

· 专家建议 ·

中国光学相干断层成像技术在缺血性脑血管病介入诊疗中的应用专家建议

中国研究型医院学会介入神经病学专业委员会

摘要: 血管内光学相干断层成像技术(OCT)可用于评估血管病变、斑块性质,指导介入治疗,但在脑血管病领域中的应用尚缺乏统一规范。该文从 OCT 的技术概述、图像采集、图像判读、临床应用等方面总结专家建议,旨在规范 OCT 在脑血管病介入诊疗中的应用,并为 OCT 在脑血管病领域开展深入研究奠定基础。

关键词: 脑缺血;血管内治疗;体层摄影术,光学相干

doi: 10.3969/j.issn.1672-5921.2022.01.010

Expert consensus on the application of optical coherence tomography in interventional diagnosis and treatment of ischemic cerebrovascular disease in China Professional Committee of Interventional Neurology in Chinese Research Hospital Association

Corresponding authors: Liu Xinfeng, Email: xfliu2@vip.163.com; Zhu Wusheng, Email: zusemail@sina.com

Abstract: Intravascular optical coherence tomography (OCT) can be used to evaluate the vascular lesions and plaques characteristics to guide interventional therapy. However, its application in the field of cerebrovascular disease has not been standardized. In this paper, experts' suggestions were summarized from the aspects of technical overview of OCT, image acquisition, image interpretation, and clinical application in cerebrovascular system. The aim is to guide and standardize the application of OCT in the interventional diagnosis and treatment of cerebrovascular diseases, and to lay foundation for the further research of OCT in the field of cerebrovascular diseases.

Key words: Brain ischemia; Endovascular therapy; Tomography, optical coherence

光学相干断层成像(optical coherence tomography, OCT)作为一种血管内成像技术,在冠状动脉诊疗领域已得到广泛认可。在欧洲心胸外科协会(European Association for Cardio-Thoracic Surgery, EACTS) 2014 年的心肌血运重建指南中, OCT 对于评估冠状动脉病变特征及优化支架置入术的应用价值均为 II a 类证据推荐^[1]。在脑血管领域,国内外一些医疗中心已尝试通过 OCT 来评估脑血管病变、斑块性质并指导介入治疗,但尚缺乏共识和规范。为此,中国研究型医院学会介入神经病学专业委员会组织国内有丰富介入诊疗临床经验的脑血管病专家,结合 OCT 的临床应用实践及文献资料,共同制定 OCT 在脑血管诊疗领域的成像方法、图像分析及临床应用的中国专家建议,旨在指导 OCT 在脑血管病介入诊疗中的合理、安全应用,为 OCT 在脑血管领域开展深入研究奠定基础。

通信作者:刘新峰,210002 南京,东部战区总医院神经内科, Email: xfliu2@vip.163.com;朱武生,210002 南京,东部战区总医院神经内科, Email: zusemail@sina.com

1 OCT 技术概述

OCT 技术的成像原理类似于超声成像,只是用光波代替了声波,其图像分辨率高于血管超声。相对于 MR 血管成像、CT 血管成像、血管超声、经颅多普勒等无创检查方法, OCT 属于有创的血管腔内影像检查,其需要在 DSA 的辅助下进行术中实时检查,可作为 DSA 二维图像的补充。当患者血管病变性质无法判断、血管斑块易损性需要量化评估、介入治疗术中及随访观察时,可以考虑进一步行 OCT 检查。

1.1 OCT 技术成像原理

OCT 以近红外光作为光源,发出信号臂和参考臂两束光线。信号臂发射到被测物质,如血管壁;参考臂发射到反光镜上,起到参照作用。信号臂与参考臂反射回来的两束光信号,会叠加或抵消从而形成新的波形。通过改变反光镜的位置来改变参考臂的长度,继而得到不同深度的组织信号。由于组织性状不同,从组织中反射回来的光信号强弱不等,之后可经计算机处理重建光信号,产生组织微结构的横断面图像^[2]。

根据成像原理, OCT 技术可分为时域 OCT(time domain

OCT (TD-OCT) 和频域 OCT (frequency domain OCT, FD-OCT) 两种类型。红细胞吸收光线会干扰 OCT 成像效果,因此在成像时需要尽可能清除血液。TD-OCT 在检测时为营造血管内无血环境,需要使用球囊阻断靶血管近端血流,可能引起缺血症状或发生病变血管远端缺血情况,且操作相对复杂;而 FD-OCT 具有更快的成像速度,仅需快速注射对比剂即可清除血液干扰而无需球囊阻断近端血流,操作简单且安全性更高。因此,FD-OCT 是目前最常用的技术。最新一代的 ILUMIEN OPTIS 系统成像速度更快,能够使 OCT 和血管造影进行自动校准并实现三维重建,有助于精确的支架定位^[3],该系统整合了血流储备分数功能,具备血管结构和功能学评估功能,扩展了 OCT 的应用领域。

1.2 OCT 系统介绍

OCT 成像系统的组件构成包括成像引擎、显示器、一体化的驱动马达和光学控制器 (drive-motor optical controller, DOC)、隔离变压器、CD/DVD 光驱、文件架、USB 接口、主电源开关、键盘和鼠标。成像导管工作长度 135 cm,头端外径 2.7 F,外包亲水涂层。导管头端及距头端 20 mm 处各有 1 个专用标识,目前常用的 OCT 成像导管的透镜位于近端标识。由于 OCT 采用的近红外光无法穿透血流 (红细胞) 成像,因此需通过导引导管快速注射晶体溶液或对比剂清除血液,才能使血管壁及血管腔清晰成像。

1.3 OCT 应用于缺血性脑血管病的价值和局限性

在缺血性脑血管病的介入诊疗中,OCT 虽然尚未常规使用,但相对于其他传统的影像学评估手段,其能够提供更多血管管壁和腔内信息,有利于缺血性脑血管病的精准介入治疗。

应用价值:(1) 评估脑血管病变性质,如动脉粥样硬化、夹层形成等;(2) 评估动脉粥样硬化斑块的易损性、斑块进展及药物治疗后的效果;(3) 指导脑血管支架的选择;(4) 术后即刻评价支架的置入情况,如支架贴壁不良、膨胀不良、病变覆盖不全、边缘夹层、组织脱落及支架内血栓形成等;(5) 支架置入术后长期随访评估新生内膜增生和支架内再狭窄等^[4-5]。

应用的局限性:(1) 不能用于存在脑血管造影禁忌证的患者;(2) 不适合应用于迂曲的脑血管。

推荐意见:(1) 了解血管内 OCT 技术成像原理,选择 FD-OCT 利于快速成像;(2) 掌握 OCT 在脑血管介入中的应用价值及局限性。

2 OCT 图像采集

2.1 图像采集过程

在完成脑血管造影,确定病变部位后,将导引导管及微导丝置于目标血管的适当位置。微导丝头端或保护伞近端至病变远端距离应不少于 7.0 cm。在颈动脉支架置入前,先置入保护伞。启动 OCT 机器,创建新病例并输入患者信息。给驱动马达和光学控制器套上无菌塑料保护罩。取出 OCT 成像导管并用肝素等渗盐水浸湿纱布擦拭,激活亲水层。以

3 ml 的 100% 碘对比剂从侧孔推注冲洗成像导管管腔,直至从导管头端流出 3 滴对比剂,并保留注射器。连接成像导管和 DOC,将导管衬套插入 DOC 端口中并顺时针旋转直至固定。

校准导管:对照屏幕上的校准标记手动校准或自动校准。启动实时扫描成像,成像导管沿 0.014 英寸 (0.356 mm) 导丝或保护伞自带的导丝送至病变处或支架远端,OCT 导管近端标识需超过病变 5 mm,以便识别出病变远端的正常血管。通过实时造影和成像导管上的标记确保导引导管与靶血管同轴,以利于管腔内的血液冲洗完全。根据病变血管部位设置高压注射泵参数,包括冲洗速率、总冲洗量及最高限压,或者准备含足量对比剂的注射器进行手动注射。注入对比剂,管腔充分冲洗,光镜自行回撤,从而获得血管 OCT 横断面图像。

一般来说,为充分显像,颈动脉颅外段成像推注的参数为:速度 10 ml/s,剂量 20 ml,限压 2 068.43 kPa (300 磅力/平方英寸);椎动脉颅外段成像推注的参数为:速度 10 ml/s,剂量 20 ml,限压 2 068.43 kPa;颅内动脉成像推注的参数为:速度 4 ml/s,剂量 8 ml,限压 2 068.43 kPa。术者和 OCT 操作者应做好密切配合,在快速推注对比剂之前,推注少量对比剂以再次确认导管的同轴性,尽量保证单次冲刷完成成像,避免多次对比剂冲洗,减少对比剂用量。

2.2 图像采集范围

既往研究中,OCT 在脑血管系统中的应用部位包括颅外段和颅内段。目前颅外段血管如颈内动脉窦部、颈段、岩段、椎动脉起始部应用较多,颅内段血管如颈动脉颅内段及基底动脉也有应用报道^[4,6-7]。对于大脑中动脉 M1 段及以远,基于目前的 OCT 导管,仅有动物及尸体研究报道,尚未成功应用于临床^[7]。由于 OCT 成像导管的设计是基于冠状动脉,在迂曲的脑血管中应用时,存在一定的局限性。对于严重迂曲的血管,反复尝试可导致光学透镜损坏、血管损伤等^[16,18]。此外,迂曲的脑血管可导致血管冲洗不良或产生不均匀旋转伪像,必要时需重复成像或加大冲洗速率^[18]。在颅内血管成像时,必要时可配合中间导管使用^[5]。目前,OCT 技术可观察的血管直径范围为 7 mm 左右,穿透深度为 0.1~2.0 mm^[2]。对于巨大的动脉瘤、管径偏大的血管、脂质或者血栓覆盖下的血管壁等无法完全成像。

2.3 图像采集的局限性及影响成像质量的原因

OCT 作为目前分辨率最高的血管内成像技术,具有可观察血管内细微结构的优势,但在应用中也存在一定的局限性:由于组织穿透性较低,OCT 评估弥漫性病变的斑块负荷及血管直径的能力有限^[19];由于光衰减,大量血栓及脂质的存在会影响 OCT 对血管壁外膜层的评估;颅内血管相对迂曲,对于大脑中动脉,指引导管难以到达,血管远端预留空间不足,目前的 OCT 成像较难实现^[4]。

影响 OCT 成像质量的主要原因^[18]:(1) 指引导管与靶血管未同轴,不能实现血管内血液有效冲洗;(2) 推注对比剂

速度缓慢或推注量不足,血液冲洗不充分;(3)术者推注对比剂与图像采集不同步;(4)OCT 成像导管边支冲洗不充分,有血液或气泡残留;(5)推注的对比剂中掺有血液,或对比剂浓度过低;(6)脑血管严重弯曲、钙化病变易造成成像导管损坏,并出现伪像;(7)动脉直径过大(>7 mm)及开口或分叉处病变。

推荐意见:(1)熟悉血管内 OCT 的操作方法,术中冲洗管腔血液,利于清晰成像。(2)确保导引导管与靶血管同轴,根据病变血管部位设置高压注射泵参数,以利于管腔内的血液冲洗完全,从而获得血管 OCT 横断面图像。(3)颈动脉颅外段成像推注的参数为:速度 10 ml/s,剂量 20 ml,限压 2 068.43 kPa;椎动脉颅外段成像推注的参数为:速度 10 ml/s,剂量 20 ml,限压 2 068.43 kPa;颅内动脉成像推注的参数为:速度 4 ml/s,剂量 8 ml,限压 2 068.43 kPa。(4)若成像质量不理想,立即分析影响成像质量的可能原因,予以纠正。

3 OCT 图像的解读

3.1 正常血管结构及常见的病变特征

如果一个区域里有一些高折射率的颗粒,如脂肪泡或者红细胞,那么这个区域可能拥有比较强的背散射和非常强的衰减。如果一个区域有大量的小颗粒(如纤维蛋白),那么这个区域就有较强的背散射和比较弱的衰减。由于血管壁的组织成分有所变化,OCT 图像可呈现出不同的光信号特征,从而清晰地呈现血管壁结构。脑血管的管壁内膜为弹力纤维层,反射信号高,在 OCT 图像上表现为高信号亮带状;中膜为平滑肌层,反射信号微弱,表现为信号较低暗带;外膜为细胞外基质和外弹力膜,表现为高信号,亮度不均(图 1a)。

经组织病理验证,OCT 对识别不同类型的斑块成分具有较高的敏感性与特异性,图像分辨率可达到 10 μm,是血管内超声的 10 倍^[20]。动脉粥样硬化斑块在 OCT 图像上表现为血管壁增厚,血管壁的三层结构(内膜、中膜及外膜)缺失。

纤维斑块、钙化斑块和脂质斑块在 OCT 图像上表现特征各有不同。在 OCT 图像上,纤维斑块表现为同质、高信号和弱衰减区域,可见内弹力膜或外弹力膜;若纤维帽组织表现出信号不连续,和(或)伴有斑块内空腔形成,则为斑块破裂(图 1b);脂质斑块表现为强衰减区域、低信号,边缘模糊,表面有高信号带的纤维帽(图 1c);钙化斑块表现为低信号或不均匀区域,但边缘锐利(图 1d)。在心血管领域,基于病理结果与 OCT 图像特征比较予以证实,易损斑块的最主要表现形式为具有大脂质核心的薄纤维帽(<65 μm)斑块(thin-cap fibroatheroma, TCFA)^[21]。在颈动脉斑块中,基于 OCT 如何界定 TCFA 的纤维帽厚度尚无定论。

在血栓识别方面,OCT 不仅可以识别造影无法发现的微小附壁血栓,还可以利用红细胞的光散射现象分析血栓的性质^[22]。红色血栓主要由红细胞和纤维蛋白组成,白色血栓主要由血小板及纤维蛋白组成。OCT 的信号减弱模式主要受血栓内红细胞密度影响,红色血栓信号不强,呈现为高背反射伴有阴影的图像;白色血栓信号强,呈现为阴影较少的低背反射图像(图 1e, 1f)。

此外,OCT 还能识别更加细微的病变特征^[21]。胆固醇结晶表现为信号强度较高、衰减较低的薄线性区域,通常位于纤维帽或脂质斑块坏死核心中与脂质伴行;新生滋养血管为无信号空隙,轮廓清晰^[23];巨噬细胞表现为高亮伴有强衰减的点状信号。尽管目前 OCT 的分辨率无法观察到单个巨噬细胞,但可通过量化分析巨噬细胞密度的方法以探究炎症反应在动脉粥样硬化斑块中的作用^[24-25]。OCT 对夹层诊断的敏感度较高,可以发现血管内的微小夹层,表现为较强的信号,可见血管壁间有间隙^[26]。新生滋养血管在 OCT 图像上表现为多个(至少 3 个)连续截面中观察到的直径为 50~300 μm 的低信号和边缘锐利的空洞样结构,也被称为微通道^[27]。

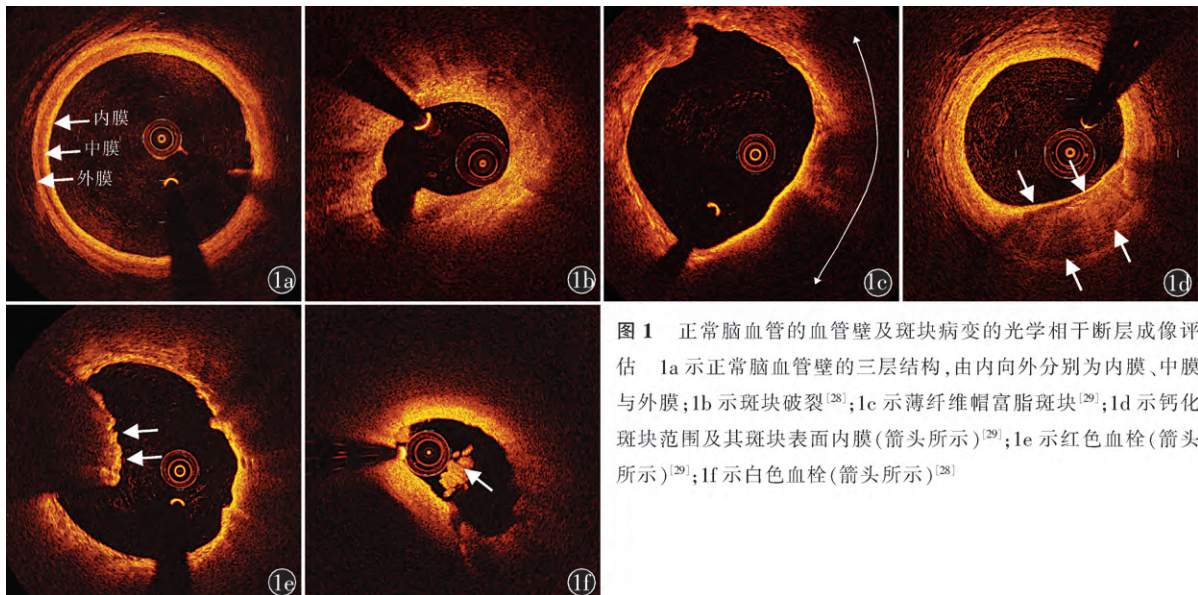


图 1 正常脑血管的血管壁及斑块病变的光学相干断层成像评估 1a 示正常脑血管壁的三层结构,由内向外分别为内膜、中膜与外膜;1b 示斑块破裂^[28];1c 示薄纤维帽富脂斑块^[29];1d 示钙化斑块范围及其斑块表面内膜(箭头所示)^[29];1e 示红色血栓(箭头所示)^[29];1f 示白色血栓(箭头所示)^[28]

3.2 脑血管 OCT 图像存在的不足

OCT 伪像是指由成像系统或其他原因造成的图像畸变或与血管解剖结构存在的差异,包括血液残留、错层伪像、气泡伪像、切线伪像、饱和伪像和导丝损坏等(图 2)。由于 OCT 的组织穿透力有限(0.5~1.5 mm)^[4],无法完成血管壁长段纵断面的成像,对于巨大斑块或者混合斑块,难以完全区分钙化与脂质。管腔内或管壁上若附着红血栓,由于信号的衰减可导致血管壁外膜层结构无法成像,出现类似脂质斑块的伪影。评估炎性斑块时,难以准确定量识别巨噬细胞,且由于巨噬细胞的强衰减信号特性,形成类似脂质坏死核心成像,影响对深层的脂质评估^[24]。当巨噬细胞与微小钙化、胆固醇结晶或内外膜同时出现时,明显增加识别血管壁内病变图像的难度。

推荐意见: (1) 建议应用血管内 OCT 图像识别正常血管壁的结构,并对易损斑块、动脉夹层形成及附壁血栓等进行鉴别; (2) 建议应用血管内 OCT 图像识别斑块类型,并对脂质池、钙化结节、巨噬细胞浸润等成分特征进行鉴别; (3) 建议识别 OCT 图像的伪像,包括血液残留、错层伪像、气泡伪像、切线伪像、饱和伪像和导丝损坏等。

4 OCT 在缺血性脑血管病介入诊疗中的应用

OCT 技术在评估颅外病变及颅内病变中均有所应用。基于目前的 OCT 成像导管材料,OCT 技术可以用于椎-基底动脉^[14]相关病变。对于前循环病变,OCT 技术检查的可视范围可达颈动脉岩骨段。

4.1 术前评估

术前可以通过 OCT 评估颈动脉粥样硬化斑块的形态特征,从而识别易损斑块,指导介入治疗。在冠状动脉的介入诊疗领域,已有研究报道术前通过 OCT 对冠状动脉斑块形态进行评估,有助于指导选择介入治疗措施并预测患者术后的疗效^[31-32]。有研究表明,通过 OCT 所观察到的斑块图像特征,并基于斑块的“薄纤维帽”特征,可预测动脉粥样硬化斑块的破裂和血栓发生风险,对症状性颈动脉斑块进行识别^[33]。同样,基于 OCT 斑块特征的研究结果,说明 OCT 斑块特征与颈动脉狭窄程度以及缺血症状存在一定相关性^[34-35]。因此,在脑血管介入治疗前利用 OCT 评估斑块特征,识别易造成缺血事件的高危斑块,指导颈动脉介入治疗,特别是对血管狭窄程度未达到干预程度,但存在易损斑块的

病变具有重要意义。同时 OCT 能够准确测量病变的血管直径、提供参考血管直径和病变长度^[36-37],为术者选择适宜的支架与球囊类型提供客观依据。

4.2 评价介入治疗后的即刻效果

目前,OCT 已被用于评价支架置入术后相关支架即刻的膨胀率、支架贴壁性、病变组织向血管腔内的突出及支架内血栓形成等。在 OCT 图像中,采用支架即刻膨胀率(支架的膨胀率:支架最小面积/平均参考管腔面积×100%)来评价上述支架置入后的功能结构特征变化^[38],通常将<90%作为评价支架膨胀不良的界值。当支架支撑杆表面至管腔表面之间的轴向距离大于支架支撑杆的厚度时,定义为支架贴壁不良。支架支撑杆厚度的突出距离为 10~200 μm,因此可将支架支撑杆表面至管腔表面之间的轴向距离>200 μm 定义为支架贴壁不良^[21,39-40](图 3a)。组织突向管腔内的定义是支架置入后,血管壁表面的组织经支架网状结构向管腔内突出^[41-42]。当支架放置在薄纤维帽斑块或坏死核心表面时,斑块组织被支架“挤压”突入管腔更常见。根据突入管腔内组织成分不同,可分为斑块或血栓。突入管腔内斑块表面通常光滑且无明显信号衰减(图 3a),而血栓突出表面通常不规则且伴有强光学衰减^[21,38](图 3b)。通过使用闭环支架有助于解决颈动脉易损斑块支架置入后组织向血管腔内突出的问题,尤其是突出>500 μm 的斑块组织^[40]。在 OCT 图像上,即刻发生的支架内血栓的定义是支架置入即刻出现局限性突入管腔内的不规则团块(图 3c)^[43]。在颅内血管急性闭塞再通术中,应用 OCT 可以对治疗过程中的病变性质,如夹层、动脉粥样硬化性狭窄等病变进行识别,指导手术策略的制定^[15]。

4.3 介入治疗后随访

OCT 可用于介入治疗后随访以了解支架术后内膜的修复、支架内再狭窄、新生动脉粥样硬化和血栓形成等^[44-46]。如果 OCT 能够识别支架支撑杆上覆盖组织,则称为支架支撑杆覆盖(图 4a)^[47-48];如果 OCT 未观察到支架支撑杆上覆盖组织,则称为支架支撑杆未覆盖(图 4a)^[47]。Gonzalo 等^[49]根据 OCT 图像特征,将动脉壁新生内膜分为以下三类: (1) 均质型,均匀高密度反向散射,不伴信号衰减(图 4b); (2) 非均质型,低密度反向散射且信号不均匀,伴局部信号衰减(图 4c); (3) 分层型,若出现双层的光学信号,通常血管腔近

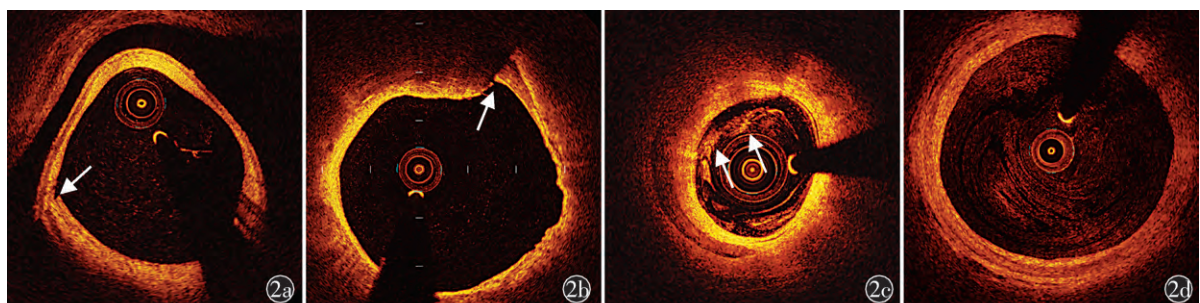


图 2 脑血管光学相干断层成像之伪像 2a,2b 示切线伪像(箭头所示);2c 示管腔内局部血液残留(箭头所示)^[30];2d 示全管腔内血液残留

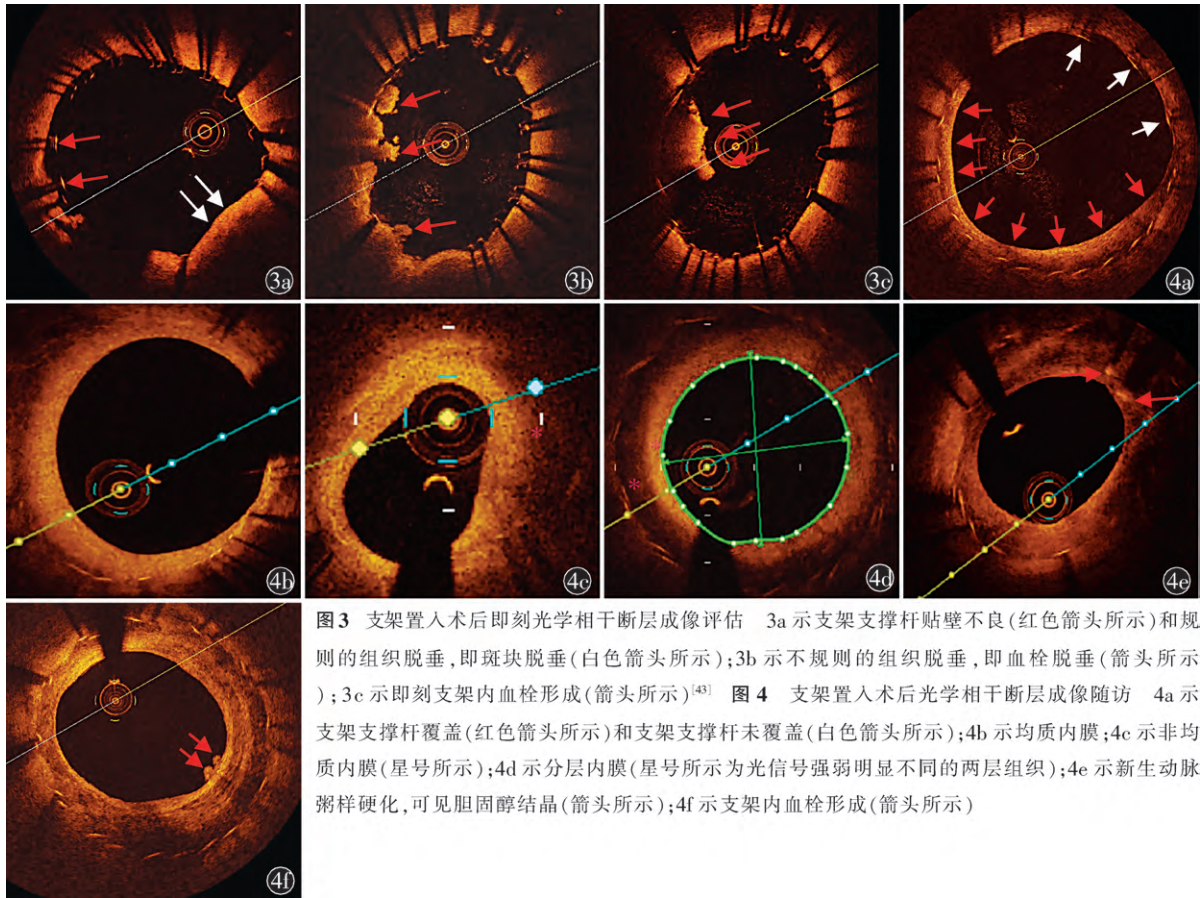


图3 支架置入术后即刻光学相干断层成像评估 3a 示支架支撑杆贴壁不良(红色箭头所示)和规则的组织脱垂,即斑块脱垂(白色箭头所示);3b 示不规则的组织脱垂,即血栓脱垂(箭头所示);3c 示即刻支架内血栓形成(箭头所示)^[43] 图4 支架置入术后光学相干断层成像随访 4a 示支架支撑杆覆盖(红色箭头所示)和支架支撑杆未覆盖(白色箭头所示);4b 示均质内膜;4c 示非均质内膜(星号所示);4d 示分层内膜(星号所示为光信号强弱明显不同的两层组织);4e 示新生动脉粥样硬化,可见胆固醇结晶(箭头所示);4f 示支架内血栓形成(箭头所示)

场侧壁成像为高反射信号(外膜层)远场侧壁成像为低反射信号,即内膜层(图4d)。基于OCT的北美症状性颈动脉内膜切除术试验法计算血管腔的狭窄率^[33],即为(病变远端血管参考直径-狭窄病变最小管腔直径)/病变远端血管参考直径×100%。当支架狭窄率≥50%时,定义为支架内再狭窄^[50]。当新生内膜出现钙化、脂质成分或胆固醇结晶时定义为新生动脉粥样硬化^[38](图4e)。随访时支架内血栓形成定义为出现在内膜表面或漂浮于管腔内支架小梁上的不规则团块(图4f)^[51]。研究表明,支架支撑杆未覆盖(OR=8.26 95% CI: 6.82~10.04; P<0.01)和支架贴壁不良(OR=13.03 95% CI: 10.13~16.93; P<0.01)与晚期支架内血栓形成密切相关^[38, 52-53]。

推荐意见: (1) 通过术前OCT,评估动脉粥样硬化斑块的形态特征、识别易损斑块,从而指导介入治疗;(2) 支架置入后即刻行OCT,对支架贴壁等情况进行评估,及时发现支架内血栓形成;(3) 支架置入术后采用OCT随访时,可以了解支架置入术后内膜修复、支架内再狭窄、新生动脉粥样硬化斑块和血栓形成等情况。

5 结论

综上所述,OCT可准确评估脑血管病变、斑块性质,并指导临床介入诊疗。对于有条件的医疗中心,建议规范化应用OCT指导缺血性脑血管病的介入精准治疗。未来应建立中国缺血性脑血管病患者OCT临床研究数据库,提供OCT在

脑血管病诊疗中的循证医学证据。

执笔 刘锐(东部战区总医院);胡伟(中国科学技术大学附属第一医院);孙文(中国科学技术大学附属第一医院);韩云飞(东部战区总医院)

参与讨论专家名单(按姓氏汉语拼音排序) 曹辉(南京脑科医院);曹文锋(江西省人民医院);陈长青(中南大学湘雅医院);陈光辉(东部战区总医院);陈国华(武汉市第一医院);陈红兵(中山大学附属第一医院);陈星宇(厦门大学附属中山医院);杜鹃(东部战区总医院);范进(西部战区总医院);樊小兵(东部战区总医院);高连波(中国医科大学附属第四医院);高小平(湖南省人民医院);郭富强(四川省人民医院);韩巨(山东省千佛山医院);韩云飞(东部战区总医院);杭春华(南京大学医学院附属鼓楼医院);胡伟(中国科学技术大学附属第一医院);黄晓松(湖南省脑科医院);贾颀(西安高新医院);蒋智林(北部战区总医院);焦力群(首都医科大学宣武医院);柯开富(南通大学附属医院);李冰(山东省烟台毓璜顶医院);李长茂(湖南省娄底市中心医院);李敏(江苏省中医院);李永坤(厦门大学第一附属医院);林航(解放军联勤保障部队第九〇〇医院);林敏(福建省第二人民医院);刘德志(上海中医药大学附属曙光医院);刘建林(西安交通大学第一附属医院);刘锐(东部战区总医院);刘圣(南京医科大学第一附属医院);刘文华(武汉市第一医院);刘新峰(东部战区总医院);刘新通

(广东省第二人民医院);刘煜敏(武汉大学中南医院);刘运海(中南大学湘雅医院);骆翔(华中科技大学同济医学院附属同济医院);吕秋石(东部战区总医院);马敏敏(东部战区总医院);马宁(首都医科大学附属北京天坛医院);缪中荣(首都医科大学附属北京天坛医院);南光贤(吉林大学中日联谊医院);牛国忠(杭州市第一人民医院);彭斌(北京协和医院);濮捷(湖北省中医院);秦超(广西医科大学第一附属医院);石进(空军特色医学中心);石忠松(中山大学孙逸仙纪念医院);孙钦建(山东省立医院);孙文(中国科学技术大学附属第一医院);汤永红(南华大学附属南华医院);田喜光(武警广东省总队医院);王国平(中国科学技术大学附属第一医院);王君(解放军总医院第一医学中心);王启章(深圳市中西医结合医院);王守春(吉林大学白求恩第一医院);王水平(安徽医科大学第一附属医院);王苇(扬州大学附属医院);汪银洲(福建省立医院);王振(长沙市中心医院);吴明华(江苏省中医院);吴伟(山东大学齐鲁医院);吴志强(广东省东莞市人民医院);肖国栋(苏州大学附属第二医院);徐格林(东部战区总医院);薛建中(江苏省常熟市第二人民医院);杨清武(陆军军医大学第二附属医院);杨世泉(解放军联勤保障部队第九〇二医院);杨新建(首都医科大学附属北京天坛医院);叶瑞东(东部战区总医院);殷聪国(杭州市第一人民医院);尹琳(大连医科大学附属第二医院);殷勤(东部战区总医院);岳炫烨(天津医科大学总医院);张光运(空军特色医学中心);张桂莲(西安交通大学第二附属医院);张锦华(浙江大学医学院附属邵逸夫医院);张猛(陆军特色医学中心);张勇(青岛大学附属医院);赵振强(海南医学院第一附属医院);周志明(皖南医学院弋矶山医院);朱良付(河南省人民医院);朱其义(山东省临沂市人民医院);朱双根(深圳市龙华区中心医院);朱武生(东部战区总医院)

参考文献

- [1] Authors/Task Force members, Windecker S, Kolh P, et al. 2014 ESC/EACTS guidelines on myocardial revascularization: the task force on myocardial revascularization of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS) developed with the special contribution of the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions (EAPCI) [J]. *Eur Heart J*, 2014, 35(37): 2541-619.
- [2] Prati F, Regar E, Mintz GS, et al. Expert review document on methodology, terminology, and clinical applications of optical coherence tomography: physical principles, methodology of image acquisition and clinical application for assessment of coronary arteries and atherosclerosis [J]. *Eur Heart J*, 2010, 31(4): 401-415.
- [3] Onuma Y, Katagiri Y, Burzotta F, et al. Joint consensus on the use of OCT in coronary bifurcation lesions by the European and Japanese bifurcation clubs [J]. *EuroIntervention*, 2019, 14(15): e1568-e1577.
- [4] Chen CJ, Kumar JS, Chen SH, et al. Optical coherence tomography: future applications in cerebrovascular imaging [J]. *Stroke*, 2018, 49(4): 1044-1050.
- [5] Gounis MJ, Ughi GJ, Marosfoi M, et al. Intravascular optical coherence tomography for neurointerventional surgery [J]. *Stroke*, 2019, 50(1): 218-223.
- [6] Yoshimura S, Kawasaki M, Hattori A, et al. Demonstration of intraluminal thrombus in the carotid artery by optical coherence tomography: technical case report [J]. *Neurosurgery*, 2010, 67(3 Suppl Operative): onsE305.
- [7] Mathews MS, Su J, Heidari E, et al. Neuroendovascular optical coherence tomography imaging and histological analysis [J]. *Neurosurgery*, 2011, 69(2): 430-439.
- [8] Lopes DK, Johnson AK. Evaluation of cerebral artery perforators and the pipeline embolization device using optical coherence tomography [J]. *J Neurointerv Surg*, 2012, 4(4): 291-294.
- [9] Patel IJ, Bezerra HG, Costa MA, et al. Novel use of optical coherence tomography [J]. *J Neurointerv Surg*, 2013, 5(6): e41.
- [10] Given CA 2nd, Ramsey CN 3rd, Attizzani GF, et al. Optical coherence tomography of the intracranial vasculature and Wingspan stent in a patient [J]. *BMJ Case Rep*, 2014, 2014: bcr2014011114.
- [11] Liu R, Jiang Y, Xiong Y, et al. An optical coherence tomography assessment of stent strut apposition based on the presence of lipid-rich plaque in the carotid artery [J]. *J Endovasc Ther*, 2015, 22(6): 942-949.
- [12] Griessenauer CJ, Foreman PM, Deveikis JP, et al. Optical coherence tomography of traumatic aneurysms of the internal carotid artery: report of 2 cases [J]. *J Neurosurg*, 2016, 124(2): 305-309.
- [13] Pasarikovski CR, Ramjist J, da Costa L, et al. Optical coherence tomography imaging after endovascular thrombectomy for basilar artery occlusion: report of 3 cases [J]. *J Neurosurg*, 2019: 1-6.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Yan L, Dmytriw A, Yang B, et al. Optical coherence

- tomography of plaque erosion and thrombus in severe vertebral artery stenosis [J]. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 2021, 11(4): 638.
- [18] Bezerra HG, Costa MA, Guagliumi G, et al. Intracoronary optical coherence tomography: a comprehensive review clinical and research applications [J]. *JACC Cardiovasc Interv* 2009, 2(11): 1035-1046.
- [19] Raber L, Mintz GS, Koskinas KC, 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.
- [20] Yabushita H. Characterization of human atherosclerosis by optical coherence tomography [J]. *Circulation* 2002, 106(13): 1640-1645.
- [21] Tearney GJ, 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.
- [22] 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.
- [23] Li L, Dmytriw AA, 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.
- [24] di Vito L, Agozzino M, Marco V, et al. Identification and quantification of macrophage presence in coronary atherosclerotic plaques by optical coherence tomography [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2015, 16(7): 807-813.
- [25] Macneill BD, Jang IK, Bouma BE, et al. Focal and multi-focal plaque macrophage distributions in patients with acute and stable presentations of coronary artery disease [J]. *J Am Coll Cardiol* 2004, 44(5): 972-979.
- [26] Jackson R, Al-Hussaini A, Joseph S, et al. Spontaneous coronary artery dissection: pathophysiological insights from optical coherence tomography [J]. *JACC Cardiovasc Imaging* 2019, 12(12): 2475-2488.
- [27] Ong DS, Lee JS, Soeda T, et al. Coronary calcification and plaque vulnerability: an optical coherence tomographic study [J]. *Circ Cardiovasc Imaging* 2016, 9(1): e003929.
- [28] 施璇, 许晓慧, 黄菲虹, 等. 光学相干断层成像技术在脑血管造影评估中的应用 [J]. *中华神经科杂志*, 2018, 51(12): 1012-1016.
- [29] 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.
- [30] Shi X, Gao J, Lv Q, et al. Calcification in atherosclerotic plaque vulnerability: friend or foe? [J]. *Front Physiol*, 2020, 11: 56.
- [31] Lee T, Yonetsu T, Koura K, et al. Impact of coronary plaque morphology assessed by optical coherence tomography on cardiac troponin elevation in patients with elective stent implantation [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2011, 4(4): 378-386.
- [32] Soeda T, Uemura S, Park SJ, et al. Incidence and clinical significance of poststent optical coherence tomography findings: one-year follow-up study from a multicenter registry [J]. *Circulation* 2015, 132(11): 1020-1029.
- [33] Jones MR, Attizzani GF, Given CA 2nd, 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.
- [34] Park AE, McCarthy WJ, Pearce WH, et al. Carotid plaque morphology correlates with presenting symptomatology [J]. *J Vasc Surg* 1998, 27(5): 872-879.
- [35] Kamtchum-Tatuene J, Noubiap JJ, Wilman AH, et al. Prevalence of high-risk plaques and risk of stroke in patients with asymptomatic carotid stenosis: a Meta-analysis [J]. *JAMA Neurol* 2020, 77(12): 1524-1535.
- [36] Shlofmitz E, Ali ZA, Maehara A, et al. Intravascular imaging-guided percutaneous coronary intervention: a universal approach for optimization of stent implantation [J]. *Circ Cardiovasc Interv* 2020, 13(12): e008686.
- [37] Sheth TN, Kajander OA, Lavi S, et al. Optical coherence tomography-guided percutaneous coronary intervention in ST-segment-elevation myocardial infarction: a prospective propensity-matched cohort of the thrombectomy versus percutaneous coronary intervention alone trial [J]. *Circ Cardiovasc Interv* 2016, 9(4): e003414.
- [38] 中华医学会心血管病学分会介入心脏病学组, 心血管病影像学组. 光学相干断层成像技术在冠心病介入诊疗领域的应用中国专家建议 [J]. *中华心血管病杂志*, 2017, 45(1): 5-12.
- [39] de Donato G, Setacci F, Sirignano P, et al. Optical coherence tomography after carotid stenting: rate of stent malapposition, plaque prolapse and fibrous cap rupture according to stent design [J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 2013, 45(6): 579-587.
- [40] Harada K, Oshikata S, Kajihara M. Optical coherence tomography evaluation of tissue prolapse after carotid artery stenting using closed cell design stents for unstable plaque [J]. *J Neurointerv Surg* 2018, 10(3): 229-234.
- [41] Kawamori H, Shite J, Shinke T, et al. Natural consequence of post-intervention stent malapposition, thrombus, tissue prolapse, and dissection assessed by optical coherence

- tomography at mid-term follow-up [J]. *Euro Heart J Cardiovasc Imaging* 2013, 14(9): 865-875.
- [42] Funatsu N, Enomoto Y, Egashira Y, et al. Tissue protrusion with attenuation is associated with ischemic brain lesions after carotid artery stenting [J]. *Stroke*, 2020, 51(1): 327-330.
- [43] 郭志良, 俞书红, 陈昕, 等. 应用光学相关断层成像快速诊断颈动脉支架内血栓一例 [J]. *中华神经科杂志*, 2016, 49(3): 247-248
- [44] Kobayashi N, Hata N, Okazaki H, et al. Longitudinal stent deformation as a cause of very late stent thrombosis: optical coherence tomography images [J]. *Int J Cardiol*, 2016, 202: 601-603.
- [45] Bechiri MY, Souteyrand G, Lefèvre T, et al. Characteristics of stent thrombosis in bifurcation lesions analysed by optical coherence tomography [J]. *EuroIntervention*, 2018, 13(18): 2174-2181.
- [46] Im E, Hong SJ, Ahn CM, et al. Long-term clinical outcomes of late stent malapposition detected by optical coherence tomography after drug-eluting stent implantation [J]. *J Am Heart Assoc* 2019, 8(7): e011817.
- [47] Hashikata T, Tojo T, Namba S, et al. Neointimal coverage of zotarolimus-eluting stent at 1, 2, and 3 months' follow-up: an optical coherence tomography study [J]. *Heart Vessels* 2014, 31(2): 206-211.
- [48] Lee R, Foin N, Ng J, et al. Early coverage of drug-eluting stents analysed by optical coherence tomography: evidence of the impact of stent apposition and strut characteristics on the neointimal healing process [J]. *EuroIntervention*, 2016, 12(5): e605-e614.
- [49] Gonzalo N, Serruys PW, Okamura T, et al. Optical coherence tomography patterns of stent restenosis [J]. *Am Heart J* 2009, 158(2): 284-293.
- [50] Barnett HJ, Taylor DW, Eliasziw M, et al. Benefit of carotid endarterectomy in patients with symptomatic moderate or severe stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators [J]. *N Engl J Med*, 1998, 339(20): 1415-1425.
- [51] Souteyrand G, Amabile N, Mangin L, et al. Mechanisms of stent thrombosis analysed by optical coherence tomography: insights from the national PESTO French registry [J]. *Eur Heart J* 2016, 37(15): 1208-1216.
- [52] Guagliumi G, Sirbu V, Musumeci G, et al. Examination of the in vivo mechanisms of late drug-eluting stent thrombosis: findings from optical coherence tomography and intravascular ultrasound imaging [J]. *JACC Cardiovasc Interv* 2012, 5(1): 12-20.
- [53] Taniwaki M, Radu MD, Zaugg S, et al. Mechanisms of very late drug-eluting stent thrombosis assessed by optical coherence tomography clinical perspective [J]. *Circulation*, 2016, 133(7): 650-660.

(收稿日期: 2021-08-07)

(本文编辑: 罗春梅)

(上接第 23 页)

- [18] Muacevic A, Steiger HJ. Computer-assisted resection of cerebral arteriovenous malformations [J]. *Neurosurgery*, 1999, 45(5): 1164-1170.
- [19] Gerard IJ, Kersten-Oertel M, Petrecca K, et al. Brain shift in neuronavigation of brain tumors: a review [J]. *Med Image Anal* 2017, 35: 403-420.
- [20] Feng C, Huang S, Chen L, et al. Real-time ultrasound-guided external intracerebral hemorrhage drain placement [J]. *Mil Med Res* 2020, 7(1): 32.
- [21] Policicchio D, Doda A, Sgaramella E, et al. Ultrasound-guided brain surgery: echographic visibility of different pathologies and surgical applications in neurosurgical routine [J]. *Acta Neurochir (Wien)* 2018, 160(6): 1175-1185.
- [22] Liang B, Feng D, Lyon KA, et al. Intraoperative utilization of microvascular Doppler for the detection of intracranial venous structures during tumor resection—a technical note [J]. *J Clin Neurosci* 2021, 88: 10-15.
- [23] Kurihara H, Yamaguchi K, Ishikawa T, et al. Direct double bypass using the posterior auricular artery as initial surgery for moyamoya disease: technical note [J]. *J Neurosurg*, 2020, 133(4): 1168-1171.
- [24] Kapsalaki EZ, Lee GP, Robinson JS 3rd, et al. The role of intraoperative micro-Doppler ultrasound in verifying proper clip placement in intracranial aneurysm surgery [J]. *J Clin Neurosci* 2008, 15(2): 153-157.
- [25] Josephson CB, Bhattacharya JJ, Counsell CE, et al. Seizure risk with AVM treatment or conservative management: prospective, population-based study [J]. *Neurology*, 2012, 79(6): 500-507.
- [26] Benson JC, Chiu S, Flemming K, et al. MR characteristics of unruptured intracranial arteriovenous malformations associated with seizure as initial clinical presentation [J]. *J Neurointerv Surg* 2020, 12(2): 186-191.

(收稿日期: 2021-08-28)

(本文编辑: 王燕华)