

CT 血管成像专家述评

DOI: 10.13406/j.cnki.cyx.002258

头颈 CT 血管成像临床应用研究与技术进展

吕发金

(重庆医科大学附属第一医院放射科, 重庆 400016)



【摘要】常规 CT 难以评估头颈动脉狭窄、闭塞等引起的血管性病变,无法显示血管走行变异、畸形、狭窄程度、侧支循环及斑块特性等。CT 血管成像(CT angiography, CTA)是一种非侵入式快速评价头颈血管系统的影像学技术。本文首先总结了 CTA 与头颈血管解剖和分段基础,基于 CTA 筛查头颈血管系统形态和解剖的优势,综述了其在常见脑血管疾病诊断中的应用、相关新技术进展及优缺点,最后对其未来发展方向进行了总结与展望。

【关键词】头颈 CT 血管成像;脑血管疾病诊断;新技术;综述

【中图分类号】R445.3

【文献标志码】A

【收稿日期】2019-08-15

Advances in clinical application research and technology of head and neck CT angiography

Lü Fajin

(Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University)

【Abstract】It is difficult for conventional computed tomography (computed tomography, CT) to assess vascular disease caused by head and carotid artery stenosis, occlusion, etc., failing to show vascular variation, malformation, narrow degree, collateral circulation and plaque characteristics. Computed tomography angiography (CT angiography, CTA) is a non-invasive imaging technology for rapid evaluation of the head and neck vascular system. This paper first summarizes the correlation between CTA and anatomy and segmentation basis of head and neck vessels. Then, based on the advantage of CTA in screening the anatomy and morphology of the head and neck vascular system, the application referring to the diagnosis of common cerebrovascular diseases, the progress of new technologies and the corresponding advantages and limitations has been reviewed. Finally, the future development direction of CTA is prospected.

【Key words】head and neck CT angiography; diagnosis of cerebrovascular diseases; new technology; review

作者简介:吕发金,重庆医科大学医学影像技术系主任,附属第一医院放射科副主任(主持工作),主任医师,教授,硕士研究生导师,医学影像与核医学专业硕士,神经病学博士。社会兼职:中华医学会影像技术分会常务委员兼副秘书长、中国医师协会神经内科医师分会第一届神经放射专委会主任委员、中国医师协会微无创医学专业委员会第一届影像与解剖专业委员会(学组)副主任委员、中国医师协会整合医学医师分会整合影像专业委员会(学组)第一届委员会副主任委员、重庆市医学会第三届影像技术专业委员会主任委员、重庆市医师协会放射医师分会常委兼秘书长。专业特长:CT、MRI 检查新技术与规范化诊断,肺小结节的影像诊断,神经系统疾病影像学诊断,子宫影像病理学。科研成果:主持完成十余项省部级课题;在专业学术期刊上发表 CT、MRI 研究论文 165 篇,其中以第一作者身份发表论文 51 篇,其中 SCI 论文 12 篇。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:81671666);国家“十二五”科技支撑计划资助项目(编号:2011BAI08B10)。

优先出版:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1046.R.20190906.1454.012.html>
(2019-09-09)

CT 血管成像(CT angiography, CTA)已成为头颈血管性病变更筛查与诊断的主要检查技术,通过注射对比剂使病变部位显像,采用计算机三维重建技术获取头颅血管系统的三维影像^[1]。CTA 可以对头颈血管的整体形态进行三维呈现,显示动静脉血管的解剖形态、管腔狭窄程度及范围、管壁微小钙化等,在判断血管走行、先天变异畸形、狭窄程度、管壁斑块形态与特性方面具有明显优势^[2]。

随着医学影像技术的迭代更新,CTA 不仅为血管性病变的诊断提供了快速、准确、全面、直观的解剖病理信息,四维血管成像(4-dimensional CTA, 4D-CTA)的问世使医师在短时间内获取以时间为参数的全脑各向同性的影像信息,既保留了较高密度分辨率的解剖相,又实现了较高时间分辨率的血管动态显示^[3]。在此基础上,联合 CT 灌注成像(CT perfusion, CTP)的一站式扫描方案,可以提供反映头颈血管病变不同期相的血流灌注参数,将解剖形态学和脑功能血流动力

学紧密联合,实现血管病变的全方位观察^[4]。本文综述了 CTA 在头颈血管解剖和分段中的应用,以及在常见临床血管性疾病诊断方面的应用,最后对相应的 CTA 新技术及存在的不足进行总结与展望。

1 CTA 与头颈血管解剖和分段

静脉注射对比剂后,行计算机断层扫描,经图像重建后可以三维显示颅内血管系统,因此,CTA 可无创地显影颈动脉系统、椎动脉系统及颅内动脉系统,取代部分数字减影血管造影(digital subtraction angiography,DSA)检查^[5]。脑组织主要的供血系统由颈动脉系统和椎动脉系统构成,颈总动脉在甲状软骨上缘处分颈内动脉和颈外动脉;颈内动脉在进入颅内的蛛网膜下腔后发出后交通动脉,脉络膜前动脉,大脑前、中动脉,主要为大脑前部供血,亦称为前循环。椎动脉从锁骨下动脉分出小脑后下、前下动脉,经左右椎间孔进入颅内汇合成基底动脉,再发出小脑上动脉和大脑后动脉。椎动脉系统主要为小脑、脑干和大脑后部供血,亦称作后循环。颅内动脉系统由颈内动脉系统、椎-基底动脉系统和大脑动脉环(Willis 环)构成。其中,颈内动脉发出大脑中动脉(middle cerebral artery, MCA)和大脑前动脉(arteria cerebri anterior, ACA),而椎-基底动脉延续为大脑后动脉(posterior cerebral artery, PCA),因此,CTA 可清楚显示 Willis 环,以及大脑前、中、后动脉(ACA、MCA 和 PCA)及其主要分支。相应的头颈血管解剖和分段见图 1 所示。

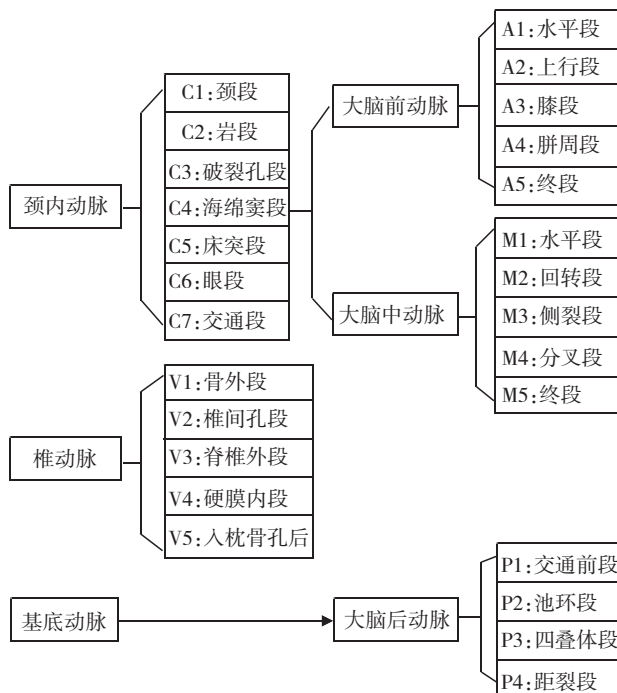


图 1 头颈 CTA 血管解剖和分段概述

2 头颈 CTA 的临床应用

2.1 头颈部血管常见变异与畸形诊断

CTA 能有效评价头颈血管的解剖与变异,为头颈部血管病变提供理论依据,有助于指导脑血管病的诊治,也为手术提供参考^[6]。颅内血管常见的形态变异包括①重复畸形:重复型大脑中动脉,可双侧或单侧,需与大脑中动脉分叉较早鉴别,前交通动脉(anterior communicating artery, ACOA)重复相当常见(约 18%),大多数其他重复的发病率为 0%~3%。②脑动脉开窗畸形。椎-基底动脉开窗畸形伴发动脉瘤的比例较高,达 7.0%~8.8%,常见于基底动脉起始部及 MCA 的 M1 段,颅内开窗可发生在 ACOA(12%~21%)、基底动脉(约 5%)、椎动脉(0.3%~2.0%)、MCA(0.2%~2.9%)或 ACA(0%~4%)。颈内动脉(internal carotid, ICA)、PCA 和后交通动脉(posterior communicating artery, PCOA)开窗非常罕见,而孙晓劼等^[7]研究 1 组 412 例 CTA 检查者中检出率为 10.7%。根据形态及大小分为:裂隙型,开窗血管短小(3~5 mm);凸透镜型,开窗血管略大(5~10 mm);重复型,开窗血管范围较大(>10 mm)。③发育不全:ACOA 发育不全的患病率估计为 5%。也有报道称 ICA 发育不全,但更罕见,估计患病率为 0.01%。脑血管先天性变异,如颈内动脉与椎-基底动脉之间的胚胎性吻合发生率为 0.1%~0.6%。其他的血管变异或畸形,如在大脑中后动脉各段可发生发育纤细、缺失未发育、血管纤细狭窄,起始部狭窄闭塞伴侧支循环开放等。Willis 环变异畸形包括其组成血管的缺如和直径变化,能显示完整 Willis 环的人群仅 42%~52%。

2.2 脑血管疾病诊断的临床应用

CTA 作为一种准确性高、特异性强、安全可靠且相对无创的脑血管成像技术,近年来在脑血管疾病诊断中的临床应用越来越广泛,可完全显示颅内脑动静脉形态、周围邻近解剖、空间结构、管壁钙化及血管腔内情况,由于成像耗时短的优势,适用于高龄和急危重症患者,对出血性脑血管疾病病因诊断、颅内动脉病变及危险因素检出具有明显优势^[8-9],对闭塞性脑血管疾病及其他缺血性脑血管疾病可提供重要的诊断依据^[10]。

2.2.1 颅内出血的临床诊断与评估 CTA 不仅在出血性脑血管疾病临床诊断中应用广泛,在其病因分析中的作用也日渐凸显,可主要用于出血性脑血管病的筛查与随访,特别优先适用于脑出血急性期不能耐受 DSA 检查的患者。美国心脏协会/美国卒中协会(AHA/ASA)动脉瘤性蛛网膜下腔出血

管理指南建议,在检查中使用 CTA 将有助于决策指导检出的动脉瘤修复类型^[11]。已有研究表明,Willis 环 CTA 在评价非创伤性颅内出血中起着重要作用。Blok 等^[12]证实了 CTA 在评估疑似动脉瘤出血患者中的有效性,在症状出现的 6 h 内,对排除蛛网膜下腔出血的阴性预测值可达 99.9%。CTA 既可以显示出血来源和外渗,又可以显示出血情况下肿瘤内肿块效应引起的血管移位。脑实质出血时,斑点征是活动性出血的标志,该标志可作为脑出血患者血肿扩大程度的指标及死亡率或一般不良预后的预测指标,CTA 可显示实质性血肿内呈线性对比度密度的阳性斑点征^[13]。Heit 等^[14]回顾性分析了非创伤性蛛网膜下腔出血的 CTA 阴性病例,极少数 CTA 阴性结果中仍存在动脉瘤漏诊(2.8%)。国内学者证明,数字减影 CTA 较常规 CTA 使血管对比度明显增加,有利于床突下动脉瘤的检出,可作为检出动脉瘤的首选方法,进而避免有创的 DSA 检查^[15]。此外,还有学者分别研究了 CTA 对出血性脑血管疾病的病因检出率,以及 CTA 与 DSA 在出血性脑血管疾病方面的诊断效能^[16]。

2.2.2 闭塞性脑血管疾病及其他缺血性脑血管疾病的临床诊断与评估 缺血性脑血管病的患病率呈逐年升高趋势,近 80% 的脑血管疾病可确诊为缺血性脑血管疾病,其中,血管狭窄、颅内动脉闭塞是主要病因。CTA 目前是最常用的颅内动脉狭窄相关疾病的筛查技术和诊断方法,可对闭塞性脑血管病患者颅内血管形态进行准确评估,对大脑动脉不同狭窄程度进行有效区分^[17],进而快速无创地检出患者脑动脉狭窄或闭塞位置。此外,在评价介入手术治疗方面,CTA 能通过三维重建算法对病灶血管的狭窄或闭塞予以动态观察,并清晰地呈现细微病灶,可以辅助医师快速准确地评估侧支循环状态及病变血管同周围脑组织的解剖关系。缺血性梗死主要病因是颅内、外动脉粥样硬化引起管腔狭窄或闭塞,通常是动脉硬化斑块导致血管壁增厚及管腔狭窄。而颈动脉分叉处及颈内动脉颈段是动脉粥样硬化的好发部位。斑块的不同组成和血管管腔的狭窄程度可综合评价动脉硬化性疾病。CTA 可充分显示血管的这两个评价指标。近年来研究表明,斑块不稳定性与脑卒中的发生密切相关,软斑块是发生缺血性脑梗死的危险因素之一,根据粥样斑块 CT 值测定,可将斑块分为钙化斑块、混合性斑块和软斑块^[18]。CTA 可以有效指导和分类近端闭塞患者的再通治疗,也可用于评估血栓程度。使用 CTA 评估血栓长度与再通率的研究表明,0~5 mm 的血栓长度有 42.8% 的再通率,而血栓长度大于 20 mm 的患者没有再通率,血栓长度的测量基于 2.5 mm 层厚平扫 CT 图像进行^[19-20]。头颈 CTA 同时扫描可提供丰富的临床信息,包括颅外颈动脉

斑块特性和血栓信息,研究表明,经 CTA 检出的血栓可作为颈动脉疾病的重要临床指征。

2.2.3 钝性脑血管损伤的临床诊断与评估 脑血管系统受到的创伤称为钝性脑血管损伤(blunt cerebrovascular injury, BCVI),定义为钝挫伤所致的颈动脉和椎动脉损伤。在因 BCVI 住院的患者中,有 0.01% 被诊断为钝性创伤,2.7% 的患者被筛查为无症状的钝性多发创伤,CTA 是评估 BCVI 的首选检查技术^[21]。早期使用 CTA 作为 BCVI 的筛查受到探测器阵列数量的限制,最新头颈血管成像指南指出,具有 8 层以上探测器的 CTA 可作为钝性脑血管损伤筛查的金标准^[22],调查显示,60.5% 在临床应用中使用 CTA 筛查和诊断 BCVI^[23]。西方创伤协会建议使用 CTA 作为唯一的筛查方式,进一步评估阳性或可疑的发现。若患者满足 Denver 标准筛查,则应进一步行 CTA 椎动脉和颈动脉损伤筛查,然而,大多数损伤是在继发性缺血出现神经症状后诊断出来的,导致相关的神经系统发病率为 80%,死亡率为 40%^[24]。

3 头颈 CTA 相关新技术

3.1 4D-CTA

4D-CTA 就是在常规 CTA 的基础上增加一个时间维度,可多时相记录对比剂流入和流出血管的动态过程,除显示常规 CTA 所提供的解剖形态信息外,具有可动态观察血管的优势^[25]。缺血性脑卒中患者常伴有不同程度脑动脉狭窄,4D-CTA 能够快速找到相应的责任血管,显示其狭窄的程度和侧支循环情况。常规 CTA 所使用的管电压和管电流较高,图像密度分辨率高,颗粒度小;有学者研究表明 4D-CTA 基于 iDose4 迭代技术,可采用较低的管电压和低管电流,大大降低辐射剂量的同时满足成像需求,且与常规 CTA 诊断脑血管狭窄或闭塞的一致性较好^[3,26]。研究表明,由低辐射剂量和低对比剂浓度扫描方案实现的 4D-CTA 动态脑血管成像图像质量不低于常规 CTA,所以在一定程度上 4D-CTA 可替代常规 CTA^[27]。常规 CTA 单时相扫描速度快,扫描结束时侧支循环还没完全充盈,而 4D-CTA 可以多时相动态观察侧支逐渐充盈到流出的全过程,因此可以更好地显示侧支循环^[28]。

3.2 CTA 与 CTP 联合扫描

虽然 CTA 能够较好地显示血管的解剖结构,但受部分积效应与噪声影响,其空间分辨力欠佳,且不能深入评价血流变化,因此,配合 CTA 与 CTP 一站式解决方案的临床应用逐渐受到关注。CTP 是测量脑血流动力学参数的功能成像,CTP 可获得的参数包括脑血流量(cerebral blood flow, CBF)、

脑血容量(cerebral blood volume, CBV)、平均通过时间(mean transit time, MTT)及达峰时间(time to peak, TTP)。CTA 是评估脑血管形态学的结构成像, CTA 联合 CTP 一并进行可同时获得患者的脑影像功能与结构信息, 对病变的早期诊断具有重要意义。有研究证明, 联合两者不仅可检测蛛网膜下腔出血患者脑血管痉挛程度, 还可同时了解脑微循环的改变^[29], 协助诊断脑缺血。部分急性、超急性脑梗死及短暂脑缺血发作的患者常漏诊于 CT 平扫, CTP 不仅可早期发现脑缺血病变的部位和缺血范围, 而且可定量评估灌注异常的脑组织及侧支循环情况^[30]。CTP 图像显示不同程度缺血改变都伴有头颈部动脉不同程度的狭窄, 且缺血区多与血管狭窄区一致^[31], 应用 CTP 联合 CTA 可以早期发现脑缺血部位及缺血范围, 根据病变的部位、狭窄程度结合异常灌注情况为临床提供丰富而准确的信息。其临床应用主要包括: 对怀疑脑缺血的患者进行脑缺血情况评估; 评估头颈部动脉有狭窄患者的脑缺血与脑侧支血管建立情况, 进而预测脑梗死风险及是否需要进一步治疗; 对急性脑梗死患者或脑梗死治疗后的患者进行缺血区及可恢复区情况复查。

3.3 CTA 成像的优势与不足

CTA 的优点包括风险低、准确性高和成像速度快, 与 DSA 相比, CTA 几乎可以忽略血管并发症和患者耐受的风险。与磁共振血管造影术(magnetic resonance angiography, MRA)相比, CTA 检查更快, 对结构和病理方面的评估具有更好的分辨率, 避免了磁共振成像禁忌证的限制(如金属植入物), 且 CTA 较 MRA 在急性缺血性脑病的诊断中更有价值, 可以准确评估狭窄的长度、钙化程度和残余管腔直径。此外, CTA 成像的快速性对抑制运动伪影和降低对比剂用量十分重要^[32]。但 CTA 也有潜在的缺点包括使用碘造影剂的风险, 无法评估血流流速或方向, 以及与 DSA 相比分辨率有限。尽管碘造影反应的风险很低, 但不良反应可能包括特异性反应、过敏或肾损伤^[33]。射束硬化伪影可发生在血管内密集钙化和密集团注区域, 尤其是锁骨下血管, 限制了主动脉弓附近血管起源的评估^[34]。

4 总结与展望

CTA 可为头颈血管病变提供快速的评价, 随着 CTA 技术的不断改进, 临床医师可以获得更快、更准确的诊断信息。随着扫描设备性能的提高, 可检测的影像解剖与影像病理的准确性和范围也随之提高。未来的发展方向主要在扫描硬件升级和重建算法创新方面, 开发更多层的探测器, 实现超短时

间内的全脑结构与功能同时成像; 重建算法的突破可实现图像后处理的革新, 有效提升图像质量, 从而实现更高精度的头颈血管成像。

参 考 文 献

- [1] Kramer M, Vairaktaris E, Nkenke E, et al. Vascular mapping of head and neck: computed tomography angiography versus digital subtraction angiography[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2008, 66(2): 302-307.
- [2] Kramer M, Schwab SA, Nkenke E, et al. Whole body magnetic resonance angiography and computed tomography angiography in the vascular mapping of head and neck: an intraindividual comparison[J]. Head Face Med, 2014, 10: 16.
- [3] Meijs M, de Leeuw FE, Boogaarts HD, et al. Circle of Willis collateral flow in carotid artery occlusion is depicted by 4D-CTA[J]. World Neurosurg, 2018, 114: 421-426.
- [4] Wagemans BA, van Zwam WH, Nelemans PJ, et al. 4D-CTA improves diagnostic certainty and accuracy in the detection of proximal intracranial anterior circulation occlusion in acute ischemic stroke[J]. PLoS One, 2017, 12(2): e0172356.
- [5] Cui D, Lynch JC, Smith AD, et al. Stereoscopic vascular models of the head and neck: a computed tomography angiography visualization[J]. Anat Sci Educ, 2016, 9(2): 179-185.
- [6] Schwein A, Chinnadurai P, Behler G, et al. Computed tomography angiography-fluoroscopy image fusion allows visceral vessel cannulation without angiography during fenestrated endovascular aneurysm repair[J]. J Vasc Surg, 2018, 68(1): 2-11.
- [7] 孙晓劫, 程敬亮, 金 焱, 等. CTA 对颅内动脉开窗畸形的诊断价值[J]. 临床放射学杂志, 2010, 29(6): 738-741.
- [8] Prestigiacomo CJ, Sabit A, He W, et al. Three dimensional CT angiography versus digital subtraction angiography in the detection of intracranial aneurysms in subarachnoid hemorrhage[J]. J Neurointerv Surg, 2010, 2(4): 385-389.
- [9] Schuurmann R, Overeem SP, Van Noort K, et al. Validation of a new methodology to determine 3-dimensional endograft apposition, position, and expansion in the aortic neck after endovascular aneurysm repair[J]. J Endovas Ther, 2018, 25(3): 358-365.
- [10] Bryjova I, Kubicek J, Dembowski M, et al. Reconstruction of 4D CTA brain perfusion images using transformation methods[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2016.
- [11] Tagami T, Kuwamoto K, Watanabe A, et al. Optimal range of global end-diastolic volume for fluid management after aneurysmal subarachnoid hemorrhage: a multicenter prospective cohort study[J]. Crit

- Care Med, 2014, 42(6):1348-1356.
- [12] Blok KM, Rinkel GJ, Majoie CB, et al. CT within 6 hours of headache onset to rule out subarachnoid hemorrhage in nonacademic hospitals[J]. *Neurology*, 2015, 84(19):1927-1932.
- [13] Delgado Almandoz JE, Yoo AJ, Stone MJ, et al. Systematic characterization of the computed tomography angiography spot sign in primary intracerebral hemorrhage identifies patients at highest risk for hematoma expansion; the spot sign score[J]. *Stroke*, 2009, 40(9):2994-3000.
- [14] Heit JJ, Pastena GT, Nogueira RG, et al. cerebral angiography for evaluation of patients with ct angiogram-negative subarachnoid hemorrhage; an 11-year experience[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2016, 37(2):297-304.
- [15] 吕发金, 谢鹏, 罗天友, 等. 数字减影 CT 血管成像在蛛网膜下腔出血诊断中的价值[J]. *中国医学影像技术*, 2007, 23(1):45-48.
- [16] Yeung R, Ahmad T, Aviv RI, et al. Comparison of CTA to DSA in determining the etiology of spontaneous ICH[J]. *Can J Neurol Sci*, 2009, 36(2):176-180.
- [17] Klingebiel R, Busch M, Bohner G, et al. Multi-slice CT angiography in the evaluation of patients with acute cerebrovascular disease—a promising new diagnostic tool[J]. *J Neurol*, 2002, 249(1):43-49.
- [18] Saba L, Sanfilippo R, Pirisi R, et al. Multidetector-row CT angiography in the study of atherosclerotic carotid arteries[J]. *Neuroradiology*, 2007, 49(8):623-637.
- [19] Menon BK, Demchuk AM. Computed tomography angiography in the assessment of patients with stroke/TIA[J]. *Neurohospitalist*, 2011, 1(4):187-199.
- [20] Menon BK, Singh J, Al-Khataami A, et al. The donut sign on CT angiography; an indicator of reversible intraluminal carotid thrombus? [J]. *Neuroradiology*, 2010, 52(11):1055-1056.
- [21] Bruns BR, Tesoriero R, Kufera J, et al. Blunt cerebrovascular injury screening guidelines; what are we willing to miss? [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2014, 76(3):691-695.
- [22] Bromberg WJ. Blunt cerebrovascular injury practice management guidelines; the Eastern Association for the Surgery of Trauma[J]. *J Trauma*, 2010, 68(2):471-477.
- [23] Harrigan MR, Weinberg JA, Peaks YS. Management of blunt extracranial traumatic cerebrovascular injury; a multidisciplinary survey of current practice[J]. *World J Emerg Surg*, 2011, 6(1):11-17.
- [24] Jacobson LE, Ziemba-Davis M, Herrera AJ. The limitations of using risk factors to screen for blunt cerebrovascular injuries; the harder you look, the more you find[J]. *World J Emerg Surg*, 2015, 10:46.
- [25] Kämenä A, Streitparth F, Grieser C, et al. Dynamic perfusion CT: optimizing the temporal resolution for the calculation of perfusion CT parameters in stroke patients[J]. *Eur J Radiol*, 2007, 64(1):111-118.
- [26] Kortman HG, Smit EJ, Oei MT, et al. 4D-CTA in neurovascular disease; a review[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2014, 36(6):1026-1033.
- [27] Roberts DJ, Chaubey VP, Zygun DA, et al. Diagnostic accuracy of computed tomographic angiography for blunt cerebrovascular injury detection in trauma patients; a systematic review and meta-analysis[J]. *Ann Surg*, 2013, 257(4):621-632.
- [28] Chen H, Wu B, Liu N, et al. Using standard first-pass perfusion computed tomographic data to evaluate collateral flow in acute ischemic stroke[J]. *Stroke*, 2015, 46(4):961-967.
- [29] Wintermark M, Ko NU, Smith WS, et al. Vasospasm after subarachnoid hemorrhage; utility of perfusion CT and CT angiography on diagnosis and management[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2006, 27(1):26-34.
- [30] Murphy BD, Fox AJ, Lee DH, et al. Identification of penumbra and infarct in acute ischemic stroke using computed tomography perfusion-derived blood flow and blood volume measurements[J]. *Stroke*, 2006, 37(7):1771-1777.
- [31] Turk AS, Magarick JA, Frei D, et al. CT perfusion-guided patient selection for endovascular recanalization in acute ischemic stroke; a multicenter study[J]. *J Neurointerv Surg*, 2013, 5(6):523-527.
- [32] Lin YH, Wang YF, Liu HM, et al. Diagnostic accuracy of CTA and MRI/MRA in the evaluation of the cortical venous reflux in the intracranial dural arteriovenous fistula DAVF[J]. *Neuroradiology*, 2018, 60(1):7-15.
- [33] Sailer AM, Grutters JP, Wildberger JE, et al. Cost-effectiveness of CTA, MRA and DSA in patients with non-traumatic subarachnoid haemorrhage[J]. *Insights Imaging*, 2013, 4(4):499-507.
- [34] Killer M, McCoy MR, Vestal MC, et al. Use of CT angiography in comparison with other imaging techniques for the determination of embolus and remnant size in experimental aneurysms embolized with hydrogel filaments[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011, 32(5):923-928.

(责任编辑:唐秋姗)