

不同模态影像在颈动脉狭窄诊断及手术评估的应用进展^{*}

苑万众 综述 王 涛^{**} 审校

(北京大学第三医院神经外科, 北京 100191)

文献标识: A 文章编号: 1009-6604(2019)09-0838-05

doi:10.3969/j.issn.1009-6604.2019.09.017

缺血性脑卒中已成为国人死亡的首要原因^[1], 颈动脉内膜切除术(carotid endarterectomy, CEA)治疗动脉粥样硬化引起的颈动脉狭窄有效且安全^[2,3], 而颈动脉狭窄率的准确诊断是后续外科处理的关键。不同医学影像技术根据其成像原理不同, 所提供的影像信息是有限的, 即单模态成像。随着医学影像诊断技术的不断提高, 针对狭窄率的诊断, 临床上一一般需要采用多模态成像^[4], 即进行多种不同模态成像, 亦或一种模态的多次成像, 使计算机辅助诊断颈动脉狭窄方面获得更加详细的信息。影像融合(image fusion)是利用计算机技术将不同模态影像学检查所获信息进行系统处理, 多元化数据协同应用, 同时融合各种检查方法的优势, 以达到诊断目的。可供融合的针对颈动脉狭窄的影像学技术有多普勒超声、CT 血管成像(CT angiography, CTA)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)及数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)。本文就颈动脉狭窄诊断相关的不同模态医学影像学现状与进展进行综述。

1 不同模态神经系统影像技术对 CEA 的指导作用

1.1 多普勒超声

多普勒超声作为一种便捷、无创、直观且高敏感性的辅助检查, 已经成为评估颈动脉狭窄程度的首选筛查方法^[5]。2012 年 Stroke 杂志发表了国际公认的描述颈动脉狭窄程度的超声标准^[6]: 采用北美症状性颈动脉内膜切除试验(North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trail, NASCET)测量标准, 中度狭窄定义为颈动脉狭窄率 50% ~ 69%, 重度狭窄定义为颈动脉狭窄率 > 70%。

在 CEA 术前, 颈动脉多普勒超声的指导意义重大^[6]。欧洲血管外科学会(European Society for Vascular Surgery, ESVS)2017 年指南指出^[7]: 狭窄率 < 50% 的患者, 均不为 CEA 手术最佳适应人群; 6 个月内发作过短暂性脑缺血发作(transient ischemic attack, TIA)或缺血性脑卒中, 且同侧狭窄率 50% ~ 69% 的患者, 建议依据具体情况决定是否实施 CEA; 狭窄率 > 70% 的无症状患者, 以及 6 个月内有过 TIA 或缺血性脑卒中, 且同侧颈动脉狭窄率 70% ~ 99% 的患者, 是 CEA 手术的绝对适应证。不仅如此, Attigah 等^[8]的研究显示, 多普勒超声可检测颈动脉狭窄处的交叉血流, 其对预测 CEA 术中颈动脉夹闭期间脑缺血的敏感性为 88.9%, 特异性为 61.1%, 在术前无交叉血流的情况下术中发生缺血的风险会高出 12 倍($OR = 12.6$, 95% $CI: 3.7 \sim 43.3$), 这对 CEA 术前评估术中动脉夹闭期间脑缺血风险及术中是否需要转流有提示作用。

在 CEA 术中, 多普勒超声也有一定指导作用。经颅多普勒超声(transcranial Doppler, TCD)可在术中用于测量大脑中动脉流速(middle cerebral artery flow velocity, MCAV)和脑微栓子信号(microembolic signal, MES)以检测 CEA 术中栓塞事件, 在 CEA 术后预测围手术期卒中时具有 72.7% (95% $CI: 61.2\% \sim 81.8\%$) 的特异性和 56.1% (95% $CI: 46.8\% \sim 65.0\%$) 的敏感性, 且 MCAV 与 MES 相比表现出 84.1% (95% $CI: 74.4\% \sim 90.6\%$) 的强特异性, 可用于预测 CEA 术后的脑卒中^[9]。

颈动脉超声造影的出现, 弥补了既往超声对评价斑块内新生血管水平、早期预测不稳定性斑块方

^{*} 基金项目: 北京市自然科学基金面上项目(7192219); 北京大学第三医院临床重点项目(BYSY2015013)

^{**} 通讯作者, E-mail: tony428@sina.com

面的不足^[10]。狭窄斑块内新生血管数目越多,其破裂出血进而导致卒中的风险越高^[11],颈动脉超声造影恰可利用微泡造影剂在微动脉循环中的流动,清晰地呈现粥样硬化斑块及其内部新生血管,并将其量化分级,从而对斑块易损性、手术时机的判断及缺血性卒中等不良脑血管事件做出可靠评估^[12]。

超声多普勒在 CEA 术前手术指征评估、术中脑缺氧事件的预测及监测、斑块性质评估方面均有指导意义。Mozzini 等^[13]建议,在利用多普勒超声诊断颈动脉狭窄时,应注意结合狭窄血管内收缩期最大流速 (peak systolic velocity, PSV)、Gray-Weale 回声分类、侧支血流量评估等方面,以及术前超声造影分析斑块性状,术中 TCD 监测,真正利用多模态成像指导颈动脉狭窄的诊治。

1.2 CTA

近年来,CTA 在颈动脉狭窄的诊断方面得到广泛应用。CTA 运用容积再现 (volume rendering, VR)、多平面曲面重建 (multiplanar reconstruction and curved planar reformation, MCPR)、最大密度投影 (maximum intensity projection, MIP) 等三维重建技术对狭窄的颈动脉血管进行重建,具备以下优势: ①CTA 能够均衡显示从主动脉弓到颅内的各段血管,成像受颅骨的影响较小。②CTA 横截面图像的高分辨率,加之重建的血管影像,可以使临床医生形象直观地评价颈动脉狭窄情况、狭窄部位与邻近血管的关系及与管腔外的软组织及骨质的关系。③CTA 对颈动脉粥样硬化斑块成分显示及颈动脉狭窄程度的评估,与颈动脉多普勒超声和 DSA 均有较好的一致性^[14],尤其是在显示富含纤维组织斑块和富脂斑块方面有一定优势^[15]。④可以通过双能计算机断层扫描 (dual-energy computed tomography, DECT) 技术,将颅外颈动脉狭窄的钙化影去除,以降低来自钙化斑块的晕染可能导致对狭窄等级的高估^[16]。

总之,CTA 在评价颈动脉狭窄方面所提供的信息准确且全面^[17],不仅可清晰地显示狭窄病变范围及其于邻近血管关系,还可了解斑块的形态,使临床医师在观察狭窄血管的全貌的同时,了解动脉粥样硬化斑块,从而客观评价血管的狭窄或闭塞情况,以及相应脑血管事件发生的危险性。且 CTA 检查无创,很少引起脑血管痉挛。根据 2017 年 EVSV 指南^[7],对于颈动脉狭窄,建议使用 CTA 评估颅内颈动脉狭窄的程度和严重程度,并且为 I a 类推荐,对有创造影仅为 III a 类推荐。

但 CTA 亦有不足。Anderson 等^[18]对 40 例颈动脉狭窄 (80 条颈动脉) 的 CTA 检测和定量与 DSA 进行比较,观察到 CTA 无法可靠区分中度和重度狭

窄,相应的敏感度水平低至 0.65 和 0.73。对此我们认为颈内动脉邻近颅底骨质及自身走行曲折是导致上述现象的主要原因,且 CTA 不能动态观察颈动脉重度狭窄或闭塞之后侧支循环建立的情况以及周围动脉代偿的情况,CTA 也不能提供狭窄血管的血流动力学情况。针对此问题,我们认为,在 CTA 检查同期追加颈动脉高分辨磁共振及多普勒超声,可弥补上述不足。

1.3 MRI

从 20 世纪 90 年代开始,无创性 MRI 技术为诊断颈动脉狭窄提供了重要的非侵入性检查手段,其诊断的安全性、特异性、敏感性和准确性均达到临床要求,且 CEA 术前用颈动脉 MRI 来评估斑块,可使脑缺血并发症的发生率大大降低^[19]。一般临床上使用磁共振血管成像 (magnetic resonance angiography, MRA) 及高分辨磁共振 (high-resolution magnetic resonance imaging, Hr-MRI) 评估颈动脉狭窄。

在 CEA 术前,Hr-MRI 更适于对颈动脉粥样硬化斑块本身进行分析,可以可靠地评估粥样硬化斑块内的出血情况及斑块纤维帽异常,从而评判斑块的稳定性。多个研究显示^[20-23],对于颅外颈动脉粥样硬化斑块,颈动脉 Hr-MRI 对于粥样硬化斑块的形态学,组分 (脂质核心、钙化、出血、基质),纤维帽 (厚型、薄型、破裂型) 等方面的诊断均有较高的敏感性 (85%, 56/66) 和特异性 (92%, 22/24); 且借助动态增强扫描可以较为可靠地了解粥样硬化斑块中新生滋养血管的数量和狭窄血管的通透性,从而间接评价动脉粥样病变的炎性反应程度。Trelles 等^[24]的研究通过受试者工作特征曲线 (receiver operator characteristic curve, ROC 曲线) 显示,软斑块成分厚度阈值为 4.4 mm 时,检测复杂斑块 (斑块内出血、斑块内血栓或血栓纤维帽破裂) 的灵敏度 (65%) 和特异度 (94%) 达到最佳,且术后并发症发生率随着软斑块厚度的增加而增加,所以临床医师可以通过了解斑块内成分、测量斑块厚度,对脑血管事件的发生进行简单评估。不仅如此,MRI 在鉴别不同病因如原发性或继发性中枢神经系统血管炎、颅内血管先天性发育不良、夹层动脉瘤所导致的颈动脉狭窄方面具有重要的意义^[25,26],通常认为动脉粥样硬化性狭窄多表现为管壁偏心性增厚,增强扫描可见不均匀强化。因此,颈动脉 Hr-MRI 是动态观察颈动脉斑块形态学及稳定性变化的最佳检查手段。但是对于颅内动脉粥样硬化斑块组分的研究尚处于探索中,斑块的不同信号强度与临床缺血性卒中事件的发生是否有相关性尚需进一步探讨。

MRA 也常用于 CEA 围术期评估,图像立体感

强,瞬时清晰度良好,使颈动脉狭窄处的成像更为清晰,但非强化的 MRA 特异性较差。其他磁共振技术对于 CEA 手术的指导方面也有重要意义。Tsutsui 等^[27]观察到磁共振波谱成像(magnetic resonance spectroscopy, MRS)的脑温成像技术,增加了在有症状单侧颈动脉狭窄患者的 CEA 术中颈内动脉夹闭期间预测脑半球缺血的准确性,对 CEA 术中血流重建效果有很强的提示性。7T MR 定量磁敏度图谱(7T MR quantitative susceptibility mapping)所产生的术前氧气提取分数成像能够较为准确识别 CEA 术后脑灌注过高者^[28],这对于 CEA 围术期高灌注的调控有很大的指导意义。

总之, MRI 对术前颈动脉狭窄的鉴别诊断、狭窄斑块性质有指导意义,但亦不能提供狭窄处血流动力学信息。所以,对于无创性检查手段,我们不建议以单一方法作为术前影像标准(容易造成手术适应证扩大),应综合考量不同模态成像的信息。无论何种检查方法,特别强调不应只进行颈动脉检查,其他脑供血动脉和颅内血管也必须检查并予以评价。

1.4 DSA

DSA 是通过电子计算机进行辅助成像的血管造影方法,不仅能准确提供脑血管病变的确切部位,而且能清楚了解病变范围及严重程度。虽然 CTA 及 MRA 等无创检查已得到充分肯定,但很长时间以来 DSA 仍是诊断颈动脉狭窄的“金标准”。

在 CEA 术前, DSA 可以清楚地显示颅内外动脉管腔狭窄、颅内外脑血流的代偿、侧支循环建立等情况。不仅如此, Lownie 等^[29]对 102 例 CEA 术前行 DSA 检查所获得的解剖学特征进行研究,并用其预测的颈动脉残端压力(用作侧支血流的替代指标)与 CEA 术中临时颈内动脉夹闭期间的颈动脉残端压力比较,两者具有相关性($P < 0.0001$, $r^2 = 0.34$),这对在 CEA 术前评估术中动脉夹闭期间颅内侧支循环情况具有指导作用。

在 CEA 术中, DSA 亦可在血管缝合过程中使用,可以有效检出血运重建后出现颈动脉内膜瓣清除不净、残留斑块、血管内血栓形成、残余管腔狭窄及缝合原因导致的血管扭转等血管异常。Wieker 等^[30]在 827 例 CEA 术中完善血管造影,由于出现上述血管异常而进行手术翻修率为 6.9% (57/827),这些血管异常可导致脑栓塞,有严重致残甚至致命风险。

但 DSA 也存在一定的局限性:① DSA 属于有创性检查,通常较少用于单独诊断,不能作为 CEA 术前首选检查。造影剂注射使检查后并发症较多,除了可产生低血压、皮疹、胸闷外,还可能导致神经血管副反应及肾功能损伤。对于严重并发症, Connors

等^[31]总结多项试验,认为 DSA 检查有 0.3% ~ 5.7% 的致残率和 <0.1% 的病死率。② DSA 对于斑块的显示及其性状的提示作用十分有限。③ DSA 操作复杂,需要高水平操作人员;患者依从性较差;与多普勒超声、CTA 及 MR 相比, DSA 检查费用昂贵。

尽管 DSA 仍是诊断颈动脉狭窄的“金标准”,但随着 CTA、MRI 等成像技术的提高,我们建议首先考虑无创检查提供初步诊断资料,必要时再行 DSA 检查。

2 多模态影像融合技术在颈动脉狭窄诊断中的应用

影像融合技术目前在颈动脉狭窄的诊疗过程中应用较少。目前, SPM、DtiStudio、iPlan 等医学计算机软件均能通过影像边缘的特征来实现影像融合,但影像边缘的处理精度不够。周涛等^[32]建议使用不可分离的小波变换进行多模态医学影像融合,使融合后的信息更有可借鉴性,但目前尚无统一的医学影像融合技术准则,相同的影像资料在融合时亦存在争议。

多模态影像融合技术在颈动脉狭窄诊断及对 CEA 手术指导方面的研究、应用仍然较少。方慧等^[33]将 Hr-MRI、MRA 及磁共振弥散成像(diffusion weighted imaging, DWI)的多模态 MRI 成像技术,与三维血流定量测量(three dimensional quantitative flow measurement, 3D QFlow measurement)相结合,可显示颈动脉狭窄所致的颈内动脉血流量减低及供血脑区的低灌注损伤, QFlow 技术亦能较准确评价颈内动脉血流动力学变化; Vesey 等^[34]的综述认为,通过将 Hr-MR 成像的多功能性和对斑块的优越成像能力,以及 PET-CT 对血管成像的灵敏度和生物分子灵活性相融合,可为临床医师提供更加详细的颈动脉粥样硬化斑块的多参数信息。这些研究间接通过上述融合技术获得的颈动脉狭窄血流动力学指标、斑块参数及脑灌注情况等信息,为颈动脉狭窄的诊疗提供帮助。

3 小结

理想的颈动脉狭窄的术前诊断方法应具有无创、易行、高敏感性、特异性且价格合理等特点,且对 CEA 手术具备一定的指导作用。目前还没有一种检查能够可靠且全面地做到,但不同模态成像有不同的优点和作用。因此,我们建议, CEA 术前需要根据术者技术及医院条件,对颈动脉狭窄患者常规实施颈动脉多普勒超声、CTA 及 MRI 成像,必要时行 DSA,通过不同模态成像的术前综合评估,以

在颈动脉狭窄的术前诊断、狭窄部位详情(狭窄率及血流动力学指标)、斑块性质评估、CEA 术中指导方面提供有价值的参考。

目前,多模态影像融合技术在 CEA 的应用较少,在继续探寻更全面的方法的同时,现有的技术应做到:①筛选具备 CEA 手术指征的病例。根据国内外指南^[7,35],在有症状患者预期围术期卒中发生率和病死率 <6%、无症状患者预期围术期卒中发生率和病死率 <3%、患者预期寿命 >5 年的前提下,多普勒超声、CTA、MRI 等无创检查显示狭窄率 ≥70% 或 DSA 显示狭窄率 >50% 的有症状性颈动脉狭窄为 CEA 手术绝对适应人群;无创检查显示狭窄率 50% ~ 69% 的有症状性颈动脉狭窄患者,以及无创检查狭窄率 ≥70% 且 DSA 显示狭窄率 ≥60%、无创检查狭窄度 <70% 但血管造影或其他检查提示狭窄病变处于不稳定状态的无症状性颈动脉狭窄为 CEA 手术的相对适应证。通常通过无创检查提供诊断信息,必要时再行 DSA。②联合应用不同模态成像解剖结构影像资料。③根据不同模态影像资料进行全面细致的术前评估。④安排规范且个体化的 CEA 手术方案。

参考文献

- 1 陈 竺. 全国第三次死因回顾抽样调查报告. 北京:中国协和医科大学出版社,2008. 10 - 17.
- 2 Brott TG, Howard G, Roubin GS, et al. Long-term results of stenting versus endarterectomy for carotid-artery stenosis. *N Engl J Med*, 2016, 374(11): 1021 - 1031.
- 3 Rosenfield K, Matsumura JS, Chaturvedi S, et al. Randomized trial of stent versus surgery for asymptomatic carotid stenosis. *N Engl J Med*, 2016, 374(11): 1011 - 1020.
- 4 Kuhnt D, Bauer MH, Nimsky C. Brain shift compensation and neurosurgical image fusion using intraoperative MRI: current status and future challenges. *Crit Rev Biomed Eng*, 2012, 40(3): 175 - 185.
- 5 Kristensen T, Hovind P, Iversen HK, et al. Screening with doppler ultrasound for carotid artery stenosis in patients with stroke or transient ischaemic attack. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2017, 38(4): 617 - 621.
- 6 von Reutern GM, Goertler MW, Bornstein NM, et al. Grading carotid stenosis using ultrasonic methods. *Stroke*, 2012, 43(3): 916 - 921.
- 7 Naylor AR, Ricco JB, De Borst GJ, et al. Editor's choice - management of atherosclerotic carotid and vertebral artery disease: 2017 clinical practice guidelines of the European Society for Vascular Surgery (ESVS). *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2018, 55(1): 3 - 81.
- 8 Attigah N, Demirel S, Ringleb P, et al. Cross-flow determination by transcranial Doppler predicts clamping ischemia in patients undergoing carotid endarterectomy. *J Cardiovasc Surg (Torino)*, 2015, 56(3): 417 - 422.
- 9 Udesch R, Natarajan P, Thiagarajan K, et al. Transcranial Doppler monitoring in carotid endarterectomy: a systematic review and meta-

- analysis. *J Ultrasound Med*, 2017, 36(3): 621 - 630.
- 10 Vicenzini E, Giannoni MF, Benedetti-Valentini F, et al. Imaging of carotid plaque angiogenesis. *Cerebrovasc Dis*, 2009, 27(Suppl 2): 48 - 54.
- 11 Kim HS, Woo JS, Kim BY, et al. Biochemical and clinical correlation of intraplaque neovascularization using contrast-enhanced ultrasound of the carotid artery. *Atherosclerosis*, 2014, 233(2): 579 - 583.
- 12 Faggioli GL, Pini R, Mauro R, et al. Identification of carotid 'vulnerable plaque' by contrast-enhanced ultrasonography: correlation with plaque histology, symptoms and cerebral computed tomography. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2011, 41(2): 238 - 248.
- 13 Mozzini C, Roscia G, Casadei A, et al. Searching the perfect ultrasonic classification in assessing carotid artery stenosis: comparison and remarks upon the existing ultrasound criteria. *J Ultrasound*, 2016, 19(2): 83 - 90.
- 14 Silvennoinen HM, Ikonen S, Soine L, et al. CT angiographic analysis of carotid artery stenosis: comparison of manual assessment, semiautomatic vessel analysis, and digital subtraction angiography. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2007, 28(1): 97 - 103.
- 15 Estes JM, Quist WC, Gerfo FW, et al. Noninvasive characterization of plaque morphology using helical computed tomography. *J Cardiovasc Surg (Torino)*, 1998, 39(5): 527 - 534.
- 16 Mannil M, Ramachandran J, Vittoria De Martini I, et al. Modified dual-energy algorithm for calcified plaque removal: evaluation in carotid computed tomography angiography and comparison with digital subtraction angiography. *Invest Radiol*, 2017, 52(11): 680 - 685.
- 17 Coutinho JM, Derkatch S, Potvin AR, et al. Nonstenotic carotid plaque on CT angiography in patients with cryptogenic stroke. *Neurology*, 2016, 87(7): 665 - 672.
- 18 Anderson GB, Ashforth R, Steinke DE, et al. CT angiography for the detection and characterization of carotid artery bifurcation disease. *Stroke*, 2000, 31(9): 2168 - 2174.
- 19 Fukumitsu R, Yoshida K, Kurosaki Y, et al. Short-term results of carotid endarterectomy and stenting after the introduction of carotid magnetic resonance imaging: a single-institution retrospective study. *World Neurosurg*, 2017, 101: 308 - 314.
- 20 Baocheng C, Annette K, Ferguson MS, et al. Hemorrhage in the atherosclerotic carotid plaque: a high-resolution MRI study. *Stroke*, 2004, 35(5): 1079 - 1084.
- 21 Yuan C, Mitsumori LM, Ferguson MS, et al. In vivo accuracy of multispectral magnetic resonance imaging for identifying lipid-rich necrotic cores and intraplaque hemorrhage in advanced human carotid plaques. *Circulation*, 2001, 104(17): 2051 - 2056.
- 22 Yoshida K, Narumi O, Chin M, et al. Characterization of carotid atherosclerosis and detection of soft plaque with use of black-blood MR imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2008, 29(5): 868 - 874.
- 23 Hatsukami TS, Ross R, Polissar NL, et al. Visualization of fibrous cap thickness and rupture in human atherosclerotic carotid plaque in vivo with high-resolution magnetic resonance imaging. *Circulation*, 2000, 102(9): 959 - 964.
- 24 Trelles M, Eberhardt KM, Buchholz M, et al. CTA for screening of complicated atherosclerotic carotid plaque: American Heart Association type VI lesions as defined by MRI. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2013, 34(12): 2331 - 2337.
- 25 Molloy ES, Langford CA. Vasculitis mimics. *Curr Opin Rheumatol*, 2008, 20(1): 29 - 34.

- 26 Benseler SM, deVeber G, Hawkins C, et al. Angiography-negative primary central nervous system vasculitis in children: a newly recognized inflammatory central nervous system disease. *Arthritis Rheum*, 2005, 52(7): 2159 – 2167.
- 27 Tsutsui S, Nanba T, Yoshioka Y, et al. Preoperative brain temperature imaging on proton magnetic resonance spectroscopy predicts hemispheric ischemia during carotid endarterectomy for unilateral carotid stenosis with inadequate collateral blood flow. *Neurol Res*, 2018, 40(8): 617 – 623.
- 28 Nomura JI, Uwano I, Sasaki M, et al. Preoperative cerebral oxygen extraction fraction imaging generated from 7T MR quantitative susceptibility mapping predicts development of cerebral hyperperfusion following carotid endarterectomy. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017, 38(12): 2327 – 2333.
- 29 Lownie SP, Larrazabal R, Kole MK. Circle of Willis collateral during temporary internal carotid artery occlusion I: observations from digital subtraction angiography. *Can J Neurol Sci*, 2016, 43(4): 533 – 537.
- 30 Wieker CM, Harcos K, Ronellenfitsch U, et al. Impact of routine completion angiography on outcome after carotid endarterectomy. *J Vasc Surg*, 2019, 69(3): 824 – 831.
- 31 Connors JJ, Sacks D, Furlan AJ, et al. Training, competency, and credentialing standards for diagnostic cervicocerebral angiography, carotid stenting, and cerebrovascular intervention; a joint statement from the American Academy of Neurology, the American Association of Neurological Surgeons, the American Society of Interventional and Therapeutic Neuroradiology, the American Society of Neuroradiology, the Congress of Neurological Surgeons, the AANS/CNS Cerebrovascular Section, and the Society of Interventional Radiology. *J Vasc Interv Radiol*, 2009, 20(7 Suppl): S292 – S301.
- 32 周涛, 陆惠玲, 陈志强, 等. 多模态医学影像融合识别技术研究进展. *生物医学工程学杂志*, 2013, 30(5): 1117 – 1122.
- 33 方慧, 孟凡伟, 姜洪雁. 颈动脉狭窄致脑低灌注损伤多模态 MRI. *放射学实践*, 2016, 31(4): 350 – 354.
- 34 Vesey AT, Dweck MR, Fayad ZA. Utility of combining PET and MR imaging of carotid plaque. *Neuroimaging Clin N Am*, 2016, 26(1): 55 – 68.
- 35 中华医学会外科学分会血管外科学组. 颈动脉狭窄诊治指南. *中国血管外科杂志(电子版)*, 2017, 9(3): 169 – 175.

(收稿日期: 2019 – 07 – 24)

(修回日期: 2019 – 08 – 15)

(责任编辑: 王惠群)