DOI:10.13210/j.cnki.jhmu.20210621.001
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1049.R.20210621.1007.002.html

光学相干断层扫描技术在缺血性脑卒中评估中的应用进展

许定绩,赵振强,蔡 毅✉
(海南医学院第一附属医院神经内科,海南 海口 570102)

[摘要] 缺血性脑卒中有较高发病率、致死率、致残率、复发率的特点,是当前严重威胁我国人口健康的主要疾病之一,而其发病原因、发病机制、反应机制一直是研究的热点和难点,相关研究表明光学相干断层扫描技术是评估缺血性脑卒中的有效措施。光学相干断层扫描技术是近年来逐渐发展成熟的影像学技术,在颈内动脉、视网膜、冠状动脉上有着相关研究。基于上述背景,本文通过概述光学相干断层扫描技术在缺血性脑卒中的发病原因、发病机制、反应机制等方面进行评估的研究进展。

[关键词] 光学相干断层扫描;缺血性脑卒中;应用进展
[中图分类号] R743.3 [文献标识码] A [文章编号] 1007-1237(2022)23-1829-06

Advances in the application of optical coherence tomography in the assessment of ischemic stroke

XU Ding-ji, ZHAO Zhen-qiang, CAI yi✉
(*Department of Neurology, the First Affiliated Hospital of Hainan Medical University, Haikou* 570102, *China*)

[*Foundation Project*]: *This study was supported by National Natural Science Foundation of China*(81860238) *and Key R&D Project of Hainan Province*(*ZDYF*2018233)

[*Author*]:*XU Ding-ji*, *E-mail*:949413571@*qq.com*.
[*Correspondence to*]:*CAI Yi*, *Professor*, *Chief Physician*, *Doctoral Supervisor*, *E-mail*: *caiyi*66817616@163.*com*.

Received: 2021-04-20 *Revised*: 2021-06-17 *JHMU*, 2022;28(23):1829-1834

View from specialist: It is creative, and of certain scientific and educational value.

[ABSTRACT] Ischemic stroke has high morbidity, mortality, disability rate and recurrence. It is the one of the main diseases that threaten people's health in China. Its etiology, pathogenesis, and reaction mechanism has been the research hotspot and difficulty of related studies have shown that the optical coherence tomography technology is an effective measure to evaluate ischemic cerebral apoplexy.Optical coherence tomography (OCT) is a gradually developed and mature imaging technology in recent years, and there are related studies on internal carotid artery, retina and coronary artery.Based on the above background, this paper reviews the research progress of optical coherence tomography in the assessment of the etiology, pathogenesis and response mechanism of ischemic stroke.

[KEYWORDS] Optical coherence tomography; Ischemic stroke; Progress of application

脑卒中(cerebral stroke)又称“中风”,具有两个完全不同的主要类别,包括出血和缺血。其中大脑实质中的血液积聚并压迫邻近的脑实质,则定义为出血。而血液流动不足,不能满足大脑组织对氧气和营养物质的需求,则定义为缺血。缺血脑卒中是由于血液凝块导致流向大脑的血液中断而造成的,导致患者活动能力下降、认知能力下降和感觉障碍[1]。脑卒中不仅有较高发病率、致死率、致残率、复发率特点,而且缺血性中风占80%以上,因此,每年全球有1 500万患者受其影响[2,3]。光学相干断层扫描技术(optical coherence tomography,OCT)是近年来迅速发展的一种可精确定位的、无创的技术,该技术可提供绝对、定量的血流动力学指标和细胞状态标志物进而监测脑缺血性损伤和恢复[4]。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(81860238);海南省重点研发计划项目(ZDYF2018233)
[作者简介] 许定绩,E-mail:949413571@qq.com。
[通讯作者] 蔡毅,教授,主任医师,博士生导师,E-mail:caiyi66817616@163.com。
[收稿日期] 2021-04-21 [修回日期] 2021-06-17 网络出版时间:2021-06-21 11:41:14

目前临床上OCT已经逐渐开展，在应用颈动脉方面，其能更详细地评估颈动脉斑块形态和支架放置[5-7]；在应用冠状动脉方面，能够评估冠状动脉粥样硬化斑块病理生理学和体内损伤形态异常，有助于治疗选择及预后[8]；在应用视网膜方面，能够探测视网膜深层血流信号和高分辨力的情况，有利于检测糖尿病眼底微循环情况等多领域研究[9-12]。关于缺血性脑卒中，OCT在缺血性脑卒中病因、发病机制、反应机制等方面有相关研究，为诊断、治疗、预后判断提供科学依据。因此，本文主要针对OCT在缺血性脑卒中评估的应用进展进行综述。

1 缺血性脑卒中的传统影像学检查

颅内血管疾病传统影像学检查包括数字减影血管造影（digital subtraction angiography，DSA）、计算机断层扫描血管造影（computed tomography angiography，CTA）、磁共振血管造影（magnetic resonance angiography，MRA）、多普勒超声（duplex ultrasound，DUS）。DSA是诊断颅内血管疾病的金标准，有着较高的敏感性、特异性、准确性，但存在X射线照射的缺点。CTA通过优化X射线照射，提供了三维可视化，但在评价血流速度方面效率低下。MRA是另一种方法，具有高精度和高分辨率，有助于易损斑块的定性，但设备成本高，不易在任何地方获得。DUS成本低，但其效率依赖于操作者技术及经验。因此，对于进行DSA及CTA检查的患者来说，缺点为辐射暴露和造影剂使用相关风险（如过敏反应、造影剂肾病）可能导致不良反应。对于进行MRA检查患者来说，禁忌证为患者体内有安装相关金属支架，患有幽闭恐惧症及有对比剂相关不良反应的患者均无法进行检查。关于DUS的检查，缺点要求需要经过培训的人员来执行和解释颅内外血管疾病的存在[13]。

2 OCT的特点及优势

1991年，Huang等人开发了OCT，他首先在体外演示了该技术及其在人类视网膜和冠状动脉上的应用。在视网膜上，OCT显示人眼视网膜和视盘的图像。OCT图像的形态学特征与组织学结果直接对应。摘除角膜和晶状体后进行OCT扫描，简化光束定位。在人体眼睛中，同样的测量可以通过光束定位系统进行，类似于用于扫描激光检眼镜的系统。OCT对视网膜和视盘的成像具有比临床超声或共聚焦扫描系统更高的深度分辨率。它提供了重要视网膜结构的轮廓和厚度的信息，可以作为新的临床诊断依据的基础。在冠状动脉上，冠状动脉壁是可以通过OCT检查的临床重要组织。激光血管成形术和其他技术用于清除心脏和其他器官的血管阻塞，但由于对生理和病理组织的分辨不佳而受到限制。然而OCT提供了一种在开放手术和导管为基础的血管手术中探查血管壁的方法[14]。使用OCT生成的横截面图像利用了血管壁结构的后向散射光。该技术基本原理是人体内的各种生物组织具有不同的光学指数，因此血管壁内不同组织层将以不同的振幅反射光。光学分束器将来自激光器的光分为参考光和样品光。样品光和参考光的后向反射光被合并在一起，既可以是建设性的，也可以是破坏性的。具有血管壁空间分辨率为10～15 mm及容器壁穿透深度约为3 mm的功能[15]。

与传统血管成像技术相比，OCT主要优势在于：（1）能够提供血管腔壁、腔内血栓、动脉瘤壁的高分辨率图像，并与组织学切片具有良好的相关性；（2）能够评估支架错位、内膜渗漏和穿通动脉位置的能力；（3）准确评估血管直径，选择和放置理想的支架[16]。美国食品和药物管理局（FDA）于2010年批准使用血管内OCT诊断和治疗心血管疾病。介入神经放射学专门诊断和治疗中枢神经系统的血管疾病，主要包括颈动脉粥样硬化性疾病、继发于大血管闭塞的急性缺血性中风。通过微创技术治疗血管疾病而不需要开放性手术的吸引力已经导致了持续技术创新和设备开发。血管内OCT成像在神经介入放射学领域的应用似乎是自然而然的[15]。

3 OCT在缺血性脑卒中诊治中的应用

OCT成像技术是近年来出现的新型成像技术，为缺血性脑卒中的诊治开创了新的篇章。对于缺血性脑卒中而言，OCT成像技术主要注重脑卒中后病因、发病机制、反应机制等详细综合研究评估。

3.1 脑卒中后病因

关于缺血性脑卒中发生后，如何快速及精准的寻找病因为极为重要。OCT成像技术能够在缺血性脑卒中后进行病因监测，主要是对椎基底动脉狭窄和椎基底动脉夹层的两种颅内血管疾病中有相关研究报道，以下逐一分析。

3.1.1 椎基底动脉狭窄评估 关于缺血性卒中，约1/3的缺血性脑梗死发生于椎基底动脉系统，椎基底动脉狭窄或闭塞是导致后循环卒中一个重要原因[17]。症状性颅内椎基底动脉狭窄（直径缩小≥50%）患者早期卒中复发风险较高，在首次卒中或短暂性脑缺血发作后90 d内达到33%。对于传统影像学技术，OCT具有高分辨率（10～20 μm），已被证明在冠状动脉系统中很有用，并且在颅外颈动脉

中更常用于识别易损斑块、评估支架与血管的相互作用以及识别边缘剥离。

有相关研究显示,运用OCT血管成像技术能清楚地描述颅内椎基底动脉狭窄的形态特征,该特征包括纤维斑块、腔内血栓、混合斑块、血管剥离、纤维帽薄、巨噬细胞聚集、富脂斑块破裂、各种钙化、斑块侵蚀等。通过OCT血管成像技术鉴别这些特征,指导颅内椎基底动脉狭窄的内科治疗和血管成形术及支架植入术内治疗[18]。尽管OCT血管成像能够检测血管壁的显微结构和病理特征,但其在颅内动脉的应用仍受到一定的限制。

这些限制有以下几方面,首先,颅内动脉的弯曲可能会限制成像导管的前进,多次试图穿过颅内动脉的弯曲可能会导致导管破裂和血管损伤。其次,由于血管的弯曲,可能影响成像质量,相关的伪影包括不均匀的旋转变形和不理想的血管冲洗。最后,血管病变清除后,脱落栓子可能导致远端栓塞。为解决上述问题,实现OCT在颅内血管系统的广泛应用,通过优化OCT成像导管(外形更小,硬度更软)且可以并通过微导管插入,从而安全、灵活地通过颅内动脉迂曲,获得的视野可以对血管壁进行更完整的成像,特别是对脑动脉瘤。因此,利用OCT技术观察狭窄可为今后的研究提供更多的研究工具和数据,为颅内椎基底动脉治疗提供新的研究视角[19]。

3.1.2 椎基底动脉夹层评估 椎基底动脉夹层(vertebrobasilar artery dissection,VAD)是指各种原因导致的椎动脉或基底动脉内膜撕裂,血液通过破损内膜进入血管壁而形成血肿,或动脉壁内自发性血肿,致使血管狭窄、闭塞或破裂的一种疾病,其可引起脑组织血液灌注不足、血栓形成及假性动脉瘤的形成,从而出现颅脑缺血、脑干压迫症状及蛛网膜下腔出血(subarachnoid hemorrhage,SAH)等[20]。有研究显示,对于颅内动脉夹层(IAD)的患者,常难于明确诊断,通常需要多模态成像技术来证实诊断。基于传统血管造影、计算机断层扫描或磁共振成像技术,利用OCT更好显示IAD的特征,可以观察再狭窄的病理变化,确定再狭窄的诊断结果显示基底动脉(BA)剥离,并有残余横皮瓣、双腔及壁血肿。在多个层面的影像学检查发现内膜破裂起源于右侧椎动脉,并向远端延伸至BA。OCT血管内成像的应用使IAD的诊断更加准确,但应小心操作,因为可能会给患者增加额外风险。因此,OCT在IAD中的安全性有待进一步提高[21]。

基于上述OCT成像技术对缺血性脑卒中后病因检查的相关研究显示,OCT成像技术对于缺血性脑卒中患有基底动脉狭窄及夹层的患者来说,能够尽早地运用该技术去评估、诊断、治疗、预后等,能让患者早期得到病因治疗、快速康复,防止相关的并发症出现及危及患者的生命安全。因此,OCT成像技术对缺血性脑卒中后病因检查需要不断发展、改进及临床运用。

3.2 脑卒中后发病机制

关于缺血性脑卒中后发病机制的监测,OCT成像技术有着越来越重要的作用。有相关研究报道显示,不仅能够监测血管血栓切除术后的内皮细胞变化,而且还能观察到血栓形成、脑血管血流量及灌注的作用。

3.2.1 基底动脉血栓切除术后及血栓形成评估

关于对基底动脉血管内血栓切除术后的血管内结构观察,相关研究显示MR成像和动物组织病理学可以观察到血管内血栓切除术(EVT)后内皮损伤。然而传统影像学技术有局限性,因为MR成像没有足够的空间分辨率来直接显示内皮细胞,组织病理学检查是在体外进行的,无法提供损伤的实时模式。有相关研究结论显示通过OCT获得EVT术后的腔内成像,可实时监测内皮损伤的证据,并且安全可靠,能产生横截面图像,显示血管内血栓切除术患者的内皮损伤及动脉粥样硬化。EVT后可能存在明显的残余血栓,这种残余血栓可能会导致进展性卒中,并阻塞重要的基底动脉(BA)穿支[22]。有研究显示,OCT成像对EVT后可以实时准确地定量血管壁损伤,有利于评估缺血性脑卒中的发生[23]。因此,OCT成像技术对血管内血栓切除术的应用可防止进展性脑卒中发生。

有相关动物实验研究显示,对于血栓形成脑卒中,OCT成像技术对提高脑卒中的认识和评估治疗提供了独特的途径。为了系统地研究缺血和组织损伤的复杂机制,OCT成像技术将有助于缺血性卒中等疾病的临床治疗[24]。

3.2.2 脑血管血流量及灌注监测评估 缺血性中风是一种严重的急性神经系统疾病,可引起脑组织的不可逆损伤,对患者生活质量产生巨大影响。当脑的血液中断或减少,使脑组织缺氧,脑细胞在几分钟内开始死亡时,即出现缺血性脑卒中。因此,实时监测脑血流灌注水平有助于了解该病的发病机制。OCT是一种非侵入性方法,可以通过区分运动颗粒和静止组织来显示脑灌注水平,无须使用造影剂,将OCT的应用从单纯的结构成像扩展到功能成像。大脑中动脉闭塞(MCAO)常导致大脑皮

层广泛缺血，其损伤因个体而有很大差异。在临床或基础研究中，比较左右大脑半球往往是判断缺血程度最直观的方法。相关研究显示，应用扫描源光学相干层析成像（SS-OCT）系统对MCAO大鼠全脑微循环进行了长期监测。在缺血期间，对左右大脑半球和全脑的脑灌注水平进行定量和比较，同时记录血管形态和位置的变化。总之，SS-OCT技术具有全脑视野和毛细血管分辨率，是研究脑血管疾病和评估潜在治疗策略的可靠工具[25]。

关于OCT成像技术对脑血管灌注的监测，研究报道脑灌注状态反映脑血管闭塞程度，与缺血后损伤过程密切相关。脑血管灌注密度（CVPD）是指“有血流血管像素数”与“整个血管像素数”比值，是脑血流灌注状态指标。尽管许多成像技术对量化动物脑中的CVPD做出了贡献，但仍具有局限性。磁共振成像（MRI）、正电子发射断层扫描和超声检查可提供动物血管造影的无创和功能相关成像，但其有限的分辨率限制了其对微循环成像的能力。然而OCT血管造影是观察脑血流的可靠工具，能对脑灌注状态进行定性和定量比较全面地评价。研究提出对CVPD的量化是有效的，可以解决OCT血管图像分割过程中信号分布不均匀的问题。MCAO监测结果表明，CVPD可作为评估脑缺血后损伤的有效指标。OCT血管造影对CVPD的监测为研究中风的机制提供了新的见解[26]。

有动物研究显示激光散斑成像（LSI）和可见光光学相干断层扫描（Vis-OCT）来测量大脑中动脉远端闭塞（dMCAO）前后脑血流量、血管形态和氧饱和度的变化。可见光光学相干断层扫描建立在OCT血管造影（OCTA）和光谱OCT的基础上，显示血管造影毛细血管水平的氧饱和度测量。通过结合LSI和Vis-OCT，能够显示dMCAO卒中模型急性阶段的动态变化[27]。

有相关动物研究显示，基于OCT成像提供的内源性光散射信号，用于急性缺血性卒中后血管和细胞对脑损伤的时空动态成像，能够在小鼠模型局灶性脑缺血期间测量血液灌注、血流、红细胞速度和皮质组织内光衰减的变化。因此，多参数OCT成像有助于脑卒中早期缺血性病变的综合评价，在临床前研究中深入探讨缺血性脑损伤的机制，制定治疗策略以改善缺血性中风的预后[28]。

关于上述相关研究显示OCT成像技术能够及时监测缺血性脑卒中后出现发病机制，并且采取相关临床治疗方案及预防，阻止发病机制继发性缺血性脑卒中的发生，避免造成患者症状再次加重，甚至出现危及患者的生命。因此，OCT成像技术对缺血性脑卒中后发病机制监测是一项必不可少的辅助检查项目，希望临床上能够针对缺血性脑卒中的患者进行运用。

3.3 脑卒中后反应机制

缺血性脑卒中后在梗死灶核心周围出现缺血半暗带，主要表现为脑组织修复和微血管再生及功能恢复、脑部出现水肿、侧支循环的出现等相关反应机制，然而OCT成像技术对于缺血性脑卒中后出现相关的反应机制能够进行高分辨力及精确性的观察。

3.3.1 脑组织修复和微血管再生及功能评估 对于缺血性脑卒中的组织修复和微血管再生及功能，有相关研究显示，利用OCT成像技术研究脑卒中后脑实质组织修复和微血管再生及功能。OCT血管造影术提供了很好的对比，以区分缺血性病变和未受影响的脑组织。组织位于大脑皮层较深的区域比浅层区域更容易发生脑缺血，脑组织修复伴随着缺血半暗带的微血管再生。此外，新生的毛细血管网具有高度的方向性，可以优化缺血区的血液灌注，引导新生神经元向病变方向发展。微血管再生的程度及缺血性病变的大小都依赖于梗死的深度，深的毛细血管网比浅的毛细血管网定向性更强，研究表明OCT血管造影显示再生的毛细血管网具有高度的方向性。该技术有利于观察临床缺血性脑卒中患者的脑组织和血管损伤恢复，有助于指导治疗脑卒中的新策略[29]。

对于脑血管阻塞引起的缺血性脑卒中，缺血导致核心区的细胞死亡和脑组织损伤，并在半影区诱导一系列内源性血管和细胞改变。关于脑卒中后反应，相关研究显示OCT成像利用红细胞和脑组织固有的光散射特性，产生具有内源性对比度的图像，是一种无标记、无创、三维、实时监测血管和细胞反应的方法。OCT血管造影（OCTA）和光衰减系数（OAC）成像允许对实验性缺血性脑卒中进行多参数评估，参数包括毛细血管灌注、脑血流和细胞散射。研究发现，光衰减系数与缺血性中风后出现脑组织变性相关，OAC升高可能与星形胶质细胞增多和神经元死亡有关，结果表明OAC升高与脑卒中的星形胶质细胞变化正相关，与神经元反应负相关[30]。

3.3.2 脑水肿评估 缺血性脑卒中出现的脑水肿并发症，有相关研究显示，大脑中动脉阻塞后可导致严重的脑水肿，导致肿胀脑细胞的光学特性发生改变，从而可以被OCT及时探测到脑水肿的变化。

与其他技术检测脑水肿的方法相比,扫描源光学相干层析成像(SS-OCT)能够在活体内进行实时高分辨率成像,是缺血性脑水肿基础研究的理想选择。因此,在相关药物的开发或治疗方案的选择上很有可能发挥重要作用[31]。

3.3.3 脑侧支循环评估 研究显示OCT的成像技术用于检查大脑中动脉闭塞侧支循环情况。在相关研究中,人们越来越认识到软脑膜侧支循环在预防即将发生的缺血性脑卒中的重要性,侧支循环也是预防即将发生的缺血性脑卒中的基于感觉刺激的主要因素。多普勒光学相干断层扫描技术(Doppler optical coherence tomography)(DOCT)已被应用于MCA侧支循环的时空成像,因为它为定量活体血流参数成像(速度、流量、血流方向和成像路径)提供了强有力的工具。对大脑中动脉侧支循环在其血流模式和对刺激的反应方面表现出独特的时空动力学。DOCT技术监测到感觉刺激增强了血流参数,有利于对临床上大动脉缺血性脑卒中的侧支循环的监测、预防、治疗的意义[32]。

在OCT成像技术对于缺血性脑卒中后反应机制的相关研究显示,脑部血管出现缺血性梗死后,在梗死灶周围的半暗带区出现机体保护性反应及相关并发症,OCT成像技术能够很好观察到这些脑卒中后反应机制的情况,从而对于这些反应机制进行病情严重性程度的判断,有利于完善相关治疗方案及预后情况。

4 小结及展望

颅内血管疾病是致使人类残疾、死亡多年的主要疾病之一,目前缺血性脑卒中在颅内血管疾病中最常见,对于缺血性脑卒中的病因、发病机制、反应机制监测,OCT成像技术能够弥补传统成像技术的不足,全面观察动脉狭窄及夹层、基底动脉血栓切除术后内皮细胞、血栓形成、血管血流量及灌注、脑组织修复及微血管再生及功能、脑部侧支循环;同时OCT无须造影剂,避免造影剂引起不良反应;此外,OCT有更高的分辨力、观察到更深的血管内部、更快获得血管成像速度。但是值得注意的是,OCT虽能精确观察颅内血管的结构及病变特征,但有些血管异常会造成成像质量偏差。目前OCT成像技术无法完全替代传统影像技术,但是仍存在较好的推广性,有望克服现有技术的局限。目前OCT成像技术在缺血性脑卒中后病因、发病机制、反应机制在动物及人类上已经有着部分相关研究成果及不断完善技术更新,希望OCT成像技术在颅内血管疾病的治疗及预后方面也有进一步研究,更好地应用于临床。

作者贡献度说明:

许定绩:阅读文献、撰写论文;蔡毅:课题设计及论文校审;赵振强:参与收集文献。

所有作者声明不存在利益冲突关系。

参考文献

1 Lu Y, Lu X, Zhang C, et al. Longitudinal optical coherence tomography imaging of tissue repair and microvasculature regeneration and function after targeted cerebral ischemia[J]. J Biomed Opt, 2020, 25(4): 046002-046002.

2 Krishnamurthi RV, Feigin VL, Forouzanfar MH, et al. Global and regional burden of first-ever ischaemic and haemorrhagic stroke during 1990-2010: Findings from the Global Burden of Disease Study 2010[J]. Lancet Glob Health, 2013, 1(5): e259-e281.

3 Chen XY, Yang WJ, Chu CW, et al. High-resolution magnetic resonance vessel wall imagingof chronic intracranial internal carotid artery occlusion[J]. J Neuroradiol, 2018, 45(5): 336-337.

4 Srinivasan VJ, Mandeville ET, Can A, et al. Multiparametric, longitudinal optical coherence tomography imaging reveals acute injury and chronic recovery in experimental ischemic stroke[J]. PLoS One, 2013, 8(8): e71478.

5 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.

6 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.

7 Harada K, Oshikata S, Kajihara M. Optical coherence tomography evaluation of tissue prolapseafter carotidartery stenting using closed cell design stents for unstable plaque[J]. J Neurointerv Surg, 2018, 10(3), 229-234.

8 郑功慧, 于波. 光学相干断层成像技术在冠状动脉粥样硬化斑块中的应用和进展[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2017, 19(9), 991-993.

9 冯作精, 王静. 光学相干断层扫描血管成像技术在糖尿病视网膜病变诊断中的应用进展[J]. 医疗装备, 2020, 33(14), 203-204.

10 Oberwahrenbrock T, Schippling S, Ringelstein M, et al.

Retinal damage in multiple sclerosisdisease subtypes measured by high-resolution optical coherence tomography[J]. Mult Scler Int, 2012, 2012, 1-10.

11 Oberwahrenbrock T, Ringelstein M, Jentschke S, et al. Retinal ganglion cell and inner plexiform layer thinning in clinically isolated syndrome[J]. Mult Scler Int, 2013, 19(14), 1887-1895.

12 Roth NM, Saidha S, Zimmermann H, et al. Photoreceptor layer thinning in idiopathic Parkinson's disease [J]. Mov Disord, 2014, 29(9), 1163-1170.

13 Saxena A, Ng EYK, Lim ST, et al. Imaging modalities to diagnose carotid artery stenosis: Progress and prospect [J]. Biomed Eng Online, 2019,18(1):66.

14 Huang D, Swanson EA, Lin CP, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035):1178-1181.

15 Pasarikovski CR, Ku JC, Priola SM, et al. Endovascular optical coherence tomography imaging in cerebrovascular disease[J]. J Clin Neurosci, 2020, 80: 30-37.

16 Chen C, Kumar JS, Chen SH, et al. Optical Coherence Tomography[J]. Stroke, 2018, 49(4): 1044-1050.

17 Wang Y, Zhao X, Liu L, et al. Prevalence and outcomes of symptomatic intracranial large artery stenoses and occlusions in China[J]. Stroke, 2014, 45(3): 663-669.

18 Yan L, Dmytriw AA, Yang B, et al. Optical coherence tomography of plaque erosion and thrombus in severe vertebral artery stenosis [J]. Diagnostics, 2021, 11(4): 638.

19 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.

20 Krings T, Choi I. The many faces of intracranial arterial dissections[J]. Interv Neuroradiol, 2010, 16(2): 151-160.

21 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.

22 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, 2020,133(4): 1141-1146.

23 Pasarikovski CR, Keith J, Da Costa L, et al. Optical coherence tomography imaging after endovascular thrombectomy: A novel method for evaluating vascular injury in a swine model[J]. J Neurosurg, 2021, 134(3), 870-877.

24 Yang S, Liu K, Ding H, et al. Longitudinal *in vivo* intrinsic optical imaging of cortical blood perfusion and tissue damage in focal photothrombosis stroke model[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2019, 39(7): 1381-1393.

25 Liu J, Ding N, Yu Y, et al. Whole-brain microcirculation detection after ischemic stroke based on swept-source optical coherence tomography [J]. J Biophotonics, 2019, 12(10):e201900122.

26 Ma Z, Ding N, Yu Y, et al. Quantification of cerebral vascular perfusion density *via* optical coherence tomography based on locally adaptive regional growth[J]. Appl Opt, 2018, 57(35): 10117.

27 Liu Q, Chen S, Soetikno B, et al. Monitoring acute stroke in mouse model using laser speckle imaging-guided visible-light optical coherence tomography[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2018, 65(10): 2136-2142.

28 Choi WJ, Li Y, Wang RK, et al. Monitoring acute stroke progression: Multi-parametric oct imaging of cortical perfusion, flow, and tissue scattering in a mouse model of permanent focal ischemia[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2019, 38(6): 1427-1437.

29 Lu Y, Lu X, Zhang C, et al. Longitudinal optical coherence tomography imaging of tissue repair and microvasculature regeneration and function after targeted cerebral ischemia[J]. J Biomed Opt, 2020,25(4): 1-15.

30 Yang S, Liu K, Yao L, et al. Correlation of optical attenuation coefficient estimated using optical coherence tomography with changes in astrocytes and neurons in a chronic photothrombosis stroke model[J]. Biomed Opt Express, 2019,10(12): 6258.

31 Liu J, Li Y, Yu Y, et al. Cerebral edema detection in vivo after middle cerebral artery occlusion using swept-source optical coherence tomography [J]. Neurophotonics, 2019, 6(4): 1.

32 Zhu J, Hancock AM, QiL, et al. Spatiotemporal dynamics of pial collateral blood flow following permanent middle cerebral artery occlusion in a rat model of sensory-based protection: A Doppler optical coherence tomography study[J]. Neurophotonics, 2019, 6(4): 1.

[本文编辑] 邹 洲 宋睿璞 朱金月