚开 汕头大学·香港中文大学联合汕头国际眼科中心
黄厚斌 解放军总医院眼科医学部
季敏 南通大学附属医院
蒋贻平 赣南医科大学第一附属医院
金凯 浙江大学医学院附属第二医院
康刚劲 西南医科大学附属医院
李笠 福州大学附属省立医院
李世迎 厦门大学附属第一医院,厦门大学医学院
李小萌 香港科技大学
廖莹 川北医学院附属医院
陆培荣 苏州大学附属第一医院
罗文娟 青岛大学附属医院
区初斌 广东省医学影像智能分析与应用重点实验室
潘伟华 杭州爱尔眼科医院
孙利 南京中医药大学附属江苏省中西医结合医院
孙雯 浙江大学医学院附属儿童医院
唐广贤 石家庄市人民医院
陶黎明 安徽医科大学第二附属医院
童毓华 温州医科大学附属衢州医院(衢州市人民医院)
万程 南京航空航天大学
汪晓宇 浙江大学医学院附属第一医院
王猛 新加坡国立大学
王淑君 香港理工大学
王鲜 贵州医科大学附属医院
魏锐利 上海长征医院
魏宇博 北京鹰瞳科技发展股份有限公司
解正高 南京大学医学院附属鼓楼医院
徐帆 广西医学科学院·广西壮族自治区人民医院
徐晓萍 宁波市眼科医院
许晶晶 北京瞳沐医疗科技有限公司

许琦彬 浙江省中西医结合医院
杨永升 中国中医科学院眼科医院
姚雪 深圳市眼科医院,南方医科大学深圳眼科
医学中心
姚震宇 内蒙古民族大学附属医院
岳丽菁 广东省第二中医院
张冬冬 北京至真健康科技有限公司
张光华 太原学院
张炯 中国科学院宁波材料技术与工程研究所
赵一天 中国科学院宁波材料技术与工程研究所
周国宏 山西省眼科医院
周永进 深圳大学
郑博 湖州师范学院信息工程学院
郑亚林 利物浦大学,利物浦皇家大学医院圣保罗
眼科中心(英国)

Neeru Amrita Vallabh 利物浦大学,利物浦皇家大学
医院圣保罗眼科中心(英国)

Stephen Kaye 利物浦皇家大学医院圣保罗眼科中
心,利物浦大学(英国)

Vito Romano 布雷西亚大学(意大利)

Colin Willoughby 阿尔斯特大学(英国)

利益冲突:

所有作者均声明不存在利益冲突。本指南的制定未接受任何企业的赞助。

指南声明:

本指南由青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制相关领域专家起草,所有参与制定的专家均秉持客观、公正的立场,基于现有的科学研究证据、专业知识和临床经验,经过充分讨论后形成。本指南的编制过程遵循科学性、实用性和一致性原则,旨在为青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制提供规范化指导,促进人工智能技术在眼科领域的应用与发展。

免责声明:

本指南的内容仅代表参与制定的专家组对青光眼影像分类与标注的专业指导意见,供临床医师和研究人员参考。尽管专家们在指南制定过程中进行了广泛的讨论和意见征询,但仍可能存在未尽之处。本指南的建议为非强制性意见,与其不一致的操作方法并不必然被视为错误或不当。智能眼科临床实践中,青光眼影像分类和标注方法、流程暨质量控制仍有许多问题需要进一步探索。随着临床经验的积累和相关技术的发展,未来需定期对本指南进行更新和修订,以确保其内容与与时俱进,为患者带来更大临床获益。

参考文献

[1] 王雪梅,曲超. 青光眼视神经损伤的发病机制及治疗研究最新进展. 眼科新进展, 2024,44(7):572-577.
[2] 张庆,张平,朱思源,等. 基于WoSCC 10年文献分析眼科人工智能研究的热点和趋势. 数字医学与健康, 2024,2(4):240-246.
[3] 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.
[4] 钱朝旭,钟华. 人工智能在青光眼领域的研究进展. 国际眼科杂志, 2021,21(12):2081-2085.
[5] 彭亮亮. 基于深度学习的视盘视杯定位与分割模型研究. 西南交通大学, 2023.
[6] 罗敏,曹路,利建铨,等. 青光眼检测视盘与视杯分割在深度学习中的研究综述. 计算机工程与应用, 2024:1-21.

[7] 中国质量检验协会. 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.
[8] Maupin E, Baudin F, Arnould L, et al. Accuracy of the ISNT rule and its variants for differentiating glaucomatous from normal eyes in a population-based study. Br J Ophthalmol, 2020,104(10):1412-1417.
[9] Harwerth RS, Quigley HA. Visual field defects and retinal ganglion cell losses in patients with glaucoma. Arch Ophthalmol, 2006,124(6):853-859.
[10] Alasil T, Wang KD, Yu F, et al. Correlation of retinal nerve fiber layer thickness and visual fields in glaucoma: a broken stick model. Am J Ophthalmol, 2014,157(5):953-959.
[11] Sihota R, Shakrawal J, Sidhu T, et al. Does TRABECULECTOMY meet the 10-10-10 challenge in PACG, POAG, JOAG and Secondary glaucomas? Int Ophthalmol, 2020,40(5):1233-1243.
[12] Cheung CY, Li SL, Chan PP, et al. Intraocular pressure control and visual field changes in primary angle closure disease: the CUHK PACG Longitudinal (CUPAL) study. Br J Ophthalmol, 2020,104(5):629-635.
[13] Foster PJ, Johnson GJ. Glaucoma in China: how big is the problem? Br J Ophthalmol, 2001,85(11):1277-1282.
[14] 张秀兰,王宁利. 图解临床青光眼诊治. 北京:人民卫生出版社, 2014.
[15] 李攀明. 基于眼前节OCT图像的关键点定位与青光眼分类. 苏州大学, 2021.
[16] Scheie HG. Width and pigmentation of the angle of the anterior chamber; a system of grading by gonioscopy. AMA Arch Ophthalmol, 1957,58(4):510-512.
[17] Samaha D, Gagné S, Corbeil ME, et al. Predicting the risk for angle closure as defined by the Shaffer System Using Anterior Segment Optical Coherence Tomography: a Simple Approach. Can J Optom, 2020,82(1):100-105.
[18] van Herick W, Shaffer RN, Schwartz A. Estimation of width of angle of anterior chamber incidence and significance of the narrow angle. Am J Ophthalmol, 1969,68(4):626-629.
[19] Riva I, Micheletti E, Oddone F, et al. Anterior chamber angle assessment techniques: a review. J Clin Med, 2020,9(12):3814.
[20] Janssens R, van Rijn LJ, Eggink CA, et al. Ultrasound biomicroscopy of the anterior segment in patients with primary congenital glaucoma: a review of the literature. Acta Ophthalmol, 2022,100(6):605-613.
[21] Ishikawa H, Esaki K, Liebmann JM, et al. Ultrasound biomicroscopy dark room provocative testing: a quantitative method for estimating anterior chamber angle width. Jpn J Ophthalmol, 1999,43(6):526-534.
[22] Esaki K, Ishikawa H, Liebmann JM, et al. Angle recess area decreases with age in normal Japanese. Jpn J Ophthalmol, 2000,44(1):46-51.
[23] 黄祝祥. 基于深度学习的眼底图像视杯视盘联合分割算法研究. 江西财经大学, 2023.
[24] 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.
[25] Bowd C, Weinreb RN, Williams JM, et al. The retinal nerve fiber layer thickness in ocular hypertensive, normal, and glaucomatous eyes with optical coherence tomography. Arch Ophthalmol, 2000,118(1):22-26.
[26] 赵劲宇. 基于深度学习的光学相干断层扫描图像层分割处理技术. 西南交通大学, 2022.
[27] 张敏,安广琪,刘培,等. 基于SS-OCT分析眼轴长度与眼前节参数的相关性. 国际眼科杂志, 2023,23(8):1338-1342.
[28] 王文赛. 原发性闭角型青光眼智能辅助诊断系统的研究. 北京协和医学院, 2022.
[29] 杨卫华,方慧卉,王淑君,等. 人工智能赋能眼科临床:让算法成为医疗助手. 数字医学与健康, 2024,2(4):209-212.