

扫频源光学相干断层扫描血管成像在眼科临床中的应用进展

王曦, 黄潇颖, 周言, 郑政

引用: 王曦, 黄潇颖, 周言, 等. 扫频源光学相干断层扫描血管成像在眼科临床中的应用进展. 国际眼科杂志, 2024, 24(2):255-259.

基金项目: 重庆医科大学未来医学青年创新团队项目 (No. W0115)

作者单位: (400010) 中国重庆市, 重庆医科大学附属第二医院眼科

作者简介: 王曦, 重庆医科大学在读硕士研究生, 住院医师, 研究方向: 眼底病。

通讯作者: 郑政, 毕业于中国人民解放军陆军军医大学, 博士, 硕士研究生导师, 副主任医师, 研究方向: 眼底病. 1635193841@qq.com

收稿日期: 2023-06-16 修回日期: 2023-12-22

摘要

扫频源光学相干断层扫描血管成像 (SS-OCTA) 检查是近几年提出的一种新型血管成像技术, 具有非侵入性、快速、高分辨率、自动化血管分层成像等优势, 在眼科相关疾病的早期诊断、疗效评估及监测疾病进展等方面具有很高的价值。基于 OCTA 的基础, SS-OCTA 采用快速调谐的激光器和 1 050 nm 的波长, 穿透力更强, 对视网膜和脉络膜微血管系统进行无创深度分辨成像, 加深了对多种眼部疾病 (眼底病变、青光眼、神经退行性疾病等) 特征的认识。此外, SS-OCTA 也可用于研究眼前节结构, 如角膜新生血管的深度和密度、虹膜新生血管治疗前后的变化等。该技术为眼科临床实践提供了一种新的手段。本文就 SS-OCTA 技术在眼科临床的应用进展进行综述。

关键词: 扫频源光学相干断层扫描血管成像; 眼底血管造影; 诊断; 应用

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2024.2.15

Application progress of swept - source optical coherence tomography angiography in ophthalmology

Wang Xi, Huang Xiaoying, Zhou Yan, Zheng Zheng

Foundation item: Future Medical Youth Innovation Team Program of Chongqing Medical University (No.W0115)

Department of Ophthalmology, the Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China

Correspondence to: Zheng Zheng. Department of Ophthalmology, the Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China. 1635193841@qq.com

Received:2023-06-16 Accepted:2023-12-22

Abstract

• Swept - source optical coherence tomography angiography (SS - OCTA) is a new vascular imaging technique that was recently proposed. It has the advantages of being non - invasive, quick, high - resolution, and automated vascular stratification imaging. It is extremely helpful in the early diagnosis of ophthalmology - related diseases, as well as in the evaluation of treatment effectiveness and the tracking of disease progression. Based on the foundation of OCTA, SS-OCTA utilizes a fast-tuning laser with a wavelength of 1 050 nm for deeper penetration and non-invasive depth-resolved imaging of the retinal and choroidal microvascular systems, deepening the understanding of the characteristics of a wide range of ophthalmic diseases (fundus lesions, glaucoma, neurodegenerative diseases, etc.). The structures of the anterior segment of the eye can also be studied using SS-OCTA, including changes in the depth and density of corneal neovascularization as well as changes in iris neovascularization before and after therapy. This approach provides a novel tool for ophthalmic clinical practice. The development of the clinical use of SS-OCTA technology in ophthalmology is reviewed in this article.

• **KEYWORDS:** swept - source optical coherence tomography angiography; fundus angiography; diagnosis; application

Citation: Wang X, Huang XY, Zhou Y, et al. Application progress of swept - source optical coherence tomography angiography in ophthalmology. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2024, 24(2): 255-259.

0 引言

Huang 等^[1]首次于 1991 年提出的光学相干断层扫描 (optical coherence tomography, OCT) 技术, 彻底改变了视网膜疾病的临床评估, 对整个眼科领域产生了重大影响。自 OCT 应用以来, 随着技术的不断改进, 已从最初低分辨率的时域 OCT 快速发展为基于傅立叶域探测的频域 OCT (spectral domain OCT, SD-OCT), 再发展为新近的同样基于傅立叶域探测的扫频源 OCT (swept-source OCT, SS-OCT)^[2], 能更好地观察玻璃体、视网膜、脉络膜及脉络膜-巩膜边界^[3]。近年来扫频源技术已扩展到 OCT 血管成像 (OCT angiography, OCTA), 具有非侵入性、扫描速度快、高分辨率成像等优点, 可迅速实现对视网膜和脉络膜微血管系统的分层成像, 现已逐步用于临床对各类眼科疾病的诊治与随访。本文就目前扫频源光学相干断层扫描血管成像 (swept-source optical coherence tomography angiography,

SS-OCTA)在眼科临床中的应用研究进展进行阐述及总结。

1 SS-OCTA 概述

1.1 SS-OCTA 的原理 OCTA 的基本原理是对同一位置进行连续的 B 扫描,由于红细胞等血液成分的不断运动,产生去相关信号,利用基于 OCT 振幅信号的分频振幅去相关血管成像(split-spectrum amplitude-decorrelation angiography, SSADA)的核心算法技术,提取血流信号,区分血管组织与静态的周围组织,通过运动对比视网膜和脉络膜血管结构并进行三维重建^[4]。SSADA 算法将全 OCT 光谱分割成不同的光谱波段,增加了可用图像帧的数量^[2]。为了增加血流检测的信噪比,SSADA 通过降低轴向的分辨率,减少眼球运动伪影的出现和影响,增加可利用的图像帧,而无需增加扫描时间^[3-4]。目前在临床中应用较多的频域光学相干断层扫描血管成像(SD-OCTA)技术,采用 840 nm 波长的宽带光源和光谱仪检测,扫描速度可达 20 000-100 000 次/秒 A 扫描。而 SS-OCTA 系统采用可调谐的激光器和更长的 1 050 nm 波长,扫描速度高达 100 000-200 000 次/秒,是 SD-OCTA 的 2 倍,图像采集时间缩短,减少了运动伪影的出现,穿透力也较 SD-OCTA 增加^[3]。

1.2 SS-OCTA 与 OCTA 及传统眼底血管造影比较 与普通的 OCTA 相比,SS-OCTA 扫描速度更快、扫描区域更广、穿透性更强,可更好地对周边视网膜和脉络膜区域的结构和血管变化进行观察。与传统的眼底血管造影比较,SS-OCTA 具有以下优势:(1)快速、非侵入性、高分辨率成像;(2)无需静脉注射造影剂、无相关不良反应产生;(3)可实现对视网膜和脉络膜多层血管的自动分割;(4)分层量化分析视网膜毛细血管无灌注区面积、新生血管等参数^[2,5]。

2 SS-OCTA 在眼科临床中的应用

2.1 眼底疾病

2.1.1 脉络膜疾病 多种疾病可引起脉络膜血管和结构的病理性改变,如年龄相关性黄斑变性(age-related macular degeneration, ARMD)、息肉状脉络膜血管病变(polypoidal choroidal vasculopathy, PCV)、中心性浆液性脉络膜视网膜病变、病理性近视等。脉络膜新生血管(choroidal neovascularization, CNV)是脉络膜疾病最常见的病理改变,其发病机制不明。CNV 常发生在黄斑区,严重损害视力,早发现、早诊断可最大程度挽救视力。Novais 等^[6]在研究中发现与 SD-OCTA 比较,SS-OCTA 能更大范围地检测出湿性 ARMD 患者 CNV 的区域;此外,SS-OCTA 使用快速调谐的激光器和 1 050 nm 的波长,成像深度增加,使视网膜色素上皮层下方的 CNV 能够更好地可视化。Bo 等^[7]发现 PCV 的息肉样病变实为新生血管缠结,而非实际的息肉样病变或动脉瘤扩张,SS-OCTA 在检测 PCV 的息肉样病变方面比吲哚菁绿血管造影(indocyanine green angiography, ICGA)更敏感,可为疾病是否处于活动期提供重要线索,但该研究的样本相对较小,需更大规模的研究进一步验证。Fujita 等^[8]观察到在 SS-OCTA 上 PCV 的息肉样病变可视化为缠结的血管结构,与 Bo 等^[7]研究结果一致;他们的研究结果还发现,在检测息肉样病变方面,SS-OCTA 与 ICGA 之间存在极好的一致性。SS-OCTA 不仅能用于脉络膜疾病的诊断,也能用于脉络膜疾病治疗效果的评估,监测疾病的进展。Stattin 等^[9]对湿性 ARMD 抗

血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)治疗后的活动征象与 CNV 形态的关系进行研究,结果显示,基于血流密度定性评估的高密度 CNV 与疾病活动性显著相关,表明 SS-OCTA 在指导湿性 ARMD 治疗方面具有潜在作用。

2.1.2 糖尿病视网膜病变 糖尿病视网膜病变(diabetic retinopathy, DR)的主要病理生理学改变有微血管瘤、毛细血管无灌注区(nonperfusion area, NPA)、视网膜内微血管异常及新生血管(neovascularization, NV)等,若未进行及时有效的治疗将会严重威胁患者视力^[10]。荧光素眼底血管造影(fundus fluorescein angiography, FFA)是临床诊断 DR 的金标准,但 FFA 需静脉注射造影剂,部分患者注射造影剂后会发生相关的不良反应,并且 FFA 无法实现视网膜和脉络膜血管分层成像、量化血管密度及病灶面积等^[11]。汪睿等^[5]研究发现 SS-OCTA 测得的增殖性 DR (proliferative DR, PDR)患眼深层毛细血管丛无灌注区面积为 $0.878 \pm 0.366 \text{ mm}^2$,而 FFA 测得的面积为 0.786 mm^2 ,证明 SS-OCTA 对视网膜进行分层成像有利于对 PDR 病灶进行更详细的观察。Yang 等^[12]通过超宽视野 SS-OCTA 检测到 DR 临床前期存在的 NPA、毛细血管扩张和弯曲以及 NV 更常发生在周边视网膜区域,表明更大的 OCTA 扫描面积可以为 DR 早期的视网膜微血管病变提供更多的证据。Xu 等^[13]利用宽视野 SS-OCTA 发现 DR 临床前期和早期的患者视网膜血管密度较正常人明显降低,尤其是在周边视网膜处下降更为明显,说明糖尿病对视网膜微血管的影响在 DR 出现之前就已存在,这与 Yang 等^[12]研究结果一致。在未来的临床工作中,SS-OCTA 可作为一种更灵敏的筛查手段,用于糖尿病患者视网膜微血管异常的早期筛查和监测,指导 DR 的诊疗、调整预后干预措施等。

2.1.3 视网膜静脉阻塞 当视网膜上的血液流出受阻时,就会发生视网膜静脉阻塞,典型的特征是黄斑水肿、视网膜静脉扩张和迂曲、视网膜深层和浅层的广泛出血、棉绒斑、视网膜水肿和 NPA 等^[14]。SS-OCTA 可量化并比较视网膜不同深度的毛细血管丛及脉络膜毛细血管(choriocapillaris, CC)密度。Kim 等^[15]通过 SS-OCTA 对 41 例单眼视网膜分支静脉阻塞(branch retinal vein occlusion, BRVO)患者进行回顾性分析,发现在黄斑中心凹周围,BRVO 患者患眼和健眼视网膜浅层和深层毛细血管丛(deep capillary plexus, DCP)密度均降低,两只眼对应位置比较,患眼受损区域的 DCP 血管密度也显著减少,缺血性损害对 DCP 的影响是浅层毛细血管丛(superficial capillary plexus, SCP)的 1.77-1.84 倍。Chen 等^[16]利用 SS-OCTA 回顾性研究了 22 例单眼 BRVO 不伴黄斑水肿患者的 CC 密度,发现 BRVO 眼和对侧眼的 CC 密度均降低,患眼未受累区域少数网格的 CC 密度高于对侧眼,推测 BRVO 发生后视网膜循环发生了重建,脉络膜循环也随着视网膜循环的改变而重新分布。Kakihara 等^[17]使用 SS-OCTA 结合扩展视野成像(extended field imaging, EFI)技术,平均扫描面积增加 76.4%,清晰地显示出更大面积的视网膜血管图像,能更好地观察视网膜静脉阻塞(retinal vein occlusion, RVO)患者患眼视网膜缺血的程度;他们的研究结果表明,与 FFA 相比,因较大血管的渗漏会掩盖 FFA 中的毛细血管无灌注区,EFI-SS-OCTA 能够无创地对 RVO 患者视网膜毛细血管 NPA 进行准确地定性

和定量评估。但对于 EFI-SS-OCTA 是否可以替代 FFA, 需要在更大的队列中进行进一步的前瞻性研究。

2.1.4 高度近视 近视是一种常见的眼部疾病, 主要发生在儿童和成年早期, 大多数与眼轴增长过快有关^[18]。高度近视 (high myopia, HM) 常伴随着潜在的眼底病理性改变, 如视网膜脱离、视网膜劈裂、视网膜下新生血管、后巩膜葡萄肿等, 严重影响视力^[19]。SS-OCTA 可有效测量和评估近视患者视网膜及脉络膜参数的变化, 帮助眼科医生更清楚地了解该疾病的病理生理机制, 探索新的治疗方案和预防措施。Liu 等^[20] 通过 SS-OCTA 对 98 例非病理性近视患者的脉络膜血管和基质特征进行了评估, 观察到 HM 患者的三维脉络膜血管指数 (choroidal vessel index, CVI)、脉络膜血管体积 (choroidal vessel volume, CVV) 和脉络膜基质体积均显著下降, 在中心凹下和黄斑区域的脉络膜变薄, 鼻侧象限的脉络膜最薄。Luo 等^[21] 利用 SS-OCTA 研究发现, 相较于中低度近视患者, HM 患者的三维 CVI、CVV 及脉络膜厚度 (choroidal thickness, ChT) 均明显下降, 说明随着近视程度的增加, 脉络膜逐渐变薄, 脉络膜的中、大血管逐渐受损, 且脉络膜血管成分的丧失可能比基质的丧失更严重。此外, 在黄斑鼻侧象限、视盘颞侧和下侧象限的三维 CVI、CVV 及 ChT 值较其他象限降低, 作者认为黄斑乳头束是近视发展的敏感区域, 通过监测上述象限脉络膜参数的变化有助于分析 HM 的潜在病理生理学特征。Su 等^[22] 的研究结果表明, 脉络膜血管随着近视度数的增加而逐渐减少, 且脉络膜血流灌注的减少与近视的严重程度及脉络膜变薄有关。而 Xu 等^[23] 使用 SS-OCTA 对近视患者视网膜和脉络膜血管特征进行研究, 发现 HM 患者 SCP 的血管密度、SCP 及 DCP 的血管长度密度均降低, CC 血流缺失的严重程度显著增加, 但与 ChT 无关。出现这种差异的原因可能与使用不同的 OCTA 算法有关, 也可能是研究数据处理的方法不同。总之, SS-OCTA 可更好地观察到 HM 患者的视网膜及脉络膜血流灌注变化, 为 HM 的发生发展机制提供新的研究方向。

2.1.5 眼内肿瘤 眼内肿瘤是一种严重的致盲性疾病, 可以损害患者的视力, 甚至危及患者生命^[24]。眼部超声检查是检测眼内肿瘤的重要辅助手段, 但其对较小的病灶评估时分辨率有限, 近年来, OCTA 技术发展迅速, 目前 SS-OCTA 可用于研究活体组织上脉络膜和视网膜肿瘤相关的异常血管^[25]。Reich 等^[26] 使用 SD-OCTA 和 SS-OCTA 对 Von Hippel-Lindau 病患者视网膜血管母细胞瘤 (retinal capillary hemangioblastomas, RCHs) 进行检测和测量, 研究结果显示两种成像技术均可有效检测出 RCHs, 两者在测量小的 RCHs 时肿瘤大小无差异, 然而, 随着肿瘤大小的增加, 深层血管的阴影也随之增加, 因 SS-OCTA 穿透力更强, 减少了阴影伪影, 检测到的肿瘤也更大, 因此 SS-OCTA 可作为 RCHs 诊断和监测的工具。Pellegrini 等^[27] 研究发现, SS-OCTA 可对脉络膜黑色素瘤 (choroidal melanoma, CM) 患者内部的微血管结构进行无创性评估, 且不受 CM 的大小、位置和既往治疗史影响, 表明 SS-OCTA 是评估 CM 有效的成像技术。Zhou 等^[28] 在 26 例脉络膜骨瘤 (choroidal osteoma, CO) 患者中使用 SS-OCTA 发现, 肿瘤相关血管的形态学特征表现为具有内部或末端血管缠结的海扇样血管网, 而不是先前描述的 CNV, 这可能有助于了解其发病机制; 同时本研究还发现 SS-OCTA 对肿瘤相关血管的检测优于 ICGA, SS-OCTA 可

能被认为是诊断和监测 CO 的新标准。

2.2 青光眼 青光眼是一种慢性进行性视神经病变, 其特点为视盘和视网膜神经纤维层 (retinal nerve fiber layer, RNFL) 形态学改变、视野特征性缺损缩小, 是全球首位不可逆性致盲眼病, 原发性开角型青光眼 (primary open angle glaucoma, POAG) 是最为常见青光眼类型^[29-30]。Jia 等^[31] 利用 SS-OCTA 比较了正常人和早期青光眼患者视盘血流灌注的差异, 发现前者视盘及视盘周围有密集的微血管网络, 而后的血流灌注明显减少、视盘血流指数降低, 并与视野模式标准偏差呈正相关, 提示视盘血流减少与青光眼的严重程度有关。Suh 等^[32] 对 POAG 患者 195 眼视盘区微血管缺失 (optic disc microvasculature dropout, MvD-D) 进行检测, SS-OCTA 检出率为 83.6%, 且 MvD-D 组较无 MvD-D 组视野平均缺损值更大, 视网膜神经纤维层厚度变薄、局限性筛板缺损及视盘旁深层微血管缺失发生率增加, 证实了 SS-OCTA 在检测视盘微血管损伤方面非常有前景。Li 等^[33] 研究了 SS-OCTA 在检测青光眼进展中的价值, 该团队利用 SS-OCTA 测量了中央凹无血管区 (foveal avascular zone, FAZ) 面积及视盘周围毛细血管密度, 发现视野缺损进展与年龄及平均偏差值有关, FAZ 面积扩大与 RNFL 及神经节细胞-内丛状层变薄呈正相关, 但与青光眼功能恶化无关, 证明 SS-OCTA 可用于监测该疾病的进展。

2.3 神经退行性疾病 在胚胎发育期间, 视网膜和视神经起源于发育中的大脑, 特别是胚胎间脑, 因此被认为是中枢神经系统的一部分。视网膜与大脑的微血管系统具有相似的特征, 因而视网膜可以作为检测神经退行性疾病发生微血管损伤的“窗口”。在许多神经退行性疾病中, 眼部症状往往先于大脑症状出现, 这表明眼科检查可以提供一种早期诊断的手段^[34-35]。Zhang 等^[36] 应用 SS-OCTA 对早期帕金森病 (Parkinson disease, PD) 患者的视网膜浅层、深层血流密度及视网膜神经纤维层、神经节细胞-内丛状层、内核层厚度进行研究, 发现早期 PD 组视网膜浅层和深层血流密度均下降, 且与视网膜层厚度变薄相关, 说明 SS-OCTA 测得的视网膜参数可作为 PD 诊断和分期的影像学生物标志物。Zhang 等^[37] 在另一项研究中使用 SS-OCTA 评估了脉络膜微血管状态在早期 PD 患者中的变化, 发现早期 PD 患者 CC 密度、CVV 和 CVI 明显降低, 推测脉络膜低灌注可能是脉络膜血容量减少的原因, 提示脉络膜血管参数的变化可能有助于解释 PD 对视网膜的病理生理影响; 该研究还发现视网膜外层厚度 (outer retinal thickness, ORT) 与对比敏感度之间呈正相关。Kwapong 等^[38] 分析了脑白质病变 (white matter lesions, WMLs) 患者 SS-OCTA 上视网膜厚度及脉络膜的变化情况, 研究结果表明, WMLs 患者的 CC 灌注明显减少, 并与 ORT 之间存在显著的相关性; 用 SS-OCTA 来评估 WMLs 患者视网膜和脉络膜的变化, 可能被证明是早期检测认知衰退和其他神经退行性疾病的潜在有价值的工具。

2.4 眼前节疾病 前节 OCTA 不仅可以用于研究正常眼的结膜、角膜、虹膜和巩膜血管, 也可以用于诊断和监测眼前节血管的病理状况。近年来, 随着 OCTA 技术的不断发展, 图像捕获速度和分辨率得到提高, 前节 OCTA 在临床应用中的作用越来越大^[39]。Akagi 等^[40] 采集了 10 例正常人 10 眼角膜缘周围结膜和巩膜血管的前节 SS-OCTA 图像, 浅层 (结膜上皮-200 μm) 血管形态显示为自角膜缘向

周边离心性延伸,深层(200-1 000 μm)血管形态为不同于浅层的节段性血流模式;此外,SS-OCTA全信号血流图像与巩膜FA图像相似,深层SS-OCTA血流图像具有与房水ICGA图像相似的特征,后者可能反映了房水流出通路的组成部分。Ang等^[41]研究发现,SS-OCTA在评估配戴角膜接触镜继发角膜炎NV患者图像质量方面具有较高的可重复性,并能区分角膜深、浅血管的形成,表明SS-OCTA可用于检查角膜NV,并可能在检测早期角膜缘干细胞损伤发挥一定的作用。Nanji等^[42]使用SD-OCTA和SS-OCTA对不同严重程度、分布、病因的角膜NV进行血管密度和深度测量,与裂隙灯摄影(slit lamp photography, SLP)估计的NV深度进行比较,发现两种OCTA与SLP估计的血管深度具有极好的一致性,虽然SD-OCTA测量的血管密度是SS-OCTA的1.6倍,但在1例有明显角膜瘢痕的深部NV患者,SS-OCTA测量到的血管密度是SD-OCTA的3倍,说明SS-OCTA具有更好的穿透性,其在诊断和监测角膜NV治疗方面具有潜在的临床应用价值。Shiozaki等^[43]应用前节SS-OCTA观察抗VEGF治疗后虹膜新生血管(iris neovascularization, INV)的变化,结果显示抗VEGF治疗后INV全部消退,INV眼的血管密度明显降低,证明前节SS-OCTA可识别虹膜灌注变化以达到预测虹膜血管疾病发展的目的。

3 总结及展望

SS-OCTA作为一种新型的无创血管成像技术,极大地增加了我们对视网膜及脉络膜微血管系统的理解,其与传统的眼底血管造影相比,具有无创、无需造影剂、扫描速度快、自动化血管分层成像、高分辨率、量化分析血管参数等优势;为眼科临床相关疾病的早期诊断、治疗和随访疾病提供了一种新的手段,弥补了FFA不能很好地观察到视网膜深层毛细血管显影情况这一缺陷;同时,得益于算法的不断改进,血流检测的信噪比提高,我们对眼底疾病的发病机制、病程演变、治疗等认识也随之加深。但SS-OCTA也有一定的局限性,主要表现为以下几个方面:(1)SS-OCTA检查对患者屈光介质状态及固视要求较高,部分屈光介质混浊明显或固视差的患者,会出现图像伪影;(2)穿透深度有限,SS-OCTA对脉络膜深层血管流动信号的检测局限于视网膜色素上皮层萎缩的区域^[44-45];(3)SS-OCTA无造影剂循环和渗漏,对视网膜血管屏障功能的观察能力较传统血管造影检查降低;(4)无法对激光斑和无灌注区做出区分。

综上所述,SS-OCTA有助于增加我们对多种视网膜及脉络膜疾病特征的理解,包括CNV、DR、RVO及神经退行性疾病等,有着广阔的临床应用前景。此外,SS-OCTA还可精准定量评估中心性浆液性脉络膜视网膜病变、病理性近视、Vogt-小柳原田病等眼部疾病脉络膜的厚度和血管变化,但该技术于缺血性视神经病变中应用较少,期望在以后的发展中有更多深入的研究。相信在未来随着技术不断的开发和完善,SS-OCTA可广泛应用于临床,这一新的血管成像技术将在眼科临床实践中发挥更为重要的作用。

参考文献

[1] Huang D, Swanson EA, Lin CP, et al. Optical coherence tomography. *Science*, 1991,254(5035):1178-1181.
[2] Sambhav K, Grover S, Chalam KV. The application of optical coherence tomography angiography in retinal diseases. *Surv Ophthalmol*,

2017,62(6):838-866.

[3] Laíns I, Wang JC, Cui Y, et al. Retinal applications of swept source optical coherence tomography (OCT) and optical coherence tomography angiography (OCTA). *Prog Retin Eye Res*, 2021, 84:100951.
[4] Jia YL, Tan O, Tokayer J, et al. Split-spectrum amplitude-decorrelation angiography with optical coherence tomography. *Opt Express*, 2012,20(4):4710-4725.
[5] 汪睿, 金学民, 安广琪, 等. 增生型糖尿病视网膜病变患视网膜毛细血管无灌注区面积的定量分析. *中华眼底病杂志*, 2021,37(2):104-108.
[6] Novais EA, Adhi M, Moulton EM, et al. Choroidal neovascularization analyzed on ultrahigh-speed swept-source optical coherence tomography angiography compared to spectral-domain optical coherence tomography angiography. *Am J Ophthalmol*, 2016,164:80-88.
[7] Bo QY, Yan Q, Shen MX, et al. Appearance of polypoidal lesions in patients with polypoidal choroidal vasculopathy using swept-source optical coherence tomographic angiography. *JAMA Ophthalmol*, 2019, 137(6):642-650.
[8] Fujita A, Kataoka K, Takeuchi J, et al. Diagnostic characteristics of polypoidal choroidal vasculopathy based on b-scan swept-source optical coherence tomography angiography and its interrater agreement compared with indocyanine green angiography. *Retina*, 2020,40(12):2296-2303.
[9] Stattin M, Forster J, Daniel A, et al. Relationship between neovascular density in swept source-optical coherence tomography angiography and signs of activity in exudative age-related macular degeneration. *J Ophthalmol*, 2019,2019:4806061.
[10] 中华医学会眼科学分会眼底病学组, 中国医师协会眼科医师分会眼底病学组, 许迅, 等. 我国糖尿病视网膜病变临床诊疗指南(2022年)——基于循证医学修订. *中华眼底病杂志*, 2023(2):99-124.
[11] Spaide RF, Klancnik JM Jr, Cooney MJ. Retinal vascular layers imaged by fluorescein angiography and optical coherence tomography angiography. *JAMA Ophthalmol*, 2015,133(1):45.
[12] Yang JY, Zhang BL, Wang EQ, et al. Ultra-widefield swept-source optical coherence tomography angiography in patients with diabetes without clinically detectable retinopathy. *BMC Ophthalmol*, 2021, 21(1):192.
[13] Xu FB, Li ZW, Gao Y, et al. Retinal microvascular signs in pre- and early-stage diabetic retinopathy detected using wide-field swept-source optical coherence tomographic angiography. *J Clin Med*, 2022,11(15):4332.
[14] Nicholson L, Talks SJ, Amoaku W, et al. Retinal vein occlusion (RVO) guideline: executive summary. *Eye*, 2022,36(5):909-912.
[15] Kim JT, Chun YS, Lee JK, et al. Comparison of vessel density reduction in the deep and superficial capillary plexuses in branch retinal vein occlusion. *Ophthalmologica*, 2020,243(1):66-74.
[16] Chen LL, Yuan MZ, Sun L, et al. Three-dimensional analysis of choroidal vessels in the eyes of patients with unilateral BRVO. *Front Med*, 2022,9:854184.
[17] Kakhara S, Hirano T, Iesato Y, et al. Extended field imaging using swept-source optical coherence tomography angiography in retinal vein occlusion. *Jpn J Ophthalmol*, 2018,62(3):274-279.
[18] Baird PN, Saw SM, Lanca C, et al. Myopia. *Nat Rev Dis Primers*, 2020,6(1):99.
[19] Li HR, Wang QX, Liu YC, et al. Investigation of macular structural and microcirculatory characteristics of posterior staphyloma in high myopia eyes by swept source optical coherence tomography angiography. *Front Physiol*, 2022,13:856507.
[20] Liu L, Zhu CC, Yuan Y, et al. Three-dimensional choroidal vascularity index in high myopia using swept-source optical coherence tomography. *Curr Eye Res*, 2022,47(3):484-492.

- [21] Luo H, Sun JF, Chen L, et al. Compartmental analysis of three-dimensional choroidal vascularity and thickness of myopic eyes in young adults using SS-OCTA. *Front Physiol*, 2022,13:916323.
- [22] Su L, Ji YS, Tong NT, et al. Quantitative assessment of the retinal microvasculature and choriocapillaris in myopic patients using swept-source optical coherence tomography angiography. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2020,258(6):1173-1180.
- [23] Xu AM, Sun GP, Duan CY, et al. Quantitative assessment of three-dimensional choroidal vascularity and choriocapillaris flow signal voids in myopic patients using SS - OCTA. *Diagnostics*, 2021, 11(11):1948.
- [24] 魏文斌, 周楠. 眼内肿瘤的诊断思维. *中华实验眼科杂志*, 2018,36(10):737-741.
- [25] Gündüz AK, Mirzayev I, Kasimoglu R, et al. Swept-source optical coherence tomography angiography findings in choroidal and retinal tumors. *Eye*, 2021,35(1):4-16.
- [26] Reich M, Glatz A, Boehringer D, et al. Comparison of current optical coherence tomography angiography methods in imaging retinal hemangioblastomas. *Transl Vis Sci Technol*, 2020,9(8):12.
- [27] Pellegrini M, Corvi F, Invernizzi A, et al. Swept-source optical coherence tomography angiography in choroidal melanoma: an analysis of 22 consecutive cases. *Retina*, 2019,39(8):1510-1519.
- [28] Zhou N, Xu XL, Liu YM, et al. Appearance of tumor vessels in patients with choroidal osteoma using swept-source optical coherence tomographic angiography. *Front Oncol*, 2021,11:762394.
- [29] 中华医学会眼科学分会青光眼学组, 中国医师协会眼科医师分会青光眼学组. 中国青光眼指南(2020年). *中华眼科杂志*, 2020, 56(8):573-586.
- [30] Preventive Services Task Force US, Mangione CM, Barry MJ, et al. Screening for primary open-angle glaucoma: us preventive services task force recommendation statement. *JAMA*, 2022, 327(20):1992-1997.
- [31] Jia YL, Wei E, Wang XG, et al. Optical coherence tomography angiography of optic disc perfusion in glaucoma. *Ophthalmology*, 2014, 121(7):1322-1332.
- [32] Suh MH, Jung DH, Weinreb RN, et al. Optic disc microvasculature dropout in glaucoma detected by swept-source optical coherence tomography angiography. *Am J Ophthalmol*, 2022, 236:261-270.
- [33] Li F, Lin FB, Gao K, et al. Association of foveal avascular zone area with structural and functional progression in glaucoma patients. *Br J Ophthalmol*, 2022,106(9):1245-1251.
- [34] London A, Benhar I, Schwartz M. The retina as a window to the brain—from eye research to CNS disorders. *Nat Rev Neurol*, 2013,9(1):44-53.
- [35] Pellegrini M, Vagge A, Ferro Desideri LF, et al. Optical coherence tomography angiography in neurodegenerative disorders. *J Clin Med*, 2020,9(6):1706.
- [36] Zhang YF, Zhang D, Gao YZ, et al. Retinal flow density changes in early-stage Parkinson's disease investigated by swept-source optical coherence tomography angiography. *Curr Eye Res*, 2021, 46(12):1886-1891.
- [37] Zhang YF, Yang L, Gao YZ, et al. Choroid and choriocapillaris changes in early-stage Parkinson's disease: a swept-source optical coherence tomography angiography-based cross-sectional study. *Alzheimers Res Ther*, 2022,14(1):116.
- [38] Kwapong WR, Gao YZ, Yan YY, et al. Assessment of the outer retina and choroid in white matter lesions participants using swept-source optical coherence tomography. *Brain Behav*, 2021,11(8):e2240.
- [39] Lee WD, Devarajan K, Chua J, et al. Optical coherence tomography angiography for the anterior segment. *Eye Vis*, 2019,6:4.
- [40] Akagi T, Uji A, Huang AS, et al. Conjunctival and intrascleral vasculatures assessed using anterior segment optical coherence tomography angiography in normal eyes. *Am J Ophthalmol*, 2018,196:1-9.
- [41] Ang M, Cai YJ, Tan ACS. Swept source optical coherence tomography angiography for contact lens-related corneal vascularization. *J Ophthalmol*, 2016,2016:9685297.
- [42] Nanji A, Redd T, Chamberlain W, et al. Application of corneal optical coherence tomography angiography for assessment of vessel depth in corneal neovascularization. *Cornea*, 2020,39(5):598-604.
- [43] Shiozaki D, Sakimoto S, Shiraki A, et al. Observation of treated iris neovascularization by swept-source-based en-face anterior-segment optical coherence tomography angiography. *Sci Rep*, 2019,9(1):10262.
- [44] Cui Y, Zhu Y, Wang JC, et al. Imaging artifacts and segmentation errors with wide-field swept-source optical coherence tomography angiography in diabetic retinopathy. *Transl Vis Sci Technol*, 2019, 8(6):18.
- [45] Diaz JD, Wang JC, Oellers P, et al. Imaging the deep choroidal vasculature using spectral domain and swept source optical coherence tomography angiography. *J Vitreoretin Dis*, 2018,2(3):146-154.