

## ·综述 General review·

## 脑灌注成像在颈动脉狭窄介入治疗中的应用

王铭义, 王 峰

【摘要】 对于目前临床常用的脑灌注成像检查技术的原理、优缺点及脑灌注成像在颈动脉狭窄介入治疗术前筛选、术后评估及预防并发症等方面的应用进行总结。

【关键词】 颈动脉狭窄; 脑灌注成像; 介入治疗

中图分类号: R743.4 文献标志码: A 文章编号: 1008-794X(2011)-11-0915-05

Application of brain perfusion imaging in interventional treatment of carotid artery stenosis WANG Ming-yi, WANG Feng. Department of Interventional Radiology, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, China

Corresponding author: WANG Feng, E-mail: cjr.wangfeng@vip.163.com

【Abstract】 Brain perfusion imaging has been widely used in clinical practice. This paper aims to summarize the principles and techniques of brain perfusion imaging, to discuss its advantages and disadvantages, and to describe its applications in interventional treatment of carotid artery stenosis, including preoperative screening, postoperative evaluation and prevention of complications. (J Intervent Radiol, 2011, 20: 915-919)

【Key words】 brain perfusion imaging; carotid stenosis; interventional treatment

缺血性脑血管病是一系列由于动脉粥样硬化及血流动力学因素的改变,导致头颈部血管管腔狭窄闭塞而引起的脑血管疾病总称,其发病率、致残率及病死率均较高。其中颈动脉狭窄是缺血性脑卒中发生的主要原因之一,其机制包括栓子脱落导致的栓塞性脑梗死及血流动力学异常造成的低灌注性脑梗死<sup>[1]</sup>。NASCET(North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial)实验显示<sup>[2]</sup>,颈动脉狭窄 70%~79%的患者第 1 年发生脑卒中的风险为 11%,第 2 年发生同侧脑卒中的风险为 26%。颈动脉狭窄  $\geq 90\%$  的患者第 1 年为 35%。近年来,随着医学影像学的发展,通过无创脑血管检查如脑血管超声成像、CT 血管造影(CTA)和磁共振血管造影(MRA),结合数字减影血管造影(DSA)等手段,可获得颈动脉狭窄或闭塞的位置、程度及侧支循环代偿情况等相关信息。然而对于颈动脉狭窄所致的缺血性脑血管病,治疗的根本目的是改善局部缺血脑组织的血流灌注,从而阻止其进展为脑梗死,研究发现,伴有脑血流动力学改变的颈动脉狭窄患者发生脑卒中的危险性明显高于不伴有脑血流动力学

异常的患者<sup>[3,4]</sup>。因此临床上不仅需要了解病变血管的形态学信息,更需要了解受累脑组织的血流灌注情况。脑血流灌注的主要评价指标包括脑血容量(cerebral blood volume, CBV,指一定区域脑组织血管结构内的血容量);脑血流量(cerebral blood flow, CBF,指单位时间内流经一定区域脑组织血管结构的血液量);平均通过时间(mean transit time, MTT,是开始注射对比剂到时间-密度曲线,即 TDC,下降至最高强化值一半时的时间,主要反映对比剂通过毛细血管的时间);达峰时间(time to peak, TTP,指在 TDC 上从对比剂开始出现到对比剂浓度达到峰值的时间,单位为 s)。现对目前临床应用的脑灌注成像检查技术简要陈述如下。

## 1 脑灌注成像检查技术

### 1.1 CT 灌注成像(CT perfusion imaging, CTP)

1.1.1 原理 CTP 是最早应用的影像学功能成像方法之一,其理论基础为核医学的放射性示踪剂稀释原理和中心容积定律,通过经静脉快速注入放射性示踪剂,经左心室射出至靶器官后,对选定的层面行连续多次同层动态扫描,以获得该层面内每一像素的 TDC,曲线反映的是对比剂在脑实质内浓度

的变化,间接反映脑组织血流灌注量的变化,根据该曲线利用不同的数学模型可计算出局部脑组织的 CBF、CBV、MTT、TTP 等参数,以此来评价组织器官的灌注情况。再利用这些参数通过数模转换及图像重建获得参数彩色图像。CTP 使用的数学方法主要有非去卷积法和去卷积法 2 种,目前临床上以去卷积法为主,完成图像采集后,在图像后处理时以下方面需注意:①选择灌注层面,常规应先行头颅平扫,根据平扫后的 CT 图像确定可疑的病变区,结合狭窄血管供血区以确定扫描层面,如无阳性表现,通常选择基底节层面为中心进行扫描,因该层面能显示大脑前、中、后动脉分布区,易于分辨脑灰、白质,并可借助侧脑室进行图像分析。②选择好输入动脉和输出静脉,输入动脉选择灌注层面中主要分支即大脑前、中、后动脉及分支,明确狭窄动脉是否为缺血责任血管;输出静脉多选择上矢状窦。③选择感兴趣区(region of interest, ROI),可选择面积稍大的 ROI 以减少噪声。ROI 的选取尽量避开血管、脑沟及组织器官,以减少部分容积效应的影响。CTP 作为一种反映脑血流动力学功能成像,可以在脑实质的器质性损伤之前发现异常的脑血流灌注<sup>[5-6]</sup>。对于制定缺血性卒中治疗策略有重大临床意义。

**1.1.2 优缺点** 扫描设备简单、经济实用、易普及,无需使用放射性核素及氦气,图像的空间分辨率较高,成像时间短,能够获得 MTT、CBF 等多个脑血流动力学参数,适合急诊患者的检查。随着多层螺旋 CT 的应用,CTP 扫描范围局限问题,已经得到改进,目前主要问题在于检查存在放射性,需快速团注对比剂,部分患者不能耐受,且存在对比剂过敏问题。

## 1.2 磁共振灌注成像(perfusion weighted imaging, PWI)

PWI 是无创性测量脑血流灌注的最新技术,目前依据其成像原理可大致分为 2 种类型<sup>[7]</sup>:动脉自旋标记法成像(arterial spin labeling, ASL)及动态磁敏感对比增强灌注加权成像(dynamic susceptibility contrast-perfusion weighted imaging, DSC-PWI)。

### 1.2.1 ASL

**1.2.1.1 原理:**ASL 法是利用动脉血液中可自由扩散的水质子作为内源性对比剂,使用特殊设计的脉冲序列对流入组织血液质子进行标记、检测以反映组织的血流灌注情况的成像方法。具体做法是在感兴趣的层面之前即用反转或预饱和技术将动脉水中的水分子标记,当其进入感兴趣层面时采集成像,然后在无标记状态下对相同层面成像,将标记

后获得的图像与未标记所获得的图像相减处理后可计算局部脑血流量值,并得到反映该层面灌注情况的 CBF 图。根据标记方法的不同,ASL 又可分为连续性动态自旋标记技术(continuous ASL, CASL)和脉冲式动态自旋标记技术(pulsed ASL, PASL)。CASL 连续式标记感兴趣层面近端动脉血中的质子,被标记的质子连续流入组织中。PASL 则使用选择性的射频脉冲,脉冲式的标记感兴趣层面近端的一定层厚的动脉血液。

**1.2.1.2 优缺点:**完全无创、不需注射对比剂,对于出血、钙化或位于颅底的病变测量数据稳定。但影像信噪比较差,对序列设置要求较高,时间和空间分辨力相对较低,只能对特定感兴趣层面脑组织血流灌注进行评估,且只能获得脑血流量一个参数值。

### 1.2.2 DSC-PWI

**1.2.2.1 原理:**DSC-PWI 是通过静脉快速团注顺磁性对比剂(目前临床上多采用离子型非特异性细胞外液对比剂 Gd-DTPA)后采用快速扫描序列成像,获得对比剂首次通过 ROI 的一系列动态影像,由于对比剂产生的磁化敏感效应而引起局部磁场变化,使临近氢质子共振频率改变, T2 和 T2\* 缩短,使相应脑组织信号降低,在同一层面连续重复快速扫描,可观察到对比剂到达脑组织前、首次通过脑组织及流出脑组织后脑组织的信号改变情况,得出时间-脑组织信号强度曲线从而推导出相对 CBF、CBV、MTT、TTP 等多种参数。结合回波平面成像技术(echo-planar imaging, EPI),通常在 30 ~ 100 ms 内采集一幅完整图像,获得整个大脑成像只需 20 ~ 60 s,大大提高了时间分辨率,实现了覆盖全脑扫描。

**1.2.2.2 优缺点:**无辐射,多层面成像,全面评估脑灌注情况,可提供多参数多范围的信息。但仅能进行参数的半定量分析,此外 EPI 技术所产生顺磁性伪影致颅底成像质量较差,受磁场不均一性影响较大。

## 1.3 其他灌注成像方法

### 1.3.1 颅脑超声灌注成像(ultrasound perfusion imaging, UPI)

**1.3.1.1 原理:**经颅超声灌注成像技术是在微气泡声学对比剂(microbubble ultrasound contrast agents)和谐波成像(harmonic imaging)技术基础上发展起来的。目前最常用的方法是采用静脉弹丸式注射超声对比剂后多数采用弹丸动力学模式,成像技术包括常规的谐波灰阶成像、对比剂爆发成像和时间分散度成像(time variance imaging)等。通过分析时间-强度曲线的各种参数,经数模转换计算出 CBF 值,

评价局部脑灌注情况。与 TCD 并用可进行脑循环灌注的评估<sup>[8]</sup>。

1.3.1.2 优缺点:无放射性、检查方便、可重复、能实时动态观察。但空间分辨率不高,且受操作者手法限制、颞骨易导致的超声衰减,超声伪影。

1.3.2 单光子发射断层扫描(single photo emission comeputed tomography, SPECT)

1.3.2.1 原理:单光子发射断层扫描的基本原理是把能够放出纯粹 $\gamma$ 光子的小分子、不带电荷的脂溶性放射性核素标记物(如 $^{133}\text{Xe}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -ECD、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  HMP-AO、 $^{123}\text{I}$ -IMP等)静脉注射入或吸入受检者体内,此类物质能穿透血脑屏障迅速分布于脑组织内,约1 min达平衡并保持相对稳定,在脑内的聚集量与脑局部血流量(rCBF)成正比,核素浓聚发出 $\gamma$ 射线,由探测器接受,通过信号采集、转换及图像处理得到局部CBF灌注图像。

1.3.2.2 优缺点:可以得到三维信息,操作便捷相对价廉,不仅能进行脑血流灌注显像,还可进行葡萄糖代谢(CMRglu)显像。但空间分辨率较低,目前仅能作rCBF半定量分析,不能提供详细的形态学信息。

1.3.3 正电子发射断层扫描(positron emission tomography, PET)

1.3.3.1 原理:PET利用的核素是放出正电子的核素。常用的脑血流灌注显像剂主要是 $^{15}\text{O}$ - $\text{CO}_2$ 和 $^{15}\text{O}$ - $\text{H}_2\text{O}$ ,主要方法包括:① $^{15}\text{O}$ - $\text{CO}_2$ 吸入法:吸入的 $\text{C}^{15}\text{O}_2$ 与水化合生成 $\text{H}_2^{15}\text{O}$ ,在脑组织内达到动态平衡状态后,单位时间内 $^{15}\text{O}$ - $\text{H}_2\text{O}$ 随动脉血流进入脑组织的量与脑组织内 $\text{H}_2^{15}\text{O}$ 的放射性衰减量和随静脉血洗脱量相等,可计算出rCBF,rCBV。② $^{15}\text{O}$ - $\text{H}_2\text{O}$ 弹丸注射法,使用约6 m $\text{H}_2^{15}\text{O}$ 静脉弹丸慢速注射入受检者体内,动态PET采集以动脉血中 $\text{H}_2^{15}\text{O}$ 作为输入函数,通过数模转换进行数据处理,得到脑血流量图。

1.3.3.2 优缺点:实时性强,采用短半衰期核素,可在短时间内重复使用,且可用较大剂量,图像分辨率较高,获得的图像质量较好。但PET检查空间分辨率低、检查时间长、显像操作复杂,价格昂贵,需放射性药物支持,限制了临床推广。

1.3.4 氙气CT灌注成像(Xen on-CT, Xe-CT)

1.3.4.1 原理:在进行头部CT扫描时通过面罩吸入稳定氙气和氧气的混合气体,氙气吸入后能够很快在血液内达到饱和,并通过血脑屏障弥散入脑组织,然后再从脑组织中迅速反弥散回到血液中并被血液带走。利用氙气对X线具有高吸收性的特性,通过CT测得各部位的Xe时间-密度曲线,根据曲

线的摄取或者清除速率,经数模转换可以计算出ROI区的CBF值。

1.3.4.2 优缺点:空间分辨率较高,能够提供定量的局部或整体的脑血流数据,而且可以作为评估侧支循环、脑血管储备的手段,图像直观,重复性好,成本较低。但氙气CTP是单参数成像,只能提供CBF 1个参数,而不能反映脑组织的功能状态及细胞的活力,不能预测缺血组织的可恢复性;Xe-CT像易受骨组织伪影影响,故不能很好显示后循环的局部脑血流。

目前临床常用灌注成像技术为CTP及PWI,两者各具优缺点,暂无大宗病例对照研究报道,两者均可以在介入术前了解患者的脑血流灌注有无异常,并可显示灌注异常的范围及程度,为临床治疗方案的选择提供影像学依据。此外,还可以根据灌注异常区域间接地判断血管狭窄的位置和程度,结合CTA、CE-MRA及DSA等检查可明确责任血管,为复杂颈动脉多支病变分期介入开通手术方案的制定提供依据。

## 2 颈动脉狭窄的介入治疗

颈动脉狭窄的治疗包括药物治疗、手术治疗及介入治疗。对于所有颈动脉狭窄患者均应给予药物治疗,包括抗血小板聚集、应用他汀类药物及其他针对动脉粥样硬化危险因素的治疗,其中抗血小板治疗是药物治疗的核心<sup>[9]</sup>。

目前颈动脉狭窄的手术治疗主要包括颈动脉内膜切除术(carotid endarterectomy, CEA),介入治疗主要为颈动脉支架成形术(carotid artery stenting, CAS)。随着介入技术的不断发展,近年来有诸多CEA与CAS疗效比较的随机对照研究,CAS越来越受到关注。SAPPHIRE(Stenting and Angioplasty with Protection in Patients at High Risk for Endarterectomy)的研究结果表明颈动脉支架可以安全应用于狭窄>50%的有症状高危患者和狭窄>80%的无症状患者<sup>[10]</sup>。2010年发表的CAS和CEA对比试验(Carotid Revascularization Endarterectomy Versus Stent Trial, CREST)结果<sup>[11]</sup>证实CAS组和CEA组间患者的主要复合终点事件(脑卒中、心肌梗死及死亡),风险并无差异,这一结果必将对颈动脉狭窄介入治疗的推广起到极大的促进作用。

CAS的优势包括:①避免了由于颈动脉切开导致的神经损伤、伤口感染、颈部血肿等并发症;②一般不需要全身麻醉,适应证相对较宽,易于监测治



疗过程中患者病情变化;③患者手术痛苦小,术后恢复时间短;④可降低 CEA 治疗高危患者的围手术期病死率。杜彬等<sup>[12]</sup>对 9 例(11 支血管)外科高危的症状性颈动脉狭窄患者行支架成形术,手术均获成功,患者缺血症状均明显缓解,术中及术后随访无围手术期死亡病例及严重并发症。

随着远端保护装置及支架小外径输送系统的应用,CAS 的围手术期脑卒中和死亡率明显降低,目前在世界范围内,CAS 的手术例数以每年 18%~47% 的速度增长,极高的技术成功率及介入治疗的优势促进着自身的成长,随着介入器材工艺的不断完善和操作人员经验的不断增加,CAS 在治疗颈动脉狭窄方面的应用将日益广泛。

### 3 脑灌注成像对颈动脉狭窄介入治疗的作用

#### 3.1 术前筛选

对于不存在脑梗死的血管狭窄患者,CAS 治疗的意义是改善由狭窄导致的供血区域低灌注;对于狭窄血管供血区域已存在梗死病变并伴有相应的临床体征的患者,行血管内支架的意义在于使梗死区域以及梗死周边区域的血供得到一定程度的恢复,从而促进临床症状和体征的改善。因此,在 CAS 治疗前检测患者狭窄血管供血区域脑血流,明确患者脑灌注状态非常重要。颈动脉狭窄程度是选择 CAS 适应人群的主要指标,然而脑血管有着复杂的侧支循环代偿能力,所以其狭窄的程度并不一定和脑缺血成正比,即使颈动脉完全闭塞,若有充分的侧支循环,其血流动力学亦可保持正常。脑血管储备能力也是影响脑灌注压的重要因素。介入术前进行常规的脑灌注成像,可以定量或半定量评估灌注异常的脑组织、侧支循环代偿情况及血管储备能力,明确是否真正存在与狭窄血管相对应的脑灌注降低区,权衡手术的风险和收益,筛选出真正的适宜患者。有文献报道对于不存在血流动力学异常的严重颈动脉狭窄,给予内科保守治疗,也可能达到治疗目的<sup>[13]</sup>;而对于因侧支循环和脑血管自身调节功能差而存在严重的血流动力学异常的患者,即使颈动脉狭窄程度较轻,仍需要积极的血管成形术治疗才可以得到改善。

#### 3.2 术后评估

通过术后复查脑灌注成像可以观察脑血流动力学改善情况,评估治疗效果,亦可用于长期随访观察远期疗效。Gaudiello 等<sup>[14]</sup>对 15 例单侧颈内动脉重度狭窄( $\geq 70\%$ )的患者在颈动脉支架置入前

5 d 和 1 周后分别进行 CTP,通过支架置入前后 CBF 和 MTT 参数值的对比发现,支架置入前患侧 CBF 较健侧降低,MTT 较健侧增高;支架置入术后患侧大脑的 CBF 升高而 MTT 下降,两者和健侧对比,CBF 和 MTT 接近正常或正常。Gauvrit 等<sup>[15]</sup>利用 PWI 技术对 47 例单侧颈动脉狭窄患者的研究证实,行动脉内支架植入术前,有 84% 的患者有灌注异常,表现为 MTT 延长,CBF 下降,CBV 轻度升高,术后 3 d 复查,灌注异常患者的比率降为 30%,6 个月后降至 6%。所有合并对侧闭塞的颈动脉狭窄的患者均有灌注异常表现。支架术后 6 个月,灌注异常患者的比率降至 17%。San Millán Ruiz 等<sup>[16]</sup>治疗 1 例左颈总动脉重度狭窄(90%)患者,在行颈动脉支架术治疗前后分别应用 320-MDCT 进行了全脑灌注检查,结果显示术前左颈内动脉循环 MTT 显著延迟,术后明显改善。焦力群等<sup>[17]</sup>对 13 例颈动脉重度狭窄患者行支架成形术,术前及术后 1 周分别行 Xe-CT 检查,术后 CBF 有显著改善,正常区域显著增加,轻度缺血和可逆性缺血区域显著降低。

#### 3.3 预防并发症

过度灌注综合征(hyperperfusion syndrome, HS)是颈动脉狭窄血管重建术后的严重并发症,常发生在手术后的数小时至 3 周。Sundt 等<sup>[18]</sup>于 1975 年首次提出高灌注综合征的概念,其发病机制是由于术前严重狭窄导致脑血管长期处于低灌注状态,致使小动脉扩张以维持脑血流于正常水平,狭窄再通后,血流量增加灌注压增大,超过扩张小动脉的收缩极限,可导致 HS 的出现,加之 CAS 术后抗凝和抗血小板治疗,极易诱发颅内出血,出现头痛、谵妄、呕吐、癫痫发作及局部神经功能缺失等症状,产生严重后果<sup>[19]</sup>。

Hosoda 等<sup>[20]</sup>对 41 例单侧颈动脉狭窄患者行术前静息与乙酰唑胺激发对比 SPECT 扫描,判断其脑动脉血流与脑血管反应性,然后在术后第 1 天测量脑动脉血流。他们发现,术后过度灌注的发生与术前脑动脉血流严重下降显著相关,认为术前 SPECT 检查可发现脑动脉血流与脑血管反应性的异常,并对术后发生 HS 的危险性作出评估。Fukuda 等<sup>[21]</sup>认为,术前 CBV 升高是术后发生 HS 的危险征象。他们对 70 例单侧颈动脉狭窄行 CEA 手术的患者术前、术后行 PWI 检查,发现术后发生 HS 的患者中有 50% 在术前检查提示 CBV 升高。CAS 前行脑灌注成像可以对术后可能发生 HS 的患者作出初步预测,利于早期发现,早期预防。术后复查脑灌注成

像, 如果患者血管支架侧脑血流无过度灌注表现, 则可以正常地进行术后抗凝和抗血小板治疗, 如果有过度灌注表现, 则需要严格控制血压, 及时复查 CT, 密切观察病情变化。

综上所述, 脑灌注成像可测量局部脑组织血液灌注, 了解脑组织血流动力学及功能变化, 对于 CAS 术前筛选, 术后评估及指导临床治疗均具有一定的实用价值, 规范的、前瞻性的、长期的研究十分必需。

#### [参考文献]

- [1] Randoux B, Marro B, Koskas F, et al. Carotid artery stenosis: prospective comparison of CT, three-dimensional gadolinium-enhanced Mr, and conventional angiography [J]. Radiology, 2001, 220: 179 - 185.
- [2] 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: 1415 - 1425.
- [3] Latchaw RE, Yonas H, Hunter GJ, et al. Guidelines and recommendations for perfusion imaging in cerebral ischemia: A scientific statement for healthcare professionals by the writing group on perfusion imaging, from the Council on Cardiovascular Radiology of the American Heart Association[J]. Stroke, 2003, 34: 1084 - 1104.
- [4] Barneir E, Zina AE, Mahajna A, et al. Cerebral CT perfusion in the diagnosis of acute brain infarction [J]. Harefuah, 2004, 143: 881 - 886, 910.
- [5] Meier P, Knapp G, Tamhane U, et al. Short term and intermediate term comparison of endarterectomy versus stenting for carotid artery stenosis: systematic review and meta-analysis of randomised controlled clinical trials[J]. BMJ, 2010, 340: c467.
- [6] Waaijer A, van Leeuwen MS, van Osch MJ, et al. Changes in cerebral perfusion after revascularization of symptomatic carotid artery stenosis: CT measurement[J]. Radiology, 2007, 245: 541 - 548.
- [7] Alvarez-Linera J. 3T MRI: advances in brain imaging[J]. Eur J Radiol, 2008, 67: 415 - 426.
- [8] Pohl CT, Tiemann K, Schlosser T, et al. Stimulated acoustic emission detected by transcranial color doppler ultrasound: a contrast-specific phenomenon useful for the detection of cerebral tissue perfusion[J]. Stroke, 2000, 31: 1661 - 1666.
- [9] Antithrombotic Trialists' Collaboration. Collaborative meta-analysis of randomised trials of antiplatelet therapy for prevention of death, myocardial infarction, and stroke in high risk patients [J]. BMJ, 2002, 324: 71 - 86.
- [10] Roubin GS, Iyer S, Halkin A, et al. Realizing the potential of carotid artery stenting: proposed paradigms for patient selection and procedural technique[J]. Circulation, 2006, 113: 2021 - 2030.
- [11] Brott TG, Hobson RW 2nd, Howard G, et al. Stenting versus endarterectomy for treatment of carotid-artery stenosis[J]. N Engl J Med, 2010, 363: 11 - 23.
- [12] 杜彬, 姜卫剑, 王拥军, 等. 外科高危颈动脉狭窄的直接内支架成形术[J]. 介入放射学杂志, 2002, 11: 251 - 253.
- [13] 孟艳丽, 李天晓, 翟水亭, 等. 症状性颈动脉狭窄介入治疗的术前评估[J]. 中国介入影像与治疗学, 2007, 4: 181 - 184.
- [14] Gaudiello F, Colangelo V, Bolacchi F, et al. Sixty-four-section CT cerebral perfusion evaluation in patients with carotid artery stenosis before and after stenting with a cerebral protection device[J]. AJNR, 2008, 29: 919 - 923.
- [15] Gauvrit JY, Delmaire C, Henon H, et al. Diffusion/perfusion-weighted magnetic resonance imaging after carotid angioplasty and stenting[J]. J Neurology, 2004, 251: 1060 - 1067.
- [16] San Millán Ruíz D, Murphy K, Gailloud P. 320-multidetector row whole-head dynamic subtracted CT angiography and whole-brain CT perfusion before and after carotid artery stenting: technical note[J]. Eur J Radiol, 2010, 74: 413 - 419.
- [17] 焦力群, 李慎茂, 李萌, 等. 支架成形术治疗颈动脉狭窄的脑血流量定量评价[J]. 介入放射学杂志, 2007, 16: 295 - 298.
- [18] Sundt TM, Sandok BA, Whisnant JP. Carotid endarterectomy. Complications and preoperative assessment of risk[J]. Mayo Clin Proc, 1975, 50: 301 - 306.
- [19] Mayor M, Baron JC. The pathophysiology of watershed infarction in internal carotid artery disease: review of cerebral perfusion studies[J]. Stroke, 2005, 36: 567 - 577.
- [20] Hosoda K, Kawaguchi T, Ishii K, et al. Prediction of hyperperfusion after carotid endarterectomy by brain SPECT analysis with semiquantitative statistical mapping method[J]. Stroke, 2003, 34: 1187 - 1193.
- [21] Fukuda T, Ogasawara K, Kobayashi M, et al. Prediction of cerebral hyperperfusion after carotid endarterectomy using cerebral blood volume measured by perfusion-weighted Mr imaging compared with single-photon emission CT [J]. AJNR, 2007, 28: 737 - 742.

(收稿日期: 2011-07-03)