

动脉自旋标记技术在儿童中枢神经系统检查中的应用

赵珂珂^{1,2},任转琴^{2*}

(1. 陕西中医药大学医学技术学院,陕西 咸阳 712046; 2. 宝鸡市中心医院医学影像科,陕西 宝鸡 721008)

中图分类号:R445; R741

文献标识码:A

文章编号:1006-2084(2018)21-4276-05

摘要:动脉自旋标记技术(ASL)是将脉冲标记的动脉血中水的氢质子作为内源性对比剂研究大脑灌注情况的一种功能磁共振技术,有效避免了外源性对比剂带来的潜在风险,使其以无创、可重复检查等优点更适用于临床检查,尤其是婴幼儿及儿童的检查。目前中枢神经系统疾病是临床关注的高发疾病之一,而 ASL 对颅脑疾病的检查及诊断具有一定的价值,不仅可以用于脑部疾病不同阶段血流灌注情况的评估,还可以对局部区域脑血流量与该区域神经活动的关系进行监测。

关键词:动脉自旋标记技术;脑血流量;大脑灌注;儿童

Application of Arterial Spin Labeling Technique in Children Central Nervous System Examination ZHAO Keke^{1,2}, REN Zhuanqin². (1. School of Medical Technology, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China; 2. Department of Medical Imaging, Baoji Center Hospital, Baoji 721008, China)

Abstract: Arterial spin labeling (ASL) is a functional magnetic resonance imaging technique that uses pulsed-labeled hydrogen protons of water in arterial blood as an endogenous contrast agent to study cerebral perfusion, effectively avoiding the potential risks from the exogenous contrast medium. With the advantages of noninvasiveness and repeatable inspection, it is more suitable for clinical examination, especially in infants and children. Diseases of the central nervous system is currently one of the diseases with high incidence in clinical, and ASL also has a certain value for inspection and diagnosis of cerebral diseases, which can be used not only to assess brain disease condition of different stages of blood perfusion, but also to monitor the relationship between the local cerebral blood flow and neural activity.

Key words: Arterial spin labeling; Cerebral blood flow; Brain perfusion; Children

大脑是人体内代谢最旺盛且对氧需求最大的器官,脑组织只能进行有氧氧化,不能进行无氧酵解,因此脑功能的正常维系高度依赖于正常的血液供应,若血液循环发生障碍则对大脑产生严重的损伤。脑的发育是一高度有序并且随着时间推移不断发生变化的复杂的动态过程。无论是脑血管受损还是病变所致新生血管增多,其结果都反映在脑灌注方面的变化。儿童脑的发育尤为重要,所以研究新的无创性的医学成像技术,能够及时准确地体现儿童脑发育成熟的规律及特点,并为进一步疾病的诊断提供依据。三维动脉自旋标记技术(three-dimension arterial spin labeling, 3D ASL)是一种无创的、无需

外源性对比剂的研究脑组织血流灌注的方法,可用于评估中枢神经系统疾病不同阶段血流灌注情况^[1]。外源性对比剂以及辐射等因素使多种灌注检查方法的应用受到限制,而 3D ASL 无创、可重复性强等优点使其在大脑血流灌注的研究中得到更好的应用。现对 ASL 新技术的研究进展及其在儿童中的临床应用进行综述。

1 动脉自旋标记技术

1.1 动脉自旋标记技术(arterial spin labeling, ASL)
原理及分类 ASL 是以标记的动脉血中的水分子的氢质子作为内源性示踪剂的一种超选择性的动脉血灌注成像技术,其最大的特点是可以在自由扩散,不依赖血脑屏障完整性。流入成像平面的已标记的氢质子与未标记的氢质子混合,通过改变纵向弛豫时间,产生血流依赖的图像对比,并且标记的氢质子的

流量与大脑灌注是成比例的,因此可以获得灌注加权图像,即脑血流量(cerebral blood flow, CBF)图。标记像是标记的动脉血流入组织后经过图像采集得到的图像,控制像是未标记的动脉血经过成像得到的图像,两者的差值即为灌注像^[2]。ASL 是研究大脑血流灌注的一种功能磁共振技术,可以分为连续 ASL(continuous arterial spin labeling, CASL)、脉冲式 ASL(pulsed arterial spin labeling, PASL)、假连续脉冲 ASL(pseudo continuous arterial spin labeling, pCASL)^[3,4],以及目前新出现的改良技术如速度选择 ASL、血管编码 ASL 等。CASL 技术虽然具有信噪比高、成像范围大的特点,但有较高的设备硬件要求,需要专门的线圈^[5]; PASL 的特点是操作简单且对设备要求较低,但是图像信噪比低,成像范围受限;而 pCASL 是对前两者的结合,继承了两者优点的同时也克服了缺点,既往有研究指出 pCASL 在 3.0 T 磁共振上信噪比较 PASL 高 50%,标记效率较 CASL 高 12%^[6]; 目前速度选择 ASL 还处于研究阶段,临床应用少; 血管编码 ASL 可以对不同部位的血管进行标记以区分各分支血管的血流分布范围及血流量^[7]。因此,目前临床主要应用 pCASL。

1.2 3D ASL 技术特点 以往传统的 2D ASL 技术主要基于回波平面成像进行信号采集,会导致图像的磁敏感伪影、运动伪影严重,且图像的信噪比低。而 3D ASL 技术是采用的快速自旋回波的三维螺旋式采集,扫描时间短,不仅能有效克服回波平面成像所带来的磁敏感伪影,还能有效克服运动伪影,提高图像信噪比,并且 3D ASL 采用背景抑制技术,减少了噪音,增加了参数的敏感性及可重复性^[8,9]。

目前有多种成像技术可用于研究组织灌注,如动态磁敏感对比成像、正电子发射计算机体层成像、单光子发射计算机体层成像、计算机断层扫描灌注成像等。正电子发射计算机体层成像、单光子发射计算机体层成像等易产生放射性损伤,动态磁敏感对比成像无辐射但采用的是平面回波序列容易产生磁敏感伪影,降低图像的信噪比,且这些技术均需要外源性对比剂,所以以上不利之处限制了这些技术在儿科的应用。3D ASL 技术作为一种新的无创的非对比剂灌注成像方法,能够更安全地评价组织灌注水平,其信噪比高、成像范围大、采集时间短,克服了常规 ASL 的缺点^[10],为大脑灌注变化提供了

重要的信息,在颅内疾病的诊断、治疗及预后评估方面具有独特的优势^[11-12]。而生理情况下儿童的血流量较成人高,使 ASL 上图像的信噪比也相应提高^[13]。基于以上这些原因,ASL 在临床的应用逐渐普及,其效果也得到广泛认可,且无需外源性对比剂及可重复性强的特点也决定了该技术在反映儿童正常及不同病理情况下的脑血流灌注状况的优势。

2 ASL 技术在大脑血流灌注中的应用

2.1 正常儿童脑部血流灌注情况 对大脑发育的不同阶段的了解,有益于掌握高度有序的大脑发育过程以及各种因素导致的大脑发育异常。国外有学者利用 ASL 技术对 202 名健康儿童(5~18 岁)进行脑灌注成像来观察大脑结构发育和灌注变化,他们分别计算了大脑 22 个区域的灰质密度和脑部灌注,结果发现,所测量部位的灰质密度随着年龄的增加达到最大值,年龄与灰质密度之间存在相关性并呈正 U 形轨迹,而灌注轨迹却相反^[14]。既往研究比较了 7~13 个月未使用镇静剂的发育正常的婴儿睡觉时的脑部灌注图像,结果显示,相对 CBF 随着年龄的增加也呈上升趋势,13 个月婴儿的脑学流量值最高^[15]。de Vis 等^[16]对 33 例胎龄为 30 周的早产儿及出生 3 个月的足月新生儿进行了 PASL 检查,结果发现早产儿与足月儿大脑灌注有明显不同,其中足月儿的基底核和丘脑是其脑部灌注最高区域,而且足月儿枕叶和额叶皮质区域灌注明显高于早产儿。既往有学者对 3 个不同年龄组(儿童组、青少年组及成人组)的 44 个健康受试者进行 ASL 扫描并获得脑灌注图,通过分析各组灰质及白质的 CBF 值从而得出 CBF 值随年龄增加而降低的特点,尤其在灰质中表现尤为明显^[17]。Miranda 等^[18]采用 CASL 或 PASL 技术评估了一组 4~5 岁儿童脑部血流灌注情况并进行观察分析,结果发现脑部血流量伴随着年龄的增长以及灰、白质的发育成熟逐渐减少。可见,可以通过评估大脑灌注情况观察儿童脑部发育情况。

2.2 新生儿缺氧缺血性脑病(hypoxic ischemic encephalopathy, HIE) HIE 是由于围生期缺氧或 CBF 减少所致的缺氧缺血性脑损伤,临床出现异常的神经系统症和体征,若不及时治疗将会导致脑瘫、智力低下等神经系统后遗症。CBF 值的改变在评估新生儿 HIE 病情发展中发挥重要作用,但常规磁共振

检查不能反映大脑血流灌注情况,而 ASL 是一种新型的无创性的研究组织灌注变化的磁共振技术。既往有研究对 33 例 HIE 患儿进行 ASL 脑灌注研究,分析发现对于 HIE 阳性检测率的评估,ASL 技术与磁共振波谱相比差异无统计学意义^[19]。国内有学者应用 pCASL 对一组足月的 HIE 患儿进行脑血流灌注测量,通过分析发现,正常对照组中足月儿的基底核区 CBF 高于顶叶皮质,灰质血流量较白质高^[20]。国外有学者发现足月 HIE 患儿 72 h 内缺氧缺血损伤区域处于高灌注状态^[21]。孟琳琳等^[22]对 42 例 HIE 患儿进行大脑灌注研究,结果发现 HIE 组丘脑及豆状核的相对 CBF 值较对照组(无缺氧缺血病史的生理性高胆红素血症足月新生儿)高,额叶白质相对 CBF 值则相反。邢可舟等^[23]分析了 16 例 HIE 足月新生儿的 ASL 灌注情况,发现 HIE 组患儿的基底核及丘脑的相对 CBF 较健康对照组高,且灌注量与 HIE 的严重程度有关。由此可见,ASL 在诊断和观察 HIE 方面具有重要作用,可以作为诊断 HIE 的重要磁共振检查方法。

2.3 缺血性脑卒中 目前已经应用 ASL 技术进行了多项实验,提示缺血性脑疾病病灶区表现为低灌注,并且该技术可以对缺血区 CBF 值进行监测,从而了解病情的进展情况。既往有学者利用 ASL 技术研究了缺血性脑卒中新新生儿(4 例)脑部灌注情况,结果发现 1 例患儿表现为病灶区域为高灌注,其余患儿表现为中心高灌注外周低灌注^[24]。黎丽等^[25]应用扩散张量成像和 ASL 技术分析了 64 例急性脑卒中患者病灶血流灌注情况及白质纤维束完整性,结果发现病灶区各参数值[各向异性分数、表观扩散系数和相对 CBF 值]均小于对照区(自身对照),而各参数值之间无相关性。Bookkers 等^[26]研究了 3D ASL 技术和动态磁敏感对比成像技术在缺血性脑卒中诊断中的一致性,结果发现两种方法的灌注区基本相等,且准确性及敏感性接近,可见 3D ASL 技术在缺血性脑卒中的应用会越来越广泛。

2.4 脑血管畸形 动脉自选标记技术除在缺血性脑卒中的应用外,还可以清晰显示潜在的动静脉血管分流,可用于动静脉畸形的诊断和随访^[27]。动静脉畸形是常见的先天性脑血管畸形的一种,由供血动脉、粗大的引流静脉以及发育异常的血管团构成。静脉畸形的典型表现是脑实质内粗大的引流静脉,

其周围可见较多的小的髓静脉,呈“水母头”样改变。王芳等^[28]收集了 7 例脑血管畸形患儿(3 例动静脉畸形、2 例静脉畸形、2 例海绵状血管瘤),动静脉畸形患儿的病灶区显示为明显的高灌注,静脉畸形患儿 CBF 图上病灶区未见明显异常灌注,这是因为 ASL 技术是以标记的动脉血中的氢质子进行成像的,静脉不显影,与磁敏感加权图像结合可以清晰地显示病灶的供血动脉及引流静脉,2 例海绵状血管瘤患儿因病灶区域血管间隙缺乏新生血管显示为低灌注。

2.5 烟雾病 烟雾病是一种少见的脑血管疾病,是颈内动脉末端和其属支出现进行性的狭窄或闭塞,为维持大脑的正常循环血流量而使颅底血管发生代偿性的增生形成烟雾状血管^[29]。国外有学者利用 pCASL 和 CT 分别对 17 例烟雾病患者进行灌注检查,通过定性分析脑灌注情况,结果发现两种检查方法所得到的灌注图像之间是有相关性的,并且可通过多个标记延迟时间的选择提高 CBF 质量^[30]。国内有学者对 9 例烟雾病患者进行 3D ASL 扫描,研究结果发现 1 例表现为高灌注,可能是由于组织的再灌注引起,其余 8 例病变区均表现为低灌注,且与磁共振血管造影所显示的动脉狭窄区吻合^[28]。唐小平等^[31]对已确诊的 17 例单侧烟雾病患者进行 3D ASL 扫描,发现受累侧的额颞叶(大脑中动脉)供血区 CBF 值较对侧减低,而患侧枕叶 CBF 值与对侧相比差异无统计学意义,提示受累大脑中动脉很难自行通过侧支循环代偿。CBF 值在一定程度上可反映脑组织的血流动力学改变,进而准确评估烟雾病患者的病情并为临床提供可靠的影像学依据。

2.6 癫痫 癫痫是由多种病因引起的神经元异常过度放电导致的中枢神经系统功能失调的慢性脑部疾病,按病因可分为原发性癫痫和继发性癫痫,是对儿童和青少年危害性极大的常见的中枢神经系统疾病。了解癫痫的病理生理机制及其所引起的脑部血流改变情况对该病的诊断及治疗尤为重要,而 ASL 技术可以反映癫痫患者的脑血流情况。沈连芳等^[32]应用 ASL 技术对内侧颞叶癫痫患者进行患侧颞叶 CBF 值与临床病程的相关性研究,发现颞叶 CBF 值随着发病时间延长而减低,且呈负相关。田冲^[33]对 19 例特发性全面性癫痫患儿进行 3D ASL 大脑灌注研究,发现额叶、双侧颞中回、右侧上部中央

后回、双侧楔前叶、左侧岛叶、双侧丘脑、双侧尾状核头等脑区的 CBF 值低于健康对照组,提示这些区域灌注不足。国外有学者测量分析伴或不伴内侧颞叶萎缩的颞叶癫痫患者的海马、杏仁核及内侧颞叶的相对 CBF 值,差异有统计学意义^[34]。可见,3D ASL 技术在癫痫的预防、治疗评估等方面具有潜在的应用价值。

2.7 脑肿瘤的分级 颅内肿瘤类型繁多,正确判断肿瘤类型及级别对其治疗方案的选择有至关重要的作用,然而评价肿瘤良恶性的主要生物学标记是肿瘤的新生血管,其中恶性肿瘤的生长需要大量的血液供应,所以应用灌注成像对肿瘤病变进行研究是评价其良恶性的最准确的影像学依据。儿童颅内肿瘤复杂,及时发现并了解肿瘤的分级情况,对其进行有效的治疗将对日后儿童的生活及发展起重要作用。3D ASL 技术是新型的研究组织灌注的方法,国外有研究指出儿童低级别胶质瘤比高级别灌注更低,所以应用 ASL 可以准确评估胶质瘤的灌注情况并对肿瘤进行分级^[35]。既往有学者对胶质瘤的血供情况进行研究,指出随着肿瘤细胞的不断分裂会迅速出现大量新生毛细血管使肿瘤快速增长,较早期胶质瘤相比表现为高灌注^[36],可见肿瘤的脑血流值可以用来判定肿瘤的级别。有学者对 54 例初期脑肿瘤儿童进行 3D pCASL 技术检查,经分析得到的肿瘤血流量值与病理分级及组织学特征发现,肿瘤的相对血流量值与其分级有明显相关性,即低级别肿瘤的 CBF 值显著低于高级别肿瘤^[37]。江晶晶等^[38]应用 ASL 技术分析 10 例低级别和 13 例高级别星形胶质瘤的血流灌注情况,发现低级别胶质瘤灌注低于高级别胶质瘤,提示 ASL 技术可用于肿瘤的分级。此外,也有学者指出 3D ASL 技术较常规增强扫描能更加准确地显示肿瘤真正的边界^[1]。由此可见,3D ASL 能监测肿瘤供血情况,在评价肿瘤分级中有重要的应用价值。

3 结语

ASL 技术可重复性强、提高了图像信噪比、降低了磁敏感伪影及运动伪影,显示大脑灌注信息更加准确,在脑血管疾病、脑肿瘤、癫痫等疾病中的应用越来越成熟。并且随着自身理论及磁共振技术的不断发展,3D ASL 技术不断改良,应用范围更加广泛,并且可以与多种磁共振新技术如血氧水平依赖

相结合共同评估大脑血流灌注情况^[1],为今后的各系统疾病的诊断、治疗及预后评估等工作提供重要的影像学依据,而且基于该技术无创性等优点,使其在儿科疾病的临床应用上具有更广阔的应用前景,并逐渐体现其应用价值。

参考文献

- [1] 马进,张翱. 3D-ASL 技术的研究进展及临床应用 [J]. 国际医学放射学杂志,2015,38(1):50-53.
- [2] 王利,郑罡,赵铁柱,等. 动脉自旋标记技术在脑部疾病中的临床应用 [J]. 生物医学工程学杂志,2013,30(1):195-199.
- [3] Petcharunpaisan S, Ramalho J, Castillo M. Arterial spin labeling in neuroimaging [J]. World J Radiol, 2010,2(10):384-398.
- [4] Zaharchuk G. Arterial spin label imaging of acute ischemic stroke and transient ischemic attack [J]. Neuroimaging Clin N Am, 2011,21(2):285-301.
- [5] Robson PM, Dai W, Shankaranarayanan A, et al. Time-resolved vessel-selective digital subtraction MR angiography of the cerebral vasculature with arterial spin labeling [J]. Radiology, 2010, 257(2):507-515.
- [6] Wu WC, Fernández-Seara M, Detre JA, et al. A theoretical and experimental investigation of the tagging efficiency of pseudocontinuous arterial spin labeling [J]. Magn Reson Med, 2007, 58(5):1020-1027.
- [7] 吴冰,王晶,郭佳,等. 血管编码动脉自旋标记 MR 脑灌注成像初步研究 [J]. 中华放射学杂志,2008,42(11):1151-1154.
- [8] Vidorreta M, Wang Z, Rodríguez I, et al. Comparison of 2D and 3D single-shot ASL perfusion fMRI sequences [J]. Neuroimage, 2013,66:662-671.
- [9] Van Gelderen P, de Zwart J, Duyn JH. Pitfalls of MRI measurement of white matter perfusion based on arterial spin labeling [J]. Magn Reson Med, 2008,59(4):788-795.
- [10] 初国新,衣闯,方昊,等. 3D-ASL 动脉自旋标记灌注技术及 MRA 联合应用在脑缺血疾病影像诊断价值 [J]. 中国实验诊断学,2013,17(6):1136-1137.
- [11] 车英玉,杨子涛,程敬亮. 3D ASL 与 DSC 灌注技术在脑肿瘤的对比研究 [J]. 临床放射学杂志,2014,33(5):770-774.
- [12] 刘素兰,赵斌,王光彬. 磁共振 ASL 灌注成像及其在脑疾病诊断中的临床应用 [J]. 医学影像学杂志,2007,17(10):1116-1118.
- [13] Wang J, Licht DJ, Jahng GH, et al. Pediatric perfusion imaging using pulsed arterial spin labeling [J]. J Magn Reson Imaging, 2003,18(4):404-413.
- [14] Taki Y, Hashizume H, Sassa Y, et al. Correlation between gray matter density-adjusted brain perfusion and age using brain MR images of 202 healthy children [J]. Hum Brain Mapp, 2011, 32(11):1973-1985.
- [15] Wang Z, Fernandez Seara M, Alsop DC, et al. Assessment of functional development in normal infant brain using arterial spin

- labeled perfusion MRI [J]. Neuroimage, 2008, 39(3): 973-978.
- [16] de Vis JB, Petersen ET, de Vries LS, et al. Regional changes in brain perfusion during brain maturation measured non-invasively with Arterial Spin Labeling MRI in neonates [J]. Eur J Radiol, 2013, 82(3): 538-543.
- [17] Biagi L, Abbruzzese A, Bianchi MC, et al. Age dependence of cerebral perfusion assessed by magnetic resonance continuous arterial spin labeling [J]. J Magn Reson Imaging, 2007, 25(4): 696-702.
- [18] Miranda MJ, Olofsson K, Sidaros K. Noninvasive measurements of regional cerebral perfusion in preterm and term neonates by magnetic resonance arterial spin labeling [J]. Pediatr Res, 2006, 60(3): 359-363.
- [19] 史浩, 宋丹, 张永霞, 等. 新生儿缺氧缺血性脑病磁共振动脉自旋标记成像 33 例报告 [J]. 中华儿科杂志, 2012, 50(2): 131-135.
- [20] 冀旭, 范国光. 连续动脉自旋标记磁共振灌注成像对足月缺氧缺血性脑病患儿的初步研究 [J]. 磁共振成像, 2011, 2(1): 19-23.
- [21] Wintermark P, Moessinger AC, Gudinchet F, et al. Perfusion-weighted magnetic resonance imaging patterns of hypoxic-ischemic encephalopathy in term neonates [J]. J Magn Reson Imaging, 2008, 28(4): 1019-1025.
- [22] 孟琳琳, 王青, 李宜芳, 等. MR ASL 灌注成像在足月新生儿缺氧缺血性脑病诊断中的应用 [J]. 山东大学学报, 2014, 52(2): 65-68.
- [23] 邢可舟, 孔晓勤, 葛亚平, 等. 新生儿缺氧缺血性脑病的磁共振弥散张量成像及动脉自旋标记技术的诊断价值研究 [J]. 中华脑科疾病与康复杂志, 2016, 6(1): 37-41.
- [24] Wintermark P, Warfield SK. New insights in perinatal arterial ischemic stroke by assessing brain perfusion [J]. Transl Stroke Res, 2012, 3(2): 255-262.
- [25] 黎丽, 孟志华, 陈琳, 等. DTI 和 ASL 在急性缺血性脑卒中诊断和治疗过程中的应用价值 [J]. 医学影像学杂志, 2017, 27(10): 1863-1865.
- [26] Bookers RP, Hernandez DA, Merino JC, et al. Whole brain arterial spin labeling perfusion MRI in patients with acute stroke [J]. Stroke, 2012, 43(5): 1290-1293.
- [27] Wolf RL, Wang J, Detre JA, et al. Arteriovenous shunt visualization in arteriovenous malformations with arterial spin-labeling MR imaging [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2008, 29(4): 681-687.
- [28] 王芳, 邵剑波, 张文涵, 等. 3D ASL 成像在儿童脑血管病变诊断中的应用价值 [J]. 放射学实践, 2015, 30(12): 1177-1181.
- [29] Hashimoto N, Tominaga T, Miyamoto S, et al. Guideines for diagnosis and treatment of moyamoya disease (Spontaneous Occlusion of the Circle of Willis) [J]. Neurol Med Chir, 2012, 52(5): 245-266.
- [30] Wang R, Yu S, Alger JR, et al. Multi-delay arterial spin labeling perfusion MRI in moyamoya disease-comparison with CT perfusion imaging [J]. Eur Radiol, 2014, 24: 1135-1144.
- [31] 唐小平, 余期云, 王志强, 等. 3.0T 高分辨率磁共振血管壁成像及伪连续式动脉自旋标记技术在单侧烟雾病中的应用 [J]. 中国医学影像技术, 2016, 32(3): 348-352.
- [32] 沈连芳, 张志强, 卢光明, 等. 内侧颞叶癫痫患者颞叶及颞叶外低灌注的动脉自旋标记 MRI [J]. 中华放射学杂志, 2012, 46(3): 220-224.
- [33] 田冲. 3D ASL 灌注成像对儿童及青少年特发性全面性癫痫的研究 [D]. 遵义: 遵义医学院, 2016.
- [34] Guo XQ, Xu SC, Wang GB, et al. Asymmetry of cerebral blood flow measured with three-dimensional pseudocontinuous arterial spin labeling MR imaging in temporal lobe epilepsy with and without mesial temporal sclerosis [J]. J Magn Reson Imaging, 2015, 42(5): 1386-1397.
- [35] Dangouloff-Ros V, Deroulers C, Foissac F, et al. Arterial spin labeling to predict brain tumor grading in children: Correlations between histopathologic vascular density and perfusion MR imaging [J]. Radiology, 2016, 28(2): 553-566.
- [36] Shen N, Zhao L, Jiang R, et al. Intravoxel incoherent motion-diffusion-weighted imaging Analysis of diffusion and microperfusion in grading gliomas and comparison with arterial spin labeling for tumor perfusion [J]. Magn Reson Imaging, 2016, 44(3): 620-632.
- [37] Yeom KW, Mitchell LA, Lober RM, et al. Arterial spin-labeled perfusion of pediatric brain tumors [J]. Am J Neuroradiol, 2014, 35(2): 395-401.
- [38] 江晶晶, 赵凌云, 姚义好, 等. 三维动脉自旋标记灌注成像在星形胶质瘤术前分级中的应用 [J]. 放射学实践, 2014, 29(8): 896-900.

收稿日期: 2018-04-16 修回日期: 2018-08-13 编辑: 相丹峰