

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230552

· 综述 ·

## 血管内光学相干断层成像在脑血管疾病介入诊疗中的应用进展

许燕<sup>1,2</sup>, 李子付<sup>2</sup>, 赵瑞<sup>2\*</sup>

1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093

2. 海军军医大学(第二军医大学)第一附属医院脑血管病中心, 上海 200433

**[摘要]** 光学相干断层成像(OCT)是一种基于红外线进行组织成像的技术,可实现高达10~20 μm的分辨率,已被广泛应用于冠状动脉病变诊疗,在脑血管疾病的诊疗中也日益受到重视。OCT在颈动脉狭窄、颅内动脉狭窄及夹层、脑动脉瘤和脑静脉疾病介入诊疗中的应用已经取得了一些进展,但目前尚缺乏大样本数据的循证支持。由于脑血管具有独特的解剖特点,需要寻求更为合适的器械设计。通过不断的器械改进和技术进步,OCT有望成为脑血管疾病预防、诊断和治疗的重要影像功能检测工具。

**[关键词]** 光学相干断层成像; 脑血管疾病; 介入治疗; 应用

**[引用本文]** 许燕, 李子付, 赵瑞. 血管内光学相干断层成像在脑血管疾病介入诊疗中的应用进展[J]. 海军军医大学学报, 2024, 45(4): 500-506. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230552.

### Application of intravascular optical coherence tomography in interventional diagnosis and treatment of cerebrovascular diseases: recent progress

XU Yan<sup>1,2</sup>, LI Zifu<sup>2</sup>, ZHAO Rui<sup>2\*</sup>

1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

2. Neurovascular Center, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

**[Abstract]** Optical coherence tomography (OCT) is a tissue imaging based on infrared ray, and it can achieve a resolution up to 10-20 μm. It has been widely used in the diagnosis and treatment of coronary artery diseases, and its applications in the diagnosis and treatment of cerebrovascular diseases have also been increasingly valued. The applications of OCT in interventional diagnosis and treatment of carotid artery stenosis, intracranial artery stenosis and dissection, cerebral aneurysms and cerebral venous diseases have made some progress, but there is still a lack of robust large-sample evidence. Due to the unique anatomical features of cerebral vessels, there is a need for more suitable instrument designs. With the continuous improvement in instrument designs and techniques, OCT is expected to become a crucial imaging tool for the prevention, diagnosis, and treatment of cerebrovascular diseases.

**[Key words]** optical coherence tomography; cerebrovascular diseases; interventional therapy; application

**[Citation]** XU Y, LI Z, ZHAO R. Application of intravascular optical coherence tomography in interventional diagnosis and treatment of cerebrovascular diseases: recent progress[J]. Acad J Naval Med Univ, 2024, 45(4): 500-506. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230552.

光学相干断层成像(optical coherence tomography, OCT)是20世纪90年代初诞生的一种新型生物医学成像技术,具备无辐射、空间分辨率高、三维实时成像等优点,能够实现微米量级的一维深度、二维截面和三维形貌的非接触式测量与成像,从而清晰地显示生物组织的结构特征和病理变化<sup>[1]</sup>。OCT最初主要用于眼内血管无创性检查,

后被引入血管内成像领域,广泛应用于冠状动脉病变诊疗,帮助临床医师定性定量评估血管病变、指导支架植入、评估术后治疗效果。目前OCT在脑血管疾病评估和干预中已逐步开展应用,但相关研究有限。本文旨在总结OCT在颈动脉狭窄、颅内动脉狭窄及夹层、脑动脉瘤和脑静脉疾病介入诊疗中的应用现状及研究进展,深入了解OCT在脑血

[收稿日期] 2023-10-07 [接受日期] 2024-01-18

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFC2412804)。Supported by National Key Research and Development Program of China (2023YFC2412804).

[作者简介] 许燕, 硕士生. E-mail: xuyan1230228@163.com

\*通信作者( Corresponding author ). Tel: 021-31161784, E-mail: z\_ray1979@126.com

管疾病中的应用价值,并探讨其目前的局限性和未来的技术发展方向。

### 1 OCT 的成像原理及优势

OCT 利用光学干涉的原理和光学反射的特性,将光源所发出的光束分为 2 束,一束经过待成像物体表面反射后再次回到探测器,另一束则直接进入探测器,这 2 束光在探测器处会产生干涉,通过干涉仪接收并记录不同深度生物组织成分的反射光,再经计算机系统处理得到生物高清组织断层图像。由于红外线遇到血液会产生衰减,OCT 操作中最重要的就是注入造影剂使管腔的血液完全清除。对于肾功能不全者应谨慎使用造影剂,有研究显示在远端血管或血流状况受损的血管中使用生理盐水或右旋糖酐可以获得高质量的 OCT 图像<sup>[2]</sup>,此方法可以减少或避免使用造影剂。目前在常规的临床颈动脉成像工作流程中,OCT 造影剂的注射方案与血管造影使用的方案一致,可以同时获取血管造影和 OCT 图像,从而降低造影剂负荷。

血管超声、高分辨率磁共振成像 (high-resolution magnetic resonance imaging, HR-MRI) 和计算机断层扫描血管成像 (computed tomography angiography, CTA) 是脑血管疾病诊断和评估中常用的非侵入性影像学检查方法,可以相对准确地评估血管壁、高危斑块的形态学特征和脆弱性,但是血管超声操作者之间一致性低且信噪比较差,CTA 在区分斑块内脂质、纤维化组织成分方面准确性有

限且有辐射,HR-MRI 成像时间较长且患有幽闭恐惧症和携带金属装置(如起搏器、除颤器和某些动脉瘤夹)的患者必须被排除在检测之外,相比之下,OCT 采集图像更迅速、分辨率更高、对斑块性质评估更全面、精确,无辐射,且遇到金属物质时没有干扰效应<sup>[3]</sup>。

数字减影血管造影 (digital subtraction angiography, DSA) 是介入治疗中辅助医师手术决策最常用的影像学方法,然而 DSA 有许多局限性。DSA 显示造影剂填充血管腔的二维平面投影,随着 X 线的投射角度变化可能错估病变的严重程度,同时缺乏关于斑块形态、血管重塑或动脉粥样硬化斑块负荷的信息,在识别支架膨胀不足、血栓、组织脱垂等方面也欠佳<sup>[4]</sup>。OCT 因可达 10~20 μm 的高分辨率,对组织结构的检测结果与病理切片检查结果高度一致,在医学界被称为“光学活检”,可以获取 DSA 观察不到的部分血管病变信息<sup>[5]</sup>。

血管内超声 (intravascular ultrasound, IVUS) 是基于声学原理的血管内成像技术,通过心导管将微型化的超声换能器置入血管腔内以显示心血管断面的形态和/或血流图形,穿透性较强但分辨率有限。OCT 识别血管病变特征的灵敏度优于 IVUS (表 1)<sup>[6-7]</sup>,在评估支架植入术后即刻效果(支架贴壁不良、组织脱垂、支架内血栓)和术后随访情况(支架内皮覆盖、微通道、支架内再狭窄)方面 OCT 也具有一定优势<sup>[8]</sup>。

表 1 OCT 和 IVUS 识别血管病变特征的灵敏度对比<sup>[6-7]</sup>

方法	纤维帽	脂质	钙化	血栓	新生血管	溃疡	巨噬细胞浸润	斑块破裂	夹层
IVUS	不适用	80%~90%	80%~90%	50%~80%	不适用	80%~90%	不适用	50%~80%	50%~80%
OCT	>90%	>90%	>90%	>90%	>90%	>90%	>90%	>90%	>90%

OCT:光学相干断层成像;IVUS:血管内超声。

### 2 OCT 在冠状动脉病变诊疗中的应用

OCT 在冠状动脉病变中的应用较为广泛,可以全程精准指导经皮冠状动脉介入 (percutaneous coronary intervention, PCI) 治疗。在支架植入前对病变的主要成分进行定性定量分析,尤其对不稳定斑块及血栓具有独特的诊断优势;支架植入过程中可以根据病变特征选择合适的预处理措施,指导支架尺寸选择和植入策略优化;支架植入术后评估支架植入效果,减少支架相关并发症。越来

越多的临床研究证据(包括但不限于 DOCTORS、OCTACS、ILUMIEN 系列、Pan-London 等)表明,OCT 指导 PCI 的效果明显优于冠状动脉造影<sup>[9-11]</sup>。LightLab Initiative 研究结果显示相较于单纯冠状动脉造影指导 PCI,应用 OCT 后可以优化 86% 的治疗决策<sup>[12]</sup>。Pan-London 研究结果显示相较于冠状动脉造影,OCT 可以降低约 50% 的 PCI 术后近远期心脏主要不良事件的发生率,改善患者临床预后<sup>[13]</sup>。目前已有中国、美国、日本、韩国及欧洲等国家/地区颁布了相关临床指南支持和规范 OCT

的临床应用<sup>[14-17]</sup>,这对OCT在脑血管疾病中的应用有一定参考意义。

### 3 OCT在脑血管疾病诊疗中的应用进展

OCT在脑血管疾病评估和介入干预中的应用已有少量报道。早期,研究者通过体外标本和动物模型验证了OCT评估颈动脉的可行性<sup>[18-19]</sup>。2011年,Mathews等<sup>[20]</sup>首次报道采用实验室组装的时域OCT对颈动脉狭窄患者颈内动脉海绵窦段和岩段进行了OCT扫描,虽然仅纳入了少量病例,但证实了对颅内动脉进行OCT检查是可行的。以下对OCT在不同脑血管疾病中的应用分别进行介绍。

**3.1 颈动脉狭窄** 颈动脉狭窄多由颈动脉粥样硬化斑块引起,是导致缺血性脑血管病的重要原因之一。OCT可以检测组织表面的异常,判别斑块的类型,精准识别斑块特征(表2)<sup>[21]</sup>。OCT在颈动脉支架植入术(carotid artery stenting, CAS)中的应用具有可行性且有一定指导意义,多项小型观察性研究报告了一些典型病例,如Jones等<sup>[22]</sup>采用OCT对4例无创检查和/或血管造影数据不明确的无症状性颈动脉疾病患者进行风险评估并制定治疗策略,所有患者均顺利完成了手术,其中1例患者经OCT检测发现颈动脉管腔内有大面积的血栓后将治疗方案从原计划的CAS转为颈动脉内膜剥脱术。OCT能够发现症状性和无症状性颈动脉狭窄患者的斑块特征差异, Jones等<sup>[23]</sup>认为薄纤维帽粥样硬化斑块破裂和腔内血栓的存在是症状性颈动脉狭窄的独立预测因素。对于易损斑块的高质量识别将有助于评估卒中风险,有研究者使用OCT观测破裂斑块的形态学特征,结果提示在破裂斑块中更易发现新生血管,且斑块破裂多发于斑块“肩部”(颈动脉斑块纤维帽与正常动脉内膜交界部位)和颈动脉分叉部位<sup>[7]</sup>。OCT还能够观察斑块中钙化的形状和位置,从而评估斑块易损性, Shi等<sup>[24]</sup>发现浅表钙化和圆形钙化与斑块破裂相关。另一项研究对66例颈动脉粥样硬化患者进行了OCT检测,发现破裂斑块的最小纤维帽厚度明显小于未破裂斑块,薄纤维帽粥样硬化斑块、富脂斑块在破裂斑块中更常见,严重狭窄( $\geq 50\%$ )病变更多见富脂斑块和较薄的纤维帽,巨噬细胞浸润、钙化沉积、胆固醇晶体是易损斑块的主要组成部分<sup>[25]</sup>。

表2 纤维斑块、脂质斑块、钙化斑块的OCT表现<sup>[21]</sup>

斑块成分	像素	质地	穿透性	外观
纤维斑块	亮像素	质地均匀	高穿透性	同质性
脂质斑块	暗像素	模糊边缘	低穿透性	同质性
钙化斑块	暗像素	清晰边缘	高穿透性	异质性

OCT:光学相干断层成像。

OCT在支架植入后可以精准评估支架膨胀及贴壁情况,减少因支架贴壁不良带来的支架血栓风险及因支架膨胀不良带来的支架内再狭窄风险,还可以精准识别支架植入后的组织脱垂,为是否需要球囊后扩张或再植入一枚支架提供充足依据。开环支架由于支架的顺应性和适应性较好而成为CAS术中首选,然而当OCT发现严重的钙化、大突出斑块或血栓时,宜选择径向强度较大、编织更紧密的闭环支架。Harada等<sup>[26]</sup>使用OCT检测发现在CAS中使用闭环支架治疗不稳定斑块后出现大面积的组织脱垂,采用球囊后扩张或放置重叠支架处理后,经OCT检测发现厚度 $\geq 500\ \mu\text{m}$ 的组织脱垂和支架贴壁不良明显减少。Jones等<sup>[22]</sup>基于OCT检测结果在1例患者目标病变处放置第2枚闭环支架来解决大面积组织脱垂的问题。Dohad等<sup>[27]</sup>对接受OCT引导下CAS治疗的40例患者资料进行总结分析,认为当OCT发现斑块突出、血栓或支架贴壁不良时,可通过球囊后扩张或放置重叠支架来优化CAS,在支架植入后若出现持续性血栓则需要加强抗血小板和抗凝治疗。Umamoto等<sup>[28]</sup>使用OCT评估颈动脉植入新一代网状支架后的支架贴壁不良和斑块脱垂情况,结果发现软斑块和易损斑块更易从网孔中突出,网状(闭环)支架可以减少斑块的突出。Pasarikovski等<sup>[4]</sup>认为斑块脱垂、血栓、支架贴壁不良是CAS围手术期卒中风险增加的危险因素,临床医师可根据OCT检测结果重新评估CAS围手术期抗凝的作用。

OCT还可以对CAS的治疗效果进行评估。Liu等<sup>[29]</sup>报告了1例CAS后经OCT观测到重度支架内再狭窄伴纤维化新生内膜生长的患者,在接受了球囊血管成形术和二次CAS后,OCT显示支架贴壁良好,但支架的支柱间可见组织突出。Matsumoto等<sup>[30]</sup>报告了1例CAS后10年再狭窄的患者,OCT可以清楚显示内膜增生厚度和斑块性质。

**3.2 颅内动脉狭窄** OCT能够精准评估颅内的狭窄动脉管壁,帮助检测颅内动脉粥样硬化性狭窄(intracranial atherosclerotic stenosis, ICAS)中

的斑块形态和组成。颅内血管的OCT检测效果大多来自动物模型和尸检。Ughi等<sup>[31]</sup>通过OCT对ICAS患者尸体的颅内动脉病变进行检测,可以观察到粥样硬化斑块的纤维化、纤维钙化和坏死核心。颅内OCT在人体内多应用在迂曲程度不高的后循环中,多项病例报告显示了OCT可以在椎动脉斑块中观察到新生血管的形成<sup>[32-33]</sup>。Xu等<sup>[34]</sup>报告的病例确定了椎基底动脉狭窄的形态学特征,如纤维斑块、腔内血栓、混合斑块、血管夹层、薄纤维帽、巨噬细胞浸润、富脂斑块伴斑块破裂、各种钙化,这些病变特征可能与后循环脑梗死的发生或复发密切相关。Yang等<sup>[35]</sup>采用标准的非阻断技术(non-occlusive technique)对ICAS患者进行OCT检查,首次证明了在颅内前循环获得高质量OCT图像是可行且安全的。

**3.3 颅内动脉夹层** 头颈动脉夹层是中青年缺血性脑卒中的重要病因之一,其鉴别诊断存在一定的挑战性<sup>[36]</sup>。严重的边缘夹层可导致急性血栓形成,Gao等<sup>[37]</sup>报告了1例自发性颅内动脉夹层引起的急性缺血性脑卒中病例,血管造影显示基底动脉狭窄相关的血栓形成但不能确认颅内动脉夹层,患者接受机械取栓术后在18个月随访期间未出现症状,而在发生支架内再狭窄后使用OCT辅助DSA发现颅内动脉夹层并观察到壁内血肿、内膜瓣和双腔征,同时在支架的近端观察到内膜破裂,这在DSA上是不可见的。OCT的结果不仅有助于颅内动脉夹层的诊断,也有助于对颅内动脉夹层的理解与治疗。

**3.4 脑动脉瘤** OCT可以对动脉瘤进行风险评估,通过观察动脉瘤壁的构成和损伤程度等多种信息预测动脉瘤破裂风险,能够辅助医师制定合理的干预方案(如介入手术、外科手术等)。Li等<sup>[38]</sup>使用OCT评估2种支架辅助栓塞治疗后的即刻效果,发现Enterprise支架贴壁不良,而Enterprise2支架贴壁良好,并在6个月后随访时使用OCT和HR-MRI观察新生内膜覆盖情况,发现Enterprise2支架完全被新生内膜覆盖,Enterprise支架在近端着陆区、动脉瘤颈部区域和远端着陆区仍有许多组织脱垂。OCT在观察支架和新生内膜时比HR-MRI具有优势。了解新生内膜覆盖情况对确定再治疗或抗血小板治疗的病程非常重要,已经达到完全内皮化的患者可能不需要终身抗血小板治疗。OCT还

可以识别支架植入后的动脉瘤残余,而在DSA下动脉瘤残余可能不太明显<sup>[39-40]</sup>。有病例报告评估了OCT在血流导向装置植入患者随访中的价值和实用性,证明OCT提供了支架植入和新生内膜组织生长的长期随访信息<sup>[41]</sup>。

**3.5 脑静脉疾病** 脑静脉疾病是指颅内静脉窦和皮质静脉的病变,如静脉瘤、静脉(窦)血栓等,其严重程度直接影响患者的生活质量和预后。OCT可以对脑静脉瘤、静脉(窦)血栓进行检测和诊断,也可指导治疗并及时评估治疗效果(如瘤体的缩小、血栓形成的消退等),还能够对患者的预后做出更为准确的预测。目前OCT在脑静脉疾病中的应用尚处于初步探索阶段,仅在尸检和动物模型中对OCT成像效果进行了分析。Cheshire等<sup>[42]</sup>在婴儿尸检中应用OCT进行上矢状窦内和硬脑膜成像,识别出许多血管状结构。Pasarikovski等<sup>[43]</sup>在约克猪模型上应用OCT充分评估了血管内治疗后的管腔环境。在人类脑静脉窦中采用OCT可能有助于诊断、治疗各种脑静脉疾病,但还需要进行安全性和可行性研究。

## 4 OCT器械及技术改进

目前临床可用的OCT导管均基于冠状动脉需求设计,在迂曲的脑血管中应用时存在较大的局限性。(1)现有OCT外径均较大(一般在2.7Fr左右),无法很好地适用于直径偏细的颅内血管。美国Gentuity公司2023年1月公布研发出专门为神经介入设计的小外径(1.8Fr)OCT导管并完成首例人体成像<sup>[44]</sup>,但还需要大量临床证据评估其效果。(2)近红外线信号会因红细胞的存在而衰减,难以获得可靠的图像,因此OCT检测时需要注射造影剂等冲洗血管腔中的血液,此过程需高压注射造影剂,会增加患者肾脏的负担且有导致夹层的风险。颅内血管多较迂曲,检测时易发生管腔冲洗不良或产生不均匀旋转伪像,导致成像失败或质量低下,可能需重复成像或加大冲洗速率,但反复检测操作可导致光学透镜损坏、血管损伤等。针对这种情况,对颅内血管进行OCT成像时可配合使用中间导管<sup>[39]</sup>。(3)目前的OCT扫描半径有限,可观察的血管直径多为7mm左右,穿透深度为0.1~2.0mm,对于巨大的动脉瘤、管径偏大的血管、脂质或血栓覆盖的血管壁等无法完全成像,

导致一次采集不能完整显示病变,急需大扫描半径 OCT 设备的临床应用。随着器械的不断发展,希望能有外径更细、更柔顺、扫描半径更大、更适合颅内迂曲血管的 OCT 导管可用<sup>[45]</sup>。

随着技术的不断改进,预计 OCT 图像分辨率将继续提高,可提供更精准的信息。除了结构成像,未来 OCT 的功能性成像将提供更丰富的信息,自动化的图像分析工具也正在全力开发中,这些均有利于更快速、准确地评估脑血管疾病,提高临床应用的效率<sup>[46]</sup>。OCT 和其他成像技术的结合可进行多模态成像<sup>[47]</sup>,提供更全面的脑血管病变评估和诊断信息,以便为患者提供个体化治疗方案。然而,需要进一步研究和完善其在临床应用中的技术和操作细节,以更好地发挥其优势和拓展其应用领域<sup>[48]</sup>。

## 5 小结

OCT 在冠状动脉疾病治疗中是可精准评估斑块特征和指导支架植入的有力工具。凭借其影像病理级别的分辨率,OCT 在脑血管疾病中逐渐获得临床应用,在颈动脉狭窄、颅内动脉狭窄及夹层、脑动脉瘤和脑静脉疾病中均显示出其高精度的优势,成为传统评估手段的有力补充。未来 OCT 提供的影像信息将成为医师考虑停用抗血小板药物的重要参考依据。目前 OCT 在脑血管疾病临床应用中尚缺乏循证支持,还需建立操作标准及检测规范,这都需要大规模的前瞻性研究和成本效益分析。此外,单一的成像方式有其固有的局限性,多模态成像更利于病变评估,但还需要进一步研究,积累循证依据,促进多模态成像技术向临床实践的转化<sup>[3]</sup>。

OCT 在脑血管疾病应用中已经显示出巨大的潜力,并将在未来继续发展。通过不断的技术创新和临床研究,OCT 有望成为脑血管疾病预防、诊断和治疗的重要影像功能检测工具,帮助提高医务人员的疾病诊治和管理水平。

## 【参考文献】

- [1] 靖志成,胡建明,郭袁俊. 光学相干层析成像的原理、应用与发展[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 107-120. DOI: 10.11721/cqnuj20210415.
- [2] OZAKI Y, KITABATA H, TSUJIOKA H, et al. Comparison of contrast media and low-molecular-weight dextran for frequency-domain optical coherence tomography[J]. *Circ J*, 2012, 76(4): 922-927. DOI: 10.1253/circj.cj-11-1122.
- [3] MUSHENKOVA N V, SUMMERHILL V I, ZHANG D, et al. Current advances in the diagnostic imaging of atherosclerosis: insights into the pathophysiology of vulnerable plaque[J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(8): 2992. DOI: 10.3390/ijms21082992.
- [4] PASARIKOVSKI C R, RAMJIST J, DA COSTA L, et al. Optical coherence tomography as an adjunct during carotid artery stenting for carotid atherosclerotic disease[J]. *Clin Neuroradiol*, 2020, 30(3): 503-509. DOI: 10.1007/s00062-019-00799-9.
- [5] TEARNEY G J, BREZINSKI M E, BOUMA B E, et al. *In vivo* endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography[J]. *Science*, 1997, 276(5321): 2037-2039. DOI: 10.1126/science.276.5321.2037.
- [6] YOSHIMURA S, KAWASAKI M, YAMADA K, et al. Visualization of internal carotid artery atherosclerotic plaques in symptomatic and asymptomatic patients: a comparison of optical coherence tomography and intravascular ultrasound[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2012, 33(2): 308-313. DOI: 10.3174/ajnr.A2740.
- [7] SHINDO S, FUJII K, SHIRAKAWA M, et al. Morphologic features of carotid plaque rupture assessed by optical coherence tomography[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2015, 36(11): 2140-2146. DOI: 10.3174/ajnr.a4404.
- [8] MAEHARA A, MATSUMURA M, ALI Z A, et al. IVUS-guided versus OCT-guided coronary stent implantation: a critical appraisal[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(12): 1487-1503. DOI: 10.1016/j.jcmg.2017.09.008.
- [9] WIJNS W, SHITE J, JONES M R, et al. Optical coherence tomography imaging during percutaneous coronary intervention impacts physician decision-making: ILUMIEN I study[J]. *Eur Heart J*, 2015, 36(47): 3346-3355. DOI: 10.1093/eurheartj/ehv367.
- [10] OTAKE H. Optical coherence tomography-guided percutaneous coronary intervention: evidence and clinical trials[J]. *Interv Cardiol Clin*, 2023, 12(2): 225-236. DOI: 10.1016/j.iccl.2022.12.004.
- [11] ALI Z A, KARIMI GALOUGAHI K, MINTZ G S, et al. Intracoronary optical coherence tomography: state of the art and future directions[J]. *EuroIntervention*, 2021, 17(2): e105-e123. DOI: 10.4244/EIJ-D-21-00089.
- [12] BERGMARK B, DALLAN L A P, PEREIRA G T R, et al. Decision-making during percutaneous coronary intervention guided by optical coherence tomography: insights from the LightLab Initiative[J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2022, 15(11): 872-881. DOI: 10.1161/

- CIRCINTERVENTIONS.122.011851.
- [13] JONES D A, RATHOD K S, KOGANTI S, et al. Angiography alone versus angiography plus optical coherence tomography to guide percutaneous coronary intervention: outcomes from the Pan-London PCI cohort[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2018, 11(14): 1313-1321. DOI: 10.1016/j.jcin.2018.01.274.
- [14] RÄBER L, MINTZ G S, KOSKINAS K C, et al. Clinical use of intracoronary imaging. Part 1: guidance and optimization of coronary interventions. An expert consensus document of the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions[J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(35): 3281-3300. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy285.
- [15] TEARNEY G J, REGAR E, AKASAKA T, et al. Consensus standards for acquisition, measurement, and reporting of intravascular optical coherence tomography studies: a report from the International Working Group for Intravascular Optical Coherence Tomography Standardization and Validation[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2012, 59(12): 1058-1072. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.09.079.
- [16] FUJII K, KUBO T, OTAKE H, et al. Expert consensus statement for quantitative measurement and morphological assessment of optical coherence tomography: update 2022[J]. *Cardiovasc Interv Ther*, 2022, 37(2): 248-254. DOI: 10.1007/s12928-022-00845-3.
- [17] 中华医学会心血管病学分会, 中华心血管病杂志编辑委员会. 光学相干断层成像技术在冠心病介入诊疗中应用的中国专家共识[J]. *中华心血管病杂志*, 2023, 51(2): 109-124. DOI: 10.3760/cma.j.cn112148-20220602-00436.
- [18] PRABHUDESAI V, PHELAN C, YANG Y, et al. The potential role of optical coherence tomography in the evaluation of vulnerable carotid atheromatous plaques: a pilot study[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2006, 29(6): 1039-1045. DOI: 10.1007/s00270-005-0176-z.
- [19] ZIMARINO M, PRATI F, STABILE E, et al. Optical coherence tomography accurately identifies intermediate atherosclerotic lesions—an *in vivo* evaluation in the rabbit carotid artery[J]. *Atherosclerosis*, 2007, 193(1): 94-101. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2006.08.047.
- [20] MATHEWS M S, SU J, HEIDARI E, et al. Neuroendovascular optical coherence tomography imaging and histological analysis[J]. *Neurosurgery*, 2011, 69(2): 430-439. DOI: 10.1227/NEU.0b013e318212bcb4.
- [21] FERNÁNDEZ-ALVAREZ V, LINARES-SÁNCHEZ M, SUÁREZ C, et al. Novel imaging-based biomarkers for identifying carotid plaque vulnerability[J]. *Biomolecules*, 2023, 13(8): 1236. DOI: 10.3390/biom13081236.
- [22] JONES M R, ATTIZZANI G F, GIVEN C A 2<sup>nd</sup>, et al. Intravascular frequency-domain optical coherence tomography assessment of atherosclerosis and stent-vessel interactions in human carotid arteries[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2012, 33(8): 1494-1501. DOI: 10.3174/ajnr.A3016.
- [23] JONES M R, ATTIZZANI G F, GIVEN C A 2<sup>nd</sup>, et al. Intravascular frequency-domain optical coherence tomography assessment of carotid artery disease in symptomatic and asymptomatic patients[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2014, 7(6): 674-684. DOI: 10.1016/j.jcin.2014.01.163.
- [24] SHI X, HAN Y, LI M, et al. Superficial calcification with rotund shape is associated with carotid plaque rupture: an optical coherence tomography study[J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 563334. DOI: 10.3389/fneur.2020.563334.
- [25] SHI X, CAI H, WANG F, et al. Cholesterol crystals are associated with carotid plaque vulnerability: an optical coherence tomography study[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2020, 29(2): 104579. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2019.104579.
- [26] HARADA K, KAJIHARA M, SANKODA Y, et al. Efficacy of post-dilatation during carotid artery stenting for unstable plaque using closed-cell design stent evaluated by optical coherence tomography[J]. *J Neuroradiol*, 2019, 46(6): 384-389. DOI: 10.1016/j.neurad.2019.03.006.
- [27] DOHAD S, ZHU A, KRISHNAN S, et al. Optical coherence tomography guided carotid artery stent procedure: technique and potential applications[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2018, 91(3): 521-530. DOI: 10.1002/ccd.27344.
- [28] UMEMOTO T, DE DONATO G, PACCHIONI A, et al. Optical coherence tomography assessment of new generation mesh-covered stents after carotid stenting[J]. *EuroIntervention*, 2017, 13(11): 1347-1354. DOI: 10.4244/EIJ-D-16-00866.
- [29] LIU R, YIN Q, LI M, et al. Diagnosis and treatment evaluation of in-stent restenosis of carotid artery stenting using optical coherence tomography[J]. *Neurology*, 2019, 92(2): 99-100. DOI: 10.1212/WNL.0000000000006743.
- [30] MATSUMOTO H, YAKO R, MASUO O, et al. A case of in-stent neoatherosclerosis 10 years after carotid artery stent implantation: observation with optical coherence tomography and plaque histological findings[J]. *Neurol Med Chir*, 2014, 54(2): 139-144. DOI: 10.2176/nmc.cr2013-0063.

- [31] UGHI G J, MAROSFOI M G, KING R M, et al. A neurovascular high-frequency optical coherence tomography system enables in situ cerebrovascular volumetric microscopy[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 3851. DOI: 10.1038/s41467-020-17702-7.
- [32] LI L, DMYTRIWA A A, KRINGS T, et al. Visualization of the human intracranial Vasa vasorum *in vivo* using optical coherence tomography[J]. *JAMA Neurol*, 2020, 77(7): 903-905. DOI: 10.1001/jamaneurol.2020.0546.
- [33] FENG Y, DMYTRIWA A A, YANG B, et al. Neovascularization in human intracranial atherosclerotic In-stent restenosis[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(2): 322. DOI: 10.3390/diagnostics11020322.
- [34] XU X, LI M, LIU R, et al. Optical coherence tomography evaluation of vertebrobasilar artery stenosis: case series and literature review[J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12(8): 809-813. DOI: 10.1136/neurintsurg-2019-015660.
- [35] YANG B, FENG Y, MA Y, et al. Frequency-domain optical coherence tomography for intracranial atherosclerotic stenosis: feasibility, safety, and preliminary experience[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 678443. DOI: 10.3389/fneur.2021.678443.
- [36] 李帅, 李澌纯, 张雪凤, 等. 头颈动脉夹层药物治疗前后的高分辨率磁共振成像特征分析[J]. *海军军医大学学报*, 2023, 44(6): 679-685. DOI: 10.16781/j.cn31-2187/R.20230123.
- LI S, LI S C, ZHANG X F, et al. High-resolution magnetic resonance imaging characteristics of cervicocranial arterial dissection before and after drug treatment[J]. *Acad J Naval Med Univ*, 2023, 44(6): 679-685. DOI: 10.16781/j.cn31-2187/R.20230123.
- [37] GAO P, GUI L, YANG B, et al. Optical coherence tomography of spontaneous basilar artery dissection in a patient with acute ischemic stroke[J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 858. DOI: 10.3389/fneur.2018.00858.
- [38] LI L, MA Y, DMYTRIWA A A, et al. Evaluation of vessel wall apposition for stent-assisted coiling in treatment of vertebral artery aneurysms using optical coherence tomography[J]. *Clin Neuroradiol*, 2022, 32(2): 565-570. DOI: 10.1007/s00062-021-01070-w.
- [39] GOUNIS M J, UGHI G J, MAROSFOI M, et al. Intravascular optical coherence tomography for neurointerventional surgery[J]. *Stroke*, 2019, 50(1): 218-223. DOI: 10.1161/STROKEAHA.118.022315.
- [40] KING R M, MAROSFOI M, CAROFF J, et al. High frequency optical coherence tomography assessment of homogenous neck coverage by intrasaccular devices predicts successful aneurysm occlusion[J]. *J Neurointerv Surg*, 2019, 11(11): 1150-1154. DOI: 10.1136/neurintsurg-2019-014843.
- [41] MA Y, JI Z, YANG W, et al. Role of optical coherence tomography in pipeline embolization device for the treatment of vertebral-basilar artery dissecting aneurysms[J]. *J Neurointerv Surg*, 2024, 16(3): 308-312. DOI: 10.1136/jnis-2022-019927.
- [42] CHESHIRE E C, MALCOMSON R D G, JOSEPH S, et al. Post-mortem imaging of the infant and perinatal dura mater and superior sagittal sinus using optical coherence tomography[J]. *Int J Legal Med*, 2017, 131(5): 1377-1383. DOI: 10.1007/s00414-017-1570-1.
- [43] PASARIKOVSKI C R, KU J C, KEITH J, et al. Endovascular cerebral venous sinus imaging with optical coherence tomography[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2020, 41(12): 2292-2297. DOI: 10.3174/ajnr.A6909.
- [44] Introducing the Genuity HF-OCT imaging system. Powered by the world's smallest catheter[N/OL]. [2023-10-05]. <https://genuity.com/#home>.
- [45] CHEN C J, KUMAR J S, CHEN S H, et al. Optical coherence tomography: future applications in cerebrovascular imaging[J]. *Stroke*, 2018, 49(4): 1044-1050. DOI: 10.1161/STROKEAHA.117.019818.
- [46] GESSERT N, LUTZ M, HEYDER M, et al. Automatic plaque detection in IVOCT pullbacks using convolutional neural networks[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2019, 38(2): 426-434. DOI: 10.1109/TMI.2018.2865659.
- [47] NISHIDA T, HIRO T, TAKAYAMA T, et al. Clinical significance of microvessels detected by *in vivo* optical coherence tomography within human atherosclerotic coronary arterial intima: a study with multimodality intravascular imagings[J]. *Heart Vessels*, 2021, 36(6): 756-765. DOI: 10.1007/s00380-020-01756-0.
- [48] XU R, ZHAO Q, WANG T, et al. Optical coherence tomography in cerebrovascular disease: open up new horizons[J]. *Transl Stroke Res*, 2023, 14(2): 137-145. DOI: 10.1007/s12975-022-01023-6.