



·综述·

功能显像技术在难治性癫痫致痫灶定位中的研究进展

王辉¹, 王东东¹, 陈品², 于波², 闻金坤², 王存祖²

1. 大连医科大学, 辽宁 大连 116044

2. 苏北人民医院, 江苏 扬州 225001

摘要: 准确的致痫灶定位一直是困扰癫痫外科医生的难题。近年来, 各种成像技术的广泛应用和不断发展, 尤其是功能显像技术的发展, 为致痫灶的定位提供了更有效、更准确的定位方法。该文将常用的功能显像技术在难治性癫痫研究中的现状和进展作一综述。

[国际神经病学神经外科学杂志, 2021, 48(5):

490-494.]

关键词: 难治性癫痫; 功能显像技术; 致痫灶; 定位

中图分类号: R742.1

DOI: 10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2021.05.017

Research advances in functional imaging technology in the localization of intractable epileptic foci

WANG Hui¹, WANG Dong-Dong¹, CHEN Pin², YU Bo², WEN Jin-Kun², WANG Cun-Zu²

1. Dalian Medical University, Dalian, Liaoning 116044, China

2. Northern Jiangsu People's Hospital, Yangzhou, Jiangsu 225001, China

Corresponding author: WANG Cun-Zu, Email: neurosurgeonwang@126.com

Abstract: Accurate localization of epileptic foci has always been a difficult problem for epilepsy surgeons. In recent years, the extensive application and continuous development of various imaging technologies, especially functional imaging technologies, have provided more effective and accurate localization methods for epileptic foci. This article reviews the current status and research advances in functional imaging technology in intractable epilepsy.

[Journal of International Neurology and Neurosurgery, 2021, 48(5): 490-494.]

Keywords: intractable epilepsy; functional imaging technology; epileptic foci; localization

癫痫是临床常见的脑功能障碍性疾病, 以大脑神经元反复性、突发性异常放电为主要特征。在我国约有900万以上的癫痫患者, 其中20%~30%的癫痫患者因药物不能控制其发作, 临床症状不能缓解称为难治性癫痫, 或耐药性癫痫, 给患者及家庭带来了沉重的负担^[1]。国际抗癫痫联盟(ILAE)将难治性癫痫定义为: 正确选择且能耐受的两种抗癫痫药物, 单药或联合用药治疗, 患者无发作的持续时间仍未达到治疗前最长发作间隔的3倍或1年^[2]。目前, 外科手术是治疗难治性癫痫的有力手段, 其关键在于术前对致痫灶进行准确定位。准确的定位既能

切除病灶, 控制癫痫发作, 又能避免损伤重要的脑功能区, 改善患者预后并提高生活质量。

癫痫常伴有血流动力学、脑代谢等一系列生理生化改变, 因此功能显像技术在致痫灶定位方面发挥着独特的优势, 这些方法包括正电子发射断层成像(positron emission tomography, PET)、单光子发射断层扫描(single photon emission computed tomography, SPECT)、磁共振波谱成像(MR spectroscopy, MRS)、血氧水平依赖功能磁共振成像(blood oxygen level dependent functional magnetic resonance imaging, BOLD-fMRI)、动脉自旋标记(arterial

收稿日期: 2020-10-28; 修回日期: 2021-10-09

作者简介: 王辉(1995—), 女, 住院医师, 硕士研究生在读, 主要从事功能神经外科研究。

通信作者: 王存祖(1970—), 男, 主任医师, 博士研究生, 主要从事功能神经外科研究, Email: neurosurgeonwang@126.com。

spin labeling, ASL)、CT灌注成像(CT perfusion imaging, CTP)等功能显像技术,能从分子水平揭示病灶的代谢、氧耗、生化及血流灌注等变化,对致痫灶进行显像、半定量或定量分析,为致痫灶的定位提供有力依据。现将常用的功能显像技术在难治性癫痫研究中的现状和进展作一综述。

1 PET

PET是目前癫痫外科常用的致痫灶定位方法,通过示踪剂反映局部脑组织的葡萄糖代谢、神经受体分布等情况,从而对致痫灶进行显像、定位、半定量分析。常用的示踪剂是 ^{18}F 标记脱氧葡萄糖(^{18}F -FDG)。癫痫发作时,致痫灶过度放电,消耗大量的能量,局部脑皮质葡萄糖代谢增加, ^{18}F -FDG摄取增多,在PET图像上表现为高代谢灶;发作间期,由于皮质萎缩、神经元活性下降, ^{18}F -FDG摄取减少,表现为低代谢灶。对于MRI表现为阴性的难治性癫痫患者,发作期PET的阳性检出率可达50%~70%,大大弥补了MRI的不足,提高了致痫灶检出率^[3]。陈自谦等^[4]通过分析152例颞叶癫痫患者,发现PET显像对异常代谢区的阳性检出率为100%,定位致痫灶准确性为80.92%,这说明PET用于颞叶癫痫的术前定位准确性较高。然而,缺血性脑疾病也可表现为功能缺失和代谢减低,故发作间期的PET显像特异性并不高。另外,PET因示踪剂合成复杂、空间分辨率较低、检查费用昂贵、易受外界影响等不足,大大限制了其在临床中的应用。

目前,一体化PET/MRI是比较先进的分子影像学检查技术,将PET和MRI图像进行融合,可以一站式完成多种脑功能成像,实现真正的同步扫描,减少数据误差,具有辐射量低、空间分辨率高、检查时间短等优势,适合复杂脑部疾病的诊断。与单独使用MRI、PET相比,PET/MRI的灵敏度、准确性更高,实现了“1+1>2”的显像目的^[5]。在一项针对48名儿童的研究中,PET在检测轻度皮质发育异常方面优于MRI,检出率可达77%^[6]。Fernández等^[7]认为在难治性癫痫致痫灶定位方面,PET/MRI与侵入性脑电图有较好的一致性。Boscolo Galazzo等^[8]研究发现,用PET/MRI进行术前评估的癫痫患者,定位比较精确,高达87%术后不再复发。

2 SPECT

SPECT成像原理是显像剂进入脑组织后可较长时间滞留在脑组织内,与局部的脑血流量变化呈正相关分布。它作为一种常规检查在癫痫病灶诊断方面有着明显的优势,可以直接反映局部脑组织的血流灌注情况。癫痫发作期,致痫灶脑血流增加,表现为高灌注,发作间期则表现为低灌注。研究表明,发作期SPECT显像,致痫灶定位准确率可达70%~90%,发作间期SPECT的准确率仅50%^[9]。完全切除SPECT高灌注区域可以使86%的皮质发育不良儿童得到较好的手术结果,减少癫痫的发生^[10]。

对于难治性局灶性癫痫,当MRI结果阴性或MRI与临床、脑电图结果不一致时,发作期SPECT是定位的有效方法^[11]。与同步脑电图-功能磁共振成像(EEG-fMRI)相比,发作期SPECT可以检出96%的癫痫患者血流动力学变化^[12]。对于MRI结果不一致或阴性的颞叶外癫痫,SPECT有助于定位致痫灶,还可以协助规划颅内电极放置的位置^[13]。由于发作期会产生痫性活动的泛化,致痫灶周围也会出现高灌注情况,再加上SPECT的空间分辨率较低,单独应用SPECT一般不能对致痫灶进行准确的解剖定位。随着软件技术发展,通过使用统计参数映射进行统计分析,可以进一步提高SPECT对致痫灶定位的准确性^[14]。

颅骨减影融合技术(subtraction ictal single-photon emission computed tomography coregistered to MRI, SISCOM)是一种将减影后的SPECT图像和MRI影像融合的无创性成像技术,克服了SPECT图像空间分辨率低的缺点,可以提高致痫灶定位的敏感性和特异性。SISCOM可以反映癫痫发作期脑血流的变化,脑激活及传播途径,它在确定颅内植入部位和改善手术结果方面的作用目前已得到广泛认可^[15]。Chen等^[16]通过研究142例MRI阴性的癫痫患者,发现SISCOM的敏感性可达83.8%,致痫灶定位价值较高。SISCOM发现的异常区域与手术预后有一定关系,异常区域被切除得越彻底,术后效果越好^[17-18]。

3 MRS

MRS是通过检测癫痫患者代谢物浓度的改变,从而对致痫灶进行定位诊断。最常用的是质子MRS(^1H -MRS)检查。难治性癫痫的海马病变主要是神经元的丢失和胶质细胞的增生,故可使用N-乙酰天冬氨酸(NAA)、胆碱(Cho)、肌酸(Cr)峰值来对颞叶癫痫定位定侧诊断。MRS可以在组织形态尚未明显改变前就可以反映其病理改变,而MRI只有在神经元损失到50%以上,才会表现出形态学异常^[19]。对于MRI阴性的癫痫患者,MRS不仅可以反映致痫灶的位置,灵敏度较高,还与手术预后密切相关^[20]。与MRI检查相比, ^1H -MRS检查对癫痫患者的检出率可达90%,准确率94.4%,能更好地定位致痫灶^[21]。对于有双侧病变的颞叶癫痫患者, ^1H -MRS敏感性较高,与双侧脑电图表现出高度的一致性^[22]。Fountas等对23例颞叶癫痫患者进行MRS术前定位,术后组织病理示MRS的敏感性为100%,特异性为80%,阳性预测率为87%^[23]。

但是MRS对磁共振机磁场均匀度要求比较高,易受到颅骨皮层内的钙、板障内的脂肪等物质信号干扰,还不能有效的区别出代谢产物与神经递质混合物中的各种成分,其准确率还有待提高。

4 BOLD-fMRI

BOLD-fMRI是利用内源性血氧浓度的变化而进行功能成像的方法,可以对脑运动、语言等功能区及病灶进行

定位。由于血液动力学变化与脑神经元活动之间联系紧密,当大脑神经元兴奋性增强,使局部血液含氧量增加,氧合血红蛋白(抗磁性)增加,脱氧血红蛋白(顺磁性)含量减少,磁场性质变化,从而进行MRI成像。尽管BOLD-fMRI具有无创、空间分辨率高等优点,但易受生理变化、外界环境等影响,临床应用较少。

同步脑电图-功能磁共振成像(EEG-fMRI)是最近几年发展起来的一种新的、无创的致痫灶检测方法,它将功能磁共振与脑电图融合在一起,从神经电活动和血氧代谢2个角度共同进行观察,以找到致痫灶异常放电区域。Sierra等^[24]研究14名难治性局限性癫痫患者,发现EEG-fMRI的定位结果与视频脑电图一致性较高,为术前评估提供了有效信息。Al-Asmi等^[25]通过对38例局灶性癫痫患者进行研究,发现EEG-fMRI显示的病灶与头皮电极EEG、颅内电极以及MRI的结果比较一致。这也证实了EEG-fMRI对致痫灶的定位价值比较高。对于频繁发作的癫痫患者而言,EEG-fMRI可以记录到其发作期的信息^[11]。

总的来说,EEG-fMRI具有安全、空间和时间分辨率高、对深部致痫灶敏感等优点,但也有其不足,如易受活动影响、昂贵复杂的软硬件、定位比较弥散等^[26]。随着更先进的信号采集系统硬件及数据处理软件开发,同步EEG-fMRI会在难治性癫痫致痫灶术前定位等方面会得到更加广泛的普及与应用。

5 ASL

ASL是利用动脉血液中的水分子作为内源性对比剂而获得脑血流灌注信息的成像技术,具有非侵袭性、无放射性、无过敏反应危险、简便易得、可重复性高等优势^[27]。ASL不仅可以定性显示病变,还能通过数学模型定量测量CBF值,与MRI一致性较好,定位致痫灶的总体准确性可达76%^[24]。与MRI相比,ASL在评估初发、隐源性和耐药性癫痫病灶方面具有独特的优势^[28]。ASL不仅可以无创性地监测致痫灶发作期和发作间期的灌注变化,还跟PET在致痫灶定位定侧方面有很好的 consistency^[29-30]。Pendse等^[31]也认为ASL技术测得的灌注异常区域与PET所得的结果一致性较高。与增强对比的CT和MRI相比,ASL在当研究大脑功能的缓慢变化时具有明显的优势,它可以在常规MRI检查期间获得可重复的结果,比较癫痫发作前后局部脑血流的变化差异^[32-33]。与PET、SPECT相比,ASL空间分辨率高,成本低,可提供额外的致痫灶定位信息,不会产生电离辐射^[34]。由于安全、易获得、定位价值与SPECT、PET相似等特点,ASL技术更适合用于儿童癫痫的定位和反复监测^[35]。除此之外,ASL还广泛应用于癫痫的其他类型的研究,例如脑血流网络等方面^[36]。

尽管ASL技术有图像信噪比低、技术理论不够成熟

及硬件需求高等缺点,随着MR设备不断更新及软件技术的进步,ASL在难治性癫痫中的应用将越来越广泛。

6 CTP

1991年Miles等将CT扫描与计算机图像处理系统结合起来,得到了反映血流变化的灌注图像,并首次提出CTP的概念^[37]。随着CTP技术的成熟,逐步成为检测组织血流灌注情况的首选方法之一。CTP的基本成像原理是静脉内注射含碘对比剂后,对感兴趣层面进行连续多次扫描,得到对比剂经过该层面的时间-密度曲线(time density curve, TDC)。根据这一曲线,可以利用不同的数学模型计算出各种灌注参数,如脑血容量(cerebral blood volume, CBV)、脑血流量(cerebral blood flow, CBF)、对比剂平均通过时间(mean transit time, MTT)、血流到达峰值时间(time to peak, TTP)等。CTP可以直接地反映脑灌注参数的变化,量化地反映脑组织血流动力学改变,具有无创、成像速度快、扫描时间短、简单易操作、空间分辨率高等优点^[38]。CTP可以准确反映血管和血流灌注的变化,并能在形态异常之前探测到脑组织功能异常^[39]。近年来,64、128等多层螺旋CT的发展大大提高了CTP的空间分辨率,现它已广泛应用于研究脑部功能变化及诊断脑部疾病,如脑梗死、颅脑肿瘤、颅脑损伤等,但在癫痫方面的研究较少^[40]。通过灌注图的分析可以检出癫痫持续状态患者存在局部高灌注,CTP敏感性可达78%^[41]。LI等^[42]研究认为,CTP与剪影后的ASL、发作期SPECT、发作间期PET有相似的定位价值,且具有更高的成本效益,可以作为SPECT的替代用于临床。

CTP因放射线辐射较高、对比剂过敏的缺点应用受限,且算法不同会导致分析难以标准化评定。但是现在随着技术的进步,可以通过降低电压、电流、迭代重建等方式降低辐射,同时保证图像质量不受损^[43]。而且,CTP操作简便,扫描时间短,尤其适用于急性发作的癫痫患者,更适合在临床工作应用中推广。

7 结语

随着癫痫外科的不断发展,对致痫灶定位的技术要求越来越高,尽可能用非创、低辐射检查替代有创、高辐射检查。各种各样的致痫灶定位技术为难治性癫痫的诊断和治疗方提供了重要的思路。特别是灌注成像技术的成熟,如CTP、ASL技术,通过脑组织局部血流的灌注变化对致痫灶进行定位,定位准确率较高,临床推广相对容易。以往致痫灶的定位靠多种检查手段进行综合评估,程序复杂,花费时间较多。目前,多模态的图像融合技术逐步在癫痫外科中占据重要的位置,如PET/MRI、SIS-COM等。多种影像学技术互相融合达到优势互补的效果,大大减少了检查时间、减少数据处理的误差、提高了定位的准确性,使得术者更加直观的对致痫区有所了解,准确的切除致痫病灶。

参 考 文 献

- [1] LAXER KD, TRINKA E, HIRSCH LJ, et al. The consequences of refractory epilepsy and its treatment[J]. *Epilepsy Behav*, 2014, 37: 59-70.
- [2] KWAN P, ARZIMANOGLOU A, BERG AT, et al. Definition of drug resistant epilepsy: consensus proposal by the ad hoc Task Force of the ILAE Commission on Therapeutic Strategies[J]. *Epilepsia*, 2010, 51(6): 1069-1077.
- [3] 邱云亮, 李天女, 郭喆. 18F-FDG PET/CT显像在难治性癫痫致痫灶定位中的应用[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(9): 1292-1295.
- [4] 陈自谦, 赵春雷, 刘耀, 等. 18F-FDG PET/CT脑显像与EEG用于颞叶癫痫(瘤)灶术前定位[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2012, 32(3): 166-169.
- [5] 郭坤, 卢洁. MRI、18F-FDG PET以及PET/MRI在难治性癫痫术前精准定位中的价值[J]. *癫痫杂志*, 2019, 5(5): 372-375.
- [6] JUHÁSZ C, JOHN F. Utility of MRI, PET, and ictal SPECT in presurgical evaluation of non-lesional pediatric epilepsy[J]. *Seizure*, 2020, 77: 15-28.
- [7] FERNÁNDEZ S, DONAIRE A, SERÈS E, et al. PET/MRI and PET/MRI/SISCOM coregistration in the presurgical evaluation of refractory focal epilepsy[J]. *Epilepsy Res*, 2015, 111: 1-9.
- [8] BOSCOLO GALAZZO I, MATTOLI MV, PIZZINI FB, et al. Cerebral metabolism and perfusion in MR-negative individuals with refractory focal epilepsy assessed by simultaneous acquisition of 18F-FDG PET and arterial spin labeling[J]. *Neuroimage Clin*, 2016, 11: 648-657.
- [9] ERGÜN EL, SAYGI S, YALNIZOGLU D, et al. SPECT-PET in epilepsy and clinical approach in evaluation[J]. *Semin Nucl Med*, 2016, 46(4): 294-307.
- [10] KRSEK P, KUDR M, JAHODOVA A, et al. Localizing value of ictal SPECT is comparable to MRI and EEG in children with focal cortical dysplasia[J]. *Epilepsia*, 2013, 54(2): 351-358.
- [11] DUNCAN JS, WINSTON GP, KOEPP MJ, et al. Brain imaging in the assessment for epilepsy surgery[J]. *Lancet Neurol*, 2016, 15(4): 420-433.
- [12] THEODORE WH. Presurgical focus localization in epilepsy: PET and SPECT[J]. *Semin Nucl Med*, 2017, 47(1): 44-53.
- [13] OERTZEN TJVON. PET and ictal SPECT can be helpful for localizing epileptic foci[J]. *Curr Opin Neurol*, 2018, 31(2): 184-191.
- [14] SIDHU MK, DUNCAN JS, SANDER JW. Neuroimaging in epilepsy[J]. *Curr Opin Neurol*, 2018, 31(4): 371-378.
- [15] AUPY J, WONGWIANGJUNT S, WANG ZI, et al. Subcortical SISCOM hyperperfusion: should we pay more attention to it?[J]. *Seizure*, 2018, 62: 43-48.
- [16] CHEN T, GUO L. The role of SISCOM in preoperative evaluation for patients with epilepsy surgery: a meta-analysis[J]. *Seizure*, 2016, 41: 43-50.
- [17] AUNGARON G, TROUT A, RADHAKRISHNAN R, et al. Impact of radiotracer injection latency and seizure duration on subtraction ictal SPECT co-registered to MRI (SISCOM) performance in children[J]. *Clin Neurophysiol*, 2018, 129(9): 1842-1848.
- [18] CHO EB, JOO EY, SEO DW, et al. Prognostic role of functional neuroimaging after multilobar resection in patients with localization-related epilepsy[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0136565.
- [19] 宁殿秀, 唐乐梅, 苗延巍, 等. 颞叶癫痫的功能磁共振成像临床应用价值[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2018, 24(1): 10-13.
- [20] OZ G, ALGER JR, BARKER PB, et al. Clinical proton MR spectroscopy in central nervous system disorders[J]. *Radiology*, 2014, 270(3): 658-679.
- [21] 靳先念. 磁共振成像与氢质子磁共振波谱成像检查在癫痫患者海马硬化诊断中的价值比较[J]. *中国民康医学*, 2020, 32(12): 99-100.
- [22] PAN JW, KUZNIECKY RI. Utility of magnetic resonance spectroscopic imaging for human epilepsy[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2015, 5(2): 313-322.
- [23] FOUNTAS KN, TSOUGOS I, GOTSIS ED, et al. Temporal pole proton preoperative magnetic resonance spectroscopy in patients undergoing surgery for mesial temporal sclerosis[J]. *Neurosurg Focus*, 2012, 32(3): E3.
- [24] SIERRA-MARCOS A, MAESTRO I, FALCÓN C, et al. Ictal EEG-fMRI in localization of epileptogenic area in patients with refractory neocortical focal epilepsy[J]. *Epilepsia*, 2013, 54(9): 1688-1698.
- [25] AL-ASMI A, BÉNAR CG, GROSS DW, et al. fMRI activation in continuous and spike-triggered EEG-fMRI studies of epileptic spikes[J]. *Epilepsia*, 2003, 44(10): 1328-1339.
- [26] PITTAU F, GROUILLER F, SPINELLI L, et al. The role of functional neuroimaging in pre-surgical epilepsy evaluation[J]. *Front Neurol*, 2014, 5: 31.
- [27] MATSUURA K, MAEDA M, OKAMOTO K, et al. Usefulness of arterial spin-labeling images in perictal state diagnosis of epilepsy[J]. *J Neurol Sci*, 2015, 359(1/2): 424-429.
- [28] BAMBACH S, SMITH M, MORRIS PP, et al. Arterial spin labeling applications in pediatric and adult neurologic disorders[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020. DOI: 10.1002/jmri.27438. Epub ahead of print.
- [29] SIERRA-MARCOS A, CARREÑO M, SETOAIN X, et al. Accuracy of arterial spin labeling magnetic resonance imaging (MRI) perfusion in detecting the epileptogenic zone in patients with drug-resistant neocortical epilepsy: comparison with electrophysiological data, structural MRI, SISCOM and FDG-PET[J]. *Eur J Neurol*, 2016, 23(1): 160-167.
- [30] NAGESH C, KUMAR S, MENON R, et al. The imaging of localization related symptomatic epilepsies: the value of arterial spin labelling based magnetic resonance perfusion[J]. *Korean J Radiol*, 2018, 19(5): 965-977.
- [31] PENDSE N, WISSMEYER M, ALTRICHTER S, et al. Interictal arterial spin-labeling MRI perfusion in intractable epilepsy[J]. *J Neuroradiol*, 2010, 37(1): 60-63.

- [32] STORTI SF, BOSCOLO GALAZZO I, FELICE ADEL, et al. Combining ESI, ASL and PET for quantitative assessment of drug-resistant focal epilepsy[J]. Neuroimage, 2014, 102 Pt 1: 49-59.
- [33] WIEST R, BEISTEINER R. Recent developments in imaging of epilepsy[J]. Curr Opin Neurol, 2019, 32(4): 530-538.
- [34] GAXIOLA-VALDEZ I, SINGH S, PERERA T, et al. Seizure onset zone localization using postictal hypoperfusion detected by arterial spin labelling MRI[J]. Brain, 2017, 140(11): 2895-2911.
- [35] LEE SM, KWON S, LEE YJ. Diagnostic usefulness of arterial spin labeling in MR negative children with new onset seizures [J]. Seizure, 2019, 65: 151-158.
- [36] SONE D, MAIKUSA N, SATO N, et al. Similar and differing distributions between ^{18}F -FDG-PET and arterial spin labeling imaging in temporal lobe epilepsy[J]. Front Neurol, 2019, 10: 318.
- [37] MILES KA, HAYBALL M, DIXON AK. Colour perfusion imaging: a new application of computed tomography[J]. Lancet, 1991, 337(8742): 643-645.
- [38] DAI DW, ZHAO WY, ZHANG YW, et al. Role of CT perfusion imaging in evaluating the effects of multiple burr hole surgery on adult ischemic Moyamoya disease[J]. Neuroradiology, 2013, 55 (12): 1431-1438.
- [39] TANG Z, PI XL, CHEN F, et al. Fifty percent reduced-dose cerebral CT perfusion imaging of Alzheimer's disease: regional blood flow abnormalities[J]. Am J Alzheimers Dis Other Dement, 2012, 27(4): 267-274.
- [40] GRAND S, TAHON F, ATTYE A, et al. Perfusion imaging in brain disease[J]. Diagn Interv Imaging, 2013, 94(12): 1241-1257.
- [41] HAUF M, SLOTBOOM J, NIRKKO A, et al. Cortical regional hyperperfusion in nonconvulsive status epilepticus measured by dynamic brain perfusion CT[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2009, 30(4): 693-698.
- [42] LI E., D'ESTERRE CD, GAXIOLA-VALDEZ I, et al. CT perfusion measurement of postictal hypoperfusion: localization of the seizure onset zone and patterns of spread[J]. Neuroradiology, 2019, 61(9): 991-1010.
- [43] MARTIN T, HOFFMAN J, ALGER JR, et al. Low-dose CT perfusion with projection view sharing[J]. Med Phys, 2018, 45(1): 101-113.

责任编辑:王荣兵