

# 黄斑裂孔的影像学检查研究进展

王璐璇<sup>1</sup>, 刘秀花<sup>2</sup>, 高 磊<sup>2,3</sup>, 刘丽峰<sup>2</sup>

引用:王璐璇,刘秀花,高磊,等. 黄斑裂孔的影像学检查研究进展. 国际眼科杂志, 2026,26(1):63-66.

作者单位:<sup>1</sup>(276000)中国山东省临沂市,山东省鲁南眼科医院;<sup>2</sup>(261000)中国山东省潍坊市,潍坊眼科医院 正大光明眼科集团国家临床重点专科;<sup>3</sup>(266000)中国山东省青岛市,青岛大学正大光明国际眼科研究中心

作者简介:王璐璇,硕士,住院医师,研究方向:玻璃体视网膜疾病。

通讯作者:高磊,硕士,主任医师,正大光明眼科集团副院长,研究方向:玻璃体视网膜疾病. gl6365@163.com

收稿日期:2025-05-22 修回日期:2025-11-21

## 摘要

黄斑裂孔是一种与年龄密切相关的眼科黄斑疾病,以黄斑中心凹视网膜组织部分缺损和严重损害中心视力为特征。自19世纪中叶首次被描述以来,黄斑裂孔的研究已历经150余年。随着科学技术的飞速发展,尤其是眼底检查设备的不断更新换代,人们对黄斑裂孔的认识不断加深。光学相干断层扫描(OCT)技术的问世,极大地提升了人们对黄斑裂孔的认知水平。与此同时,黄斑裂孔手术的广泛开展,推动了对其发病机制和术前评估的深入研究,也促进了手术技术的推广及手术成功率的显著提高。文章系统回顾黄斑裂孔的影像学检查方法,重点讨论OCT在临床应用中的优势及现存问题,为临床诊疗提供参考。

关键词:黄斑裂孔;眼底影像;诊断;测量;人工智能

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.1.11

## Research progress on imaging examinations of macular hole

Wang Luxuan<sup>1</sup>, Liu Xiuhua<sup>2</sup>, Gao Lei<sup>2,3</sup>, Liu Lifeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Lunan Eye Hospital, Linyi 276000, Shandong Province, China; <sup>2</sup>Weifang Eye Hospital; Zhengda Guangming Eye Group; National Key Clinical Specialty, Weifang 261000, Shandong Province, China; <sup>3</sup>Zhengda Guangming International Eye Research Center, Qingdao University, Qingdao 266000, Shandong Province, China

Correspondence to: Gao Lei. Weifang Eye Hospital; Zhengda Guangming Eye Group; National Key Clinical Specialty, Weifang 261000, Shandong Province, China; Zhengda Guangming International Eye Research Center, Qingdao University, Qingdao 266000, Shandong Province, China. gl6365@163.com

Received:2025-05-22 Accepted:2025-11-21

## Abstract

• Macular hole is an age-related disorder defined by a full-thickness defect of the foveal retina and a profound loss of central vision. First described in the mid-19th century, its study has now extended across more than 150 years. Breakthroughs in science and technology—especially the relentless refinement of retinal imaging platforms—have progressively refined our understanding of the disease. Optical coherence tomography (OCT) in particular has revolutionized characterization of the condition. At the same time, the widespread adoption of macular hole surgery has not only driven deeper investigations into pathogenesis and pre-operative assessment but also facilitated the global dissemination of surgical expertise and a marked rise in anatomical success. This review synthesizes the multimodal imaging hallmarks of macular holes and highlights the remaining clinical challenges in the application of OCT technology.

• KEYWORDS: macular hole; fundus imaging; diagnosis; measurement; artificial intelligence

Citation: Wang LX, Liu XH, Gao L, et al. Research progress on imaging examinations of macular hole. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026,26(1):63-66.

## 0 引言

黄斑裂孔(macular hole,MH)是视网膜黄斑中心凹的一种组织缺损,累及视网膜内界膜(internal limiting membrane,ILM)至感光层外段的全层视网膜组织。黄斑裂孔根据视网膜组织缺失层次可分为全层黄斑裂孔(full-thickness macular hole,FTMH)和板层黄斑裂孔(lamellar macular hole,LMH),前者在临幊上更为常见,系指中心凹视网膜神经上皮层的全层缺损。黄斑裂孔也可以根据其致病原因分为原发性(特发性)和继发性裂孔,前者主要与玻璃体黄斑牵引有关,而后者通常与病理性近视或眼外伤有关<sup>[1]</sup>。据报道,黄斑裂孔的发病率约为0.09%~0.8%<sup>[2-5]</sup>,特发性黄斑裂孔为每10万人中每年8.69只眼患病、7.8人患病<sup>[6]</sup>。该病具有发病率随着年龄增长而增加的特点,发病高峰在70岁左右,其中女性占多数<sup>[7]</sup>。在黄斑裂孔被人类记载的长达150余年的历史当中,科学技术的发展和每一款眼底检查设备的推陈出新特别是光学相干断层扫描(optical coherence tomography,OCT)技术的诞生,拓展了人们对黄斑裂孔的认知。随着影像学技术的进步,特别是OCT的应用,临幊对黄斑裂孔的诊断和治疗取得了显著进展,然而在实际应用中仍面临诸多挑战。

### 1 直接眼底镜和裂隙灯下前置镜

作为最基础的检查手段,直接眼底镜和裂隙灯下前置镜是借助设备用肉眼直接观察真实色彩眼底的方法。

直接眼底镜由德国物理学家 von Helmholtz 于 1851 年发明,是古老的视网膜成像技术。黄斑裂孔伴随其发明被观察到,1870 年 Knapp 首次报告外伤性黄斑裂孔病例,1900 年 Ogilvie 首次使用“黄斑孔”术语<sup>[8]</sup>。1988 年 Gass<sup>[9]</sup>借助该技术联合荧光素眼底血管造影将 FTMH 分为四个阶段。

借助眼底镜,可在黄斑区观察到圆形或椭圆形组织缺损,大小不一,一般为 1/2~1/4 PD,基底部呈暗红色。用裂隙灯显微镜在前置镜下观察,可见投射到黄斑区的裂隙光线中断。若裂孔周围有视网膜下积液,裂孔周边可见白色圈;积液多时,裂孔边缘可见卷边,甚至形成黄斑裂孔源性视网膜脱离,部分患者可发展为全视网膜脱离,有时可见玻璃体条索<sup>[10]</sup>。Smiddy 等<sup>[11]</sup>报道前置镜下黄斑裂孔的基底部可见明亮的玻璃膜疣样黄色沉积物,周边可见视网膜下积液,还有明显的圆形边缘或伴有孔盖。

然而,这些传统检查方法存在明显局限性:检查结果依赖检查者主观判断,无法精准定量描述,仅以视盘直径参照简单描述大小。而且,屈光介质混浊或散瞳效果不佳的患者,观察会受到限制。在当时,人们对黄斑裂孔认知有限,手术被视为禁区,对其大小评估多为“定性”或“半定量”。

## 2 传统眼底照相和荧光素眼底血管造影及眼底自发荧光

1926 年,瑞士工程师 Hans Boeckmann 为 Carl Zeiss 公司设计制造了最早的商业化眼底照相机。它通过特定光源照亮眼底,使反射光线投射到感光材料或数字成像传感器上成像。此后,眼底照相技术不断发展,从黑白图像到彩色图像,拍摄角度和范围扩大,分辨率提升。在存储方面,早期主要依赖胶片等物理介质,随后逐步过渡到数字化存储方式,如内置存储器、移动存储设备甚至云端数据库等,提升了图像保存、共享与分析的能力。1961 年荧光素眼底血管造影(fundus fluorescein angiography, FFA)技术问世,它使用荧光素钠作为造影剂,注入人体后激发荧光,能动态观察眼底血管和血流以及血管壁的屏障功能。

然而,这些技术在实际应用中存在以下问题:眼底照相机下黄斑裂孔所见类似直接眼底镜,缺乏立体感,难以鉴别全层和板层黄斑裂孔,分辨率和量化能力不如 OCT。杨倩等<sup>[12]</sup>研究显示,眼底照相(fundus photography, FP)初步诊断为黄斑裂孔的患者,经 OCT 检查后,全层和板层黄斑裂孔的一致率仅为 51.42%,表明其在黄斑裂孔诊断上有局限性,更适合基层普查。

黄斑裂孔在 FFA 上呈现与裂口大小相称的类圆形高荧光区,有助于确定裂孔位置、大小及辨别全层和板层黄斑裂孔。张红等<sup>[13]</sup>对特发性黄斑裂孔患者检查发现,全层黄斑裂孔多呈现边界清晰的类似“窗样缺损”的透见强荧光,板层黄斑裂孔仅有部分有此表现。但 FFA 是有创检查,存在过敏等风险,且提供信息有限,临床已少用于黄斑裂孔研究。

眼底自发荧光(fundus autofluorescence, FAF)基于黄斑区及视网膜某些物质的自然荧光特性。全层黄斑裂孔表现为黄斑区圆形高荧光区,周围被低荧光环带围绕。彭锡嘉等<sup>[14]</sup>研究发现,黄斑裂孔在 FAF 中表现为较强自发荧光,周围有低荧光围绕。尽管 FAF 具有操作简洁、高灵敏度和非侵入性等优点,但为二维成像且信息有限,在黄斑裂孔检查方面仍存在不足,临床较少使用。

## 3 眼科 B 超

眼科 B 超是利用超声波获取眼部结构信息的无创检查方法。其主要临床应用价值体现在:在屈光介质明显混浊,其他眼底检查设备无法使用时,它仍可对眼底进行形态学评估,包括诊断和评估黄斑裂孔。林松等<sup>[15]</sup>对黄斑裂孔患者研究发现,B 超影像上黄斑区呈实性圆顶状回声浅隆起,内回声中等至中强度,病变中央为孔状凹陷,整个病变呈“双峰状”,裂孔直径越宽,凹陷越明显。20 MHz 眼 B 型超声分辨率比普通 10 MHz 眼 B 超提高一倍,能初步鉴别几种常见黄斑病变。夏丹等<sup>[16]</sup>研究也证实,屈光间质混浊时,眼科 B 超在发现和确诊黄斑裂孔方面有优势。综合来看,B 超在无法使用 OCT 的情况下仍具有一定的诊断价值,但其分辨率有限(20 MHz 超声侧向分辨率仅 200 μm,轴向分辨率 40 μm),仅适用于屈光介质明显混浊的特殊情况,并非黄斑裂孔常规检查手段。

## 4 激光扫描眼底镜

激光扫描眼底镜(scanning laser ophthalmoscopy, SLO)于 1980 年由 Robert Webb 和 Hugh Beckman 设计并投入临床。激光束以网格模式扫描视网膜表面,反射光束经共焦孔径系统到达光检测器生成高分辨率眼底正面图像。Savastano 等<sup>[17]</sup>使用的反模式扫描激光眼底镜(reverse mode scanning laser ophthalmoscope, RM-SLO)可达到伪 3 D 效果,获取清晰、连续的黄斑裂孔轮廓图像。

## 5 共焦激光断层扫描

德国海德堡工程公司的视网膜断层扫描仪(heidelberg retina tomograph, HRT)是共焦激光断层扫描的代表设备。它使用近红外激光扫描视网膜,通过光敏探测器测量反射光强度,利用共焦技术排除非焦点平面反射光,获得高清视网膜图像。HRT 连续扫描视网膜不同层次,重建出高分辨率三维视网膜地形图。Michalewska 等<sup>[18]</sup>研究显示其可用于观察裂孔的断裂边缘,但其结果受患者注视稳定性影响较大,且后被能提供三维图像的设备所取代。

## 6 视网膜厚度分析仪

视网膜厚度分析仪(retinal thickness analyzer, RTA)也曾用于黄斑裂孔的评估,它能快速扫描眼睛后极部视网膜并生成光学横截面。Konno 等<sup>[19]</sup>比较 RTA 和 HRT 后发现,RTA 结果受患者注视点稳定性影响,HRT 能提供三维图像,更利于理解黄斑裂孔形状和深度。

## 7 OCT

OCT 作为一种高分辨率、非侵入性的头部影像学检查技术,已广泛应用于黄斑裂孔的诊断、分期及手术前后评估。根据成像原理的不同,OCT 主要分为时域 OCT (time-domain optical coherence tomography, TD-OCT)、傅里叶域 OCT (fourier-domain optical coherence tomography, FD-OCT),后者又可进一步分为谱域 OCT (spectral-domain optical coherence tomography, SD-OCT) 与扫频源 OCT (swept-source optical coherence tomography, SS-OCT)。其中,SD-OCT 因较高的轴向分辨率(约 5 μm)可清晰显示裂孔细节,有助于判断分期;SS-OCT 则具有更深成像深度和更快扫描速度,尤其适用于合并高度近视等复杂眼底改变的黄斑裂孔评估<sup>[20]</sup>。

2013 年,国际玻璃体黄斑牵引研究组(International Vitreomacular Traction Study, IVTS)提出基于 OCT 水平扫

描的黄斑裂孔最小直径(minimum linear diameter, MLD)测量共识，并据此将裂孔分为小、中、大三类<sup>[1]</sup>。该标准显著推进了黄斑裂孔研究的标准化进程。多项研究指出，术前 OCT 所测得的 MLD、基底直径(basal diameter, BD)、裂孔高度体积等参数与术后解剖闭合率及视力预后显著相关<sup>[21-25]</sup>。例如，Falllico 等<sup>[21]</sup>发现较小的 MLD 和 BD 预示着更好的术后视力恢复；Venkatesh 等<sup>[22]</sup>提出黄斑裂孔面积指数(macular hole area index, MAI)是预测术后闭合的重要指标。

OCT 在黄斑裂孔临床应用中的问题与挑战：(1) 测量标准化问题：随着人们对黄斑裂孔了解的深入以及对测量精确度的更高要求，有学者发现，IVTS 基于 OCT 水平扫描模式的测量或许存在着一个明显的系统性误差，而该误差可能来源于人们对圆形黄斑裂孔的认知偏差<sup>[23]</sup>。因为在真实世界当中，黄斑裂孔形态多为不规则的椭圆形，单纯水平扫描可能无法真实反映黄斑裂孔在 360° 径线上的最大 MLD，只有当黄斑裂孔为标准圆孔时，水平扫描才能替代放射扫描。或者讲，黄斑裂孔理论上在其 360° 范围内是存在无数个 MLD，也一定存在一条最长和最短的 MLD，依据黄斑裂孔直径越大越不利于黄斑裂孔闭合的事实和我们潜意识常规思维，我们需要获取的无疑是黄斑裂孔 360° 范围内最大的 MLD，而目前 IVTS 的共识至少从理论上是存在缺陷的，因为它强制限定了我们只测量水平线上的 MLD，而该 MLD 有极大的概率并非是我们真正想获取的。Baumann 等<sup>[24]</sup>报道对同一批 50 例患者的黄斑裂孔分别进行放射扫描和水平扫描，结果发现通过放射状扫描所获得的 MLD 较水平扫描存在显著差异，平均增加高达 47.13 μm。我们前期的研究也证实了上述结论并且发现仅 22.5% 的患眼其最大 MLD 位于水平扫描线，不同扫描方式所获得的 MLD 的差异，甚至可能导致裂孔分级的改变<sup>[24]</sup>。这些结果表明，放射扫描模式在反应真实裂孔形态方面更具优势<sup>[25-26]</sup>，提示当前 IVTS 共识在测量方法上存在局限，临床实践中应考虑多方向扫描以获取更准确的 MLD。(2) 测量方法学的理论局限：从三维结构看，黄斑裂孔更近似“不规则井状”形态，因此所有基于二维投影原理的测量方式均存在一定偏差<sup>[27]</sup>。但在实际操作层面，多项研究表明手动测量 MLD 具有良好重复性。Baumann 等<sup>[24]</sup>与 Gil-Hernández 等<sup>[28]</sup>分别验证了不同测量者间及不同测量时间点下 MLD 数据的高度一致性( $ICC \geq 0.94$ )，说明在现有技术下，手动测量仍具有一定可靠性，但其三维形态的精确量化仍需进一步技术突破。(3) 技术应用的挑战：目前 OCT 在黄斑裂孔应用中仍面临多项挑战，包括测量标准化方案的优化、三维参数对手术方案的指导价值，以及如何将更多 OCT 形态学指标纳入术前预测模型等。尤其是如何将 OCT 测量结果与手术预后更精准地关联，仍是未来研究的重点。

## 8 人工智能在黄斑裂孔测量中的应用

近年来，人工智能技术在医学影像分析领域发展迅速，在黄斑裂孔的自动检测和测量方面也有应用。人工智能基于深度学习算法，构建卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、U-Net 等模型，学习大量 OCT 图像，自动提取黄斑裂孔的边界、大小、面积等特征参数。

多项研究表明人工智能在黄斑裂孔测量方面有效。Pereira 等<sup>[29]</sup>收集 24 例特发性 FTMH 患者术前 OCT 图像，

经专家标注 MH 体积后训练三维卷积神经网络自动分割，自动测量的 MH 体积与手动测量相关性达  $R^2 = 0.94$ ，实现自动三维体积测量，相比二维 OCT 分析，降低技术误差，提升测量重复性，有助于 MH 大小分类及术后结果预测。Chen 等<sup>[30]</sup>3D 自动图像处理算法分析 104 例患者 OCT 图像，与临床二维测量对比，发现黄斑裂孔各维度不对称明显，算法得出的最小面积最小值与临床测量的 MLD 平均相差近 50 μm，方向近 90° 垂直于水平扫描方向，使四分之一患者黄斑裂孔国际分类改变，说明 3D 自动分析在描述黄斑裂孔尺寸和形态上更准确、可重复，但该研究存在测量未校正眼轴长度、扫描协议及样本有局限等问题。

人工智能技术在黄斑裂孔测量中作用显著，不仅能检测黄斑裂孔，还可自动量化裂孔直径、MLD、BD 及视网膜内液体积等关键特征。Mendes 等<sup>[31]</sup>致力于开发自动分割 OCT 图像中 ILM3 边界层和 MH 区域、获取 MH 测量值的算法，采用欧氏距离等算法，基于 OCTID 数据库图像多步骤实现自动分割与测量。该算法在 ILM 边界层分割上比 Keller 等<sup>[32]</sup>方法误差更小、处理时间更短且能测量 MH；在 MH 区域分割上与 Nasrullah 等<sup>[33]</sup>方法效果相当；MH 测量平均误差小于 107 μm，MHI 分类表现良好。Shahalinejad 等<sup>[34]</sup>提出基于多级阈值分割和推导的新方法检测黄斑裂孔，该方法经多步骤流程实现检测。在印度 SN 眼科医院数据集实验中，该方法平均敏感度、准确率等指标优异，相比多种方法优势明显，运行时间更短。Murphy 等<sup>[35]</sup>开发全自动 3D 图像分析方法测量黄斑裂孔。结果显示，表面积与术前视力相关性最强，基于术前视力和 MH 高度构建的模型预测术后视力效果最佳，该算法测量值在预测术后视力上比传统测量值更具优势，凸显 3D 测量在评估手术预后方面的价值。

尽管人工智能技术在黄斑裂孔自动测量中展现出良好前景，但目前仍面临以下挑战：(1) 模型泛化能力不足：不同设备获取的 OCT 图像存在差异，导致模型泛化能力不足，在不同数据采集条件下表现不稳定。(2) 临床实际应用衔接问题：人工智能测量结果与临床实际需求的结合仍有待探索，需要更多的临床验证和实践应用。(3) 技术标准化问题：当前缺乏统一的算法标准和评估体系，影响了人工智能技术在临床中的推广应用。但整体来看，其应用前景良好，有望成为未来眼科诊疗的重要辅助手段。

## 9 小结与展望

黄斑裂孔是一种与年龄相关的常见眼科疾病，严重影响患者的视力和生活质量。其研究进展始终与科学技术及检查设备的革新紧密相连。从早期的直接眼底镜、眼底照相，到视网膜厚度分析仪和共焦激光扫描检眼镜等，多种设备曾用于黄斑裂孔的评估。而 OCT 技术的出现，成为黄斑裂孔诊断和治疗领域的革命性工具，目前已被公认为术前和术后评估的金标准。

然而，2013 年 IVTS 提出的以 OCT 水平扫描测量 MLD 的标准，目前看来存在系统性误差。在不改变现有测量习惯的前提下，仅通过放射状扫描即可较好地克服原先测量的局限性。尽管人工智能技术的发展为黄斑裂孔的自动化测量提供了新方案，但仍需解决模型泛化能力、临床实际应用与技术标准化等问题。

展望未来，随着 OCT 技术的迭代升级与人工智能的进一步融合，其在黄斑裂孔立体形态的自动测量与评估中

预计将发挥更为重要的作用，并有望推动 2013 年 IVTS 所制定的黄斑裂孔测量标准的更新与优化。

**利益冲突声明:** 本文不存在利益冲突。

**作者贡献声明:** 王璐璇论文选题与修改，初稿撰写；刘秀花、刘丽峰文献检索；高磊选题指导，论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

#### 参考文献

- [1] Duker JS, Kaiser PK, Binder S, et al. The International Vitreomacular Traction Study Group classification of vitreomacular adhesion, traction, and macular hole. *Ophthalmology*, 2013, 120(12): 2611–2619.
- [2] Wang S, Xu L, Jonas JB. Prevalence of full-thickness macular holes in urban and rural adult Chinese: the Beijing Eye Study. *Am J Ophthalmol*, 2006, 141(3): 589–591.
- [3] Thapa SS, Thapa R, Paudyal I, et al. Prevalence and pattern of vitreo-retinal diseases in Nepal: the Bhaktapur glaucoma study. *BMC Ophthalmol*, 2013, 13:9.
- [4] Sen P, Bhargava A, Vijaya L, et al. Prevalence of idiopathic macular hole in adult rural and urban south Indian population. *Clin Exp Ophthalmol*, 2008, 36(3): 257–260.
- [5] Nirmalan PK, Katz J, Robin AL, et al. Prevalence of vitreoretinal disorders in a rural population of southern India: the Aravind Comprehensive Eye Study. *Arch Ophthalmol*, 2004, 122(4): 581–586.
- [6] McCannel CA, Ensminger JL, Diehl NN, et al. Population-based incidence of macular holes. *Ophthalmology*, 2009, 116(7): 1366–1369.
- [7] Jackson TL, Donachie PHJ, Sparrow JM, et al. United Kingdom National Ophthalmology Database study of vitreoretinal surgery: report 2, macular hole. *Ophthalmology*, 2013, 120(3): 629–634.
- [8] Bikbova G, Oshitari T, Baba T, et al. Pathogenesis and management of macular hole: review of current advances. *J Ophthalmol*, 2019, 2019:3467381.
- [9] Gass JD. Idiopathic senile macular hole. Its early stages and pathogenesis. *Arch Ophthalmol*, 1988, 106(5): 629–639.
- [10] 程玉霞, 茶雪平, 张自艳, 等. 黄斑裂孔的研究进展. 昆明医学院学报, 2001, 22(2): 67–70.
- [11] Smiddy WE, Gass JD. Masquerades of macular holes. *Ophthalmic Surg*, 1995, 26(1): 16–24.
- [12] 杨倩, 韩毳, 刘宁, 等. 免散瞳数码眼底照相在眼底黄斑部疾病筛查中的应用. 眼科新进展, 2012, 32(5): 473–475.
- [13] 张红, 张承芬, 陈有信, 等. 特发性老年性黄斑裂孔的眼底荧光血管造影分析. 中华眼底病杂志, 1996, 4:6–8, 85.
- [14] 彭锡嘉, 王波, 王登廷, 等. 特发性黄斑裂孔眼底自发荧光成像研究. 眼科研究, 2009, 27(9): 784–787.
- [15] 林松, 漆晨, 赵乐冬, 等. 20MHz B型超声与频域光学相干断层扫描在黄斑病变诊断中的对比观察. 中华实验眼科杂志, 2012, 30(1): 63–66.
- [16] 夏丹, 皮雯, 宋琼, 等. 20MHz B型超声联合相干光层析成像术观察特发性黄斑裂孔临床分析. 临床眼科杂志, 2020, 28(6): 501–504.
- [17] Savastano MC, Kilian RA, Savastano A, et al. Morphological features of full-thickness macular holes using retromode scanning laser ophthalmoscopy. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*, 2022, 53(7): 368–373.
- [18] Michalewska Z, Michalewski J, Nawrocki J. Vergleich der SOCT mit Laser-Scanning-Ophthalmoskopie: Differenzierung durchgreifender Makulaforamina von lamellären und Pseudomakulaforamina. *Ophthalmologe*, 2010, 107(3): 251–255.
- [19] Konno S, Takeda M, Yanagiya N, et al. Three-dimensional analysis of macular diseases with a scanning retinal thickness analyzer and a confocal scanning laser ophthalmoscope. *Ophthalmic Surg Lasers*, 2001, 2(2): 95–99.
- [20] Povazay B, Unterhuber A, Hermann B, et al. Full-field time-encoded frequency-domain optical coherence tomography. *Opt Express*, 2006, 14(17): 7661–7669.
- [21] Fallico M, Jackson TL, Chronopoulos A, et al. Factors predicting normal visual acuity following anatomically successful macular hole surgery. *Acta Ophthalmol*, 2021, 99(3): e324–e329.
- [22] Venkatesh R, Mohan A, Sinha S, et al. Newer indices for predicting macular hole closure in idiopathic macular holes: a retrospective, comparative study. *Indian J Ophthalmol*, 2019, 67(11): 1857–1862.
- [23] 刘秀花, 王璐璇, 刘丽峰, 等. 黄斑裂孔直径测量, 光相干断层扫描首选水平扫描还是放射状扫描. 中华眼底病杂志, 2025, 41(5): 393–394.
- [24] Baumann C, Almarzooqi A, Blobner K, et al. Repeatability and reproducibility of macular hole size measurements using optical coherence tomography. *J Clin Med*, 2021, 10(13): 2899.
- [25] Liu XH, Yang Y, Gao L, et al. Macular Holes Scan With OCT, Radial or Horizontal Scan? <https://www.researchsquare.com/article/rs-1423725/v1>
- [26] Louzada RN, Ferrara D, Moult EM, et al. Full-thickness macular hole size by hypertransmission signal on spectral-domain optical coherence tomography. *Retina*, 2021, 41(10): 2059–2065.
- [27] Philippakis E, Legrand M, El Sanharawi M, et al. Measurement of full-thickness macular hole size using en face optical coherence tomography. *Eye (Lond)*, 2018, 32(3): 590–596.
- [28] Gil-Hernández I, Vidal-Oliver L, Alarcón-Correcher F, et al. Inter- and intra-observer agreement in the measurement of macular holes by optical coherence tomography. *Arch Soc Esp Oftalmol*, 2023, 98(11): 614–618.
- [29] Pereira A, Oakley JD, Sodhi SK, et al. Proof-of-concept analysis of a deep learning model to conduct automated segmentation of OCT images for macular hole volume. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*, 2022, 53(4): 208–214.
- [30] Chen YZ, Nasrullah AV, Wilson I, et al. Macular hole morphology and measurement using an automated three-dimensional image segmentation algorithm. *BMJ Open Ophthalmol*, 2020, 5(1): e000404.
- [31] Mendes OLC, Lucena DR, Lucena AR, et al. Automatic segmentation of macular holes in optical coherence tomography images. *IEEE Access*, 2021, 9: 96487–96500.
- [32] Keller B, Cunefare D, Grewal DS, et al. Length-adaptive graph search for automatic segmentation of pathological features in optical coherence tomography images. *J Biomed Opt*, 2016, 21(7): 076015.
- [33] Nasrullah AV, Willcocks CG, Jackson PTG, et al. Multi-scale segmentation and surface fitting for measuring 3-D macular holes. *IEEE Trans Med Imag*, 2018, 37(2): 580–589.
- [34] Shahalinejad S, Seifi MR. Macular hole detection using a new hybrid method: using multilevel thresholding and derivation on optical coherence tomographic images. *Comput Intell Neurosci*, 2021, 2021: 6904217.
- [35] Murphy DC, Nasrullah AV, Lendrem C, et al. Predicting postoperative vision for macular hole with automated image analysis. *Ophthalmol Retina*, 2020, 4(12): 1211–1213.