

• 头颈部影像学 •

颅颈部高分辨率 MRA: 常规黑血序列与 SNAP 序列的比较

陆艳, 黄仁军, 李勇刚

【摘要】 目的:比较非对比增强血管和斑块内出血同时成像(SNAP)序列与常规黑血(BB)序列在颅颈动脉(CCA)成像中的图像质量,探讨 SNAP 序列的临床实用性。**方法:**对 45 例患者行颅颈动脉高分辨率 MRI 检查,扫描序列包括 SNAP、 T_1 WI-BB、 T_2 WI-BB 及容积采集各向同性快速自旋回波质子加权成像(PDWI-VISTA)。分别在各序列图像上测量和计算管腔及管壁的信噪比(SNR)、管壁与管腔信号差异噪声比(SDNR)及管壁与管腔的对比噪声比(CNR)。对诊断为颈内动脉夹层壁内血肿(IMH)的 20 例患者按照上述方法计算壁内血肿的 SNR 及壁内血肿与管腔的 SDNR 和 CNR。采用单因素方差分析和 Student-Newman-Keuls q 检验对 4 个序列的上述各项测量指标分别进行两两比较。**结果:**(1)SNAP 序列与 T_1 WI-BB、 T_2 WI-BB 及 PDWI-VISTA 序列之间的管腔 SNR、管壁 SNR、管壁与管腔 SDNR 的差异均具有统计学意义($P < 0.001$),而与其它序列的管壁与管腔 CNR 的差异无统计学意义($P = 0.014$);(2)两两比较发现 SNAP 序列的管腔和管壁 SNR 与其它 3 个序列间的差异具有统计学意义($P < 0.05$);(3)20 例有壁内血肿的患者壁内血肿 SNR 及血肿与管腔 CNR 在 SNAP 序列与其它 3 个序列之间具有显著的统计学差异(SNR: $P < 0.001$; CNR: $P < 0.001$),而壁内血肿与管腔 SDNR 的差异无统计学意义($P = 0.048$),但血肿与管腔 SDNR 在 SNAP 序列中均值最高;(4)两两比较发现血肿 SNR 及血肿与管腔 CNR 在 SNAP 序列与其它 3 种序列之间差异均有统计学意义($P < 0.05$)。**结论:**虽然 SNAP 序列能够清晰显示管壁及管腔结构,但管壁与管腔对比度不及 T_1 WI-BB 序列;而 SNAP 序列在识别壁内血肿方面较其它 3 个序列具有优势。

【关键词】 磁共振成像;高分辨率;血管成像;头颈动脉;壁内血肿

【中图分类号】 R445.2; R543.4 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2019)08-0863-06

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2019.08.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparison of simultaneous non-contrast angiography and intraplaque hemorrhage imaging with conventional black blood technique in the high resolution craniocervical artery imaging LU Yan, HUANG Ren-jun, LI Yong-gang. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Soochow University, Jiangsu 215123, China

【Abstract】 Objectives: To investigate the clinical application of simultaneous non-contrast angiography and intraplaque hemorrhage (SNAP) compared with conventional black blood technology. **Methods:** 45 patients received high resolution magnetic resonance imaging of the craniocervical artery using sequences including SNAP, T_1 WI-BB (T_1 -weighted imaging-black blood), T_2 WI-BB (T_2 -weighted imaging-black blood) and proton density weighted imaging-volume isotropic turbo-spin-echo acquisition (PDWI-VISTA). The signal to noise ratio (SNR) of wall and lumen, the signal difference to noise ratio (SDNR) and contrast noise ratio (CNR) of wall to lumen were separately calculated. The single factor variance analysis and q -test (Student-Newman-Keuls method) were used to compare the SNR and SDNR respectively between any two sequences. As per the 20 patients that definitely displayed intramural hematoma, signal to noise ratio (SNR), the signal difference to noise ratio (SDNR) and the contrast noise ratio (CNR) were calculated. The single factor variance analysis and q -test (Student-Newman-Keuls method) were used to compare the SNR and CNR of hematoma to lumen between any two sequences. **Results:** ① The SNR of wall and lumen and SDNR of wall to lumen were found to have

作者单位: 215123 江苏, 苏州大学附属第一医院放射科

作者简介: 陆艳(1993-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事医学影像学研究工作。

通讯作者: 李勇刚, E-mail: liyonggang224@163.com

基金项目: 2018 年度苏州市临床重点病种诊疗技术专项(LCZX201801)。

significant statistical difference among SNAP, T_1 WI-BB, T_2 WI-BB and PDWI-VISTA (lumen SNR: $P < 0.001$; wall SNR: $P < 0.001$; wall to lumen SDNR: $P < 0.001$); there were no significant statistical difference about wall-lumen CNR of T_1 WI-BB, T_2 WI-BB and PDWI-VISTA ($P = 0.014$). ②The SNR of arterial wall and lumen of SNAP sequence was found to have significant difference compared with the other three sequences by use of pair-wise comparison (all $P < 0.05$). ③As per the 20 patients with intramural hematoma, the hematoma SNR and CNR of the hematoma to the lumen showed obvious statistical difference among the above four sequences (hematoma SNR: $P < 0.001$; hematoma to lumen CNR: $P < 0.001$), there were no obvious statistical difference of the SDNR of hematoma to lumen ($P = 0.048$), but it had the highest mean value in SNAP sequence. ④The hematoma SNR and hematoma to lumen CNR of SNAP sequence was found with obvious difference compared with T_1 WI-BB, T_2 WI-BB and PDWI-VISTA sequences by pair-wise comparison (all $P < 0.05$). **Conclusion:** Although the SNAP sequence can clearly show the arterial wall and lumen structure, the contrast between the wall and lumen is not as good as the T_1 WI-BB sequence. However, SNAP sequence has advantages over the other three sequences in the identification of intramural hematoma.

[Key words] Magnetic resonance imaging; High-resolution; Angiography; Cranial carotid artery; Intramural hematoma

随着医学影像技术的发展,高分辨率磁共振成像(high resolution magnetic resonance imaging, HR-MRI)能够提供动脉的管腔和管壁信息,成为评价颅颈动脉管壁及管腔的可行方法。近年来二维(two-dimensional, 2D)及三维(three-dimensional, 3D)黑血技术的运用越来越广泛,包括黑血(black blood, BB)的 T_1 WI 及 T_2 WI 序列和 3D 可变再聚焦翻转角序列(3D variable refocusing flip angle sequences)等^[1]。非对比增强血管成像和斑块内出血成像(simultaneous noncontrast angiography and intraplaque hemorrhage imaging, SNAP)技术是一种新型的管壁成像技术,是一种具有多重对比的成像序列,一次扫描可以生成灰血参照(reference, Ref)、黑血校正(corrected real, CR)和亮血 MRA 共 3 个图像集^[2],从而能同时获得血管狭窄程度及血管管壁情况的影像信息,尤其对斑块内出血(intraplaque hemorrhage, IPH)显示具有很高的敏感度和特异度。Li 等^[3]的研究结果显示在评估颅颈动脉夹层管腔狭窄和壁内血肿时,所有壁内血肿均在 SNAP 序列上显示良好,SNAP 序列与多序列 MRI 间具有较好的一致性,并节省了 50% 的扫描时间。本研究通过比较 SNAP 序列、 T_1 WI-BB、 T_2 WI-BB 和质子加权各项同性容积采集快速自旋回波(proton density weighted imaging-volume isotropic turbo-spin-echo acquisition, PDWI-VISTA)序列的图像质量,旨在探讨 SNAP 序列在头颈部血管病变中的临床应用价值。

材料与方法

1. 临床资料

2017 年 7 月—2017 年 12 月对有症状且经颅多普勒(transcranial doppler, TCD)发现有血管腔狭窄的 45 例患者行颅颈动脉(颈内动脉、椎动脉和大脑中动脉)的 HR-MRI 检查,男 35 例,女 10 例,平均年龄(57.2 ± 12.6)岁。

2. 检查方法

使用 Philips Achieva 3.0T 磁共振仪和 8 通道头颈联合线圈进行 MRI 检查。首先采用三维时间飞跃法(three dimensional-time of flight, 3D-TOF)行头颅常规 MRA,扫描参数:TR 27 ms, TE 6.9 ms, 翻转角 20° , 视野 $240 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 矩阵 320×256 , 扫描时间 2 min 40 s。然后根据 3D-TOF MRA 源图像和最大密度投影(maximum intensity projection, MIP)重组图像上显示的单侧或双侧颈内动脉或椎动脉的狭窄部位,分别采用 4 个序列(SNAP、 T_1 WI-BB、 T_2 WI-BB 及 VISTA-PDWI)行 HR-MRI 检查。① T_1 WI-BB 序列: TR 1000 ms, TE 20 ms, 翻转角 90° , 视野 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 矩阵 168×166 , 扫描时间 6 min 56 s; ② T_2 WI-BB 序列: TR 3000 ms, TE 40 ms, 翻转角 90° , 视野 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 矩阵 168×166 , 扫描时间 6 min 56 s; ③ VISTA-PDWI 序列: TR 2000 ms, TE 39 ms, 翻转角 90° , 视野 $16 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$, 矩阵 400×352 , 扫描时间 4 min 18 s; ④ SNAP 序列: TR 10 ms, TE 4.9 ms, 翻转角 90° , 视野 $16 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$, 矩阵 200×196 , 扫描时间 3 min 30 s。

3. 图像分析方法

由两位神经影像医师在工作站上共同对常规 MRI、MRA 和 HR-MRI 的图像质量进行客观评价。如果血管的管腔和外壁同时显示清晰,则进行下一步

分析,否则不纳入本研究范围。

分别在 4 个 HR-MRI 序列(SNAP 序列选取第二个黑血校正集)的图像上,测量颈内动脉和椎动脉管腔及血管壁的信号强度值(signal intensity, SI),保证同一支血管在各序列图像上选取的 ROI 的大小和位置相同,管壁 ROI 大小约 0.002 cm²;同时选择各 ROI 同层面的颈部肌肉或脑实质区域,测量其 CT 值和标准差(signal standard deviation, SD),以 SD 作为背景噪声。各部位由同一位医师测量 3 次,取平均值。然后按照下列公式计算管腔及管壁的信噪比(signal to noise ratio, SNR)、管壁与管腔的信号差异噪声比(signal difference to noise ratio, SDNR)及管壁与管腔的对比噪声比(contrast noise ratio, CNR):

$$SNR = \frac{SI}{SD}$$

(1)

$$SDNR = \frac{SI_{管壁} - SI_{管腔}}{SD}$$

(2)

$$CNR = \frac{SNR_{管腔} - SNR_{管壁}}{SD}$$

(3)

对存在壁内血肿的患者,按照上述方法分别测量血肿和管腔的信号值,根据公式计算出血肿与管腔的 SDNR 和 CNR。

4. 数据处理和统计学方法

使用 SPSS 17.0 (IBM) 统计软件进行统计学分析。采用单因素方差分析对 4 个序列图像上颅颈动脉

的管腔、管壁的 SNR,以及管壁与管腔、血肿与管腔(对存在壁内血肿的患者)的 SDNR、CNR 进行比较,建议水准 $\alpha = 0.05$ 。以 $P < 0.001$ 为差异有高度统计学意义,进一步采用 Student-Newman-Keuls q 检验分别对 4 个序列的各项参数进行两两比较。

结 果

45 例患者中成像血管为颈内动脉(图 1~2)18 例,椎动脉(图 3)10 例,大脑中动脉(图 4)17 例。其中 20 例患者的颅颈部血管(颈内动脉 13 例,椎动脉 7 例)在 SNAP 图像上显示管壁内可见偏心性弧形明显高信号区,结合内膜瓣及"双腔征"等特点高度提示为壁内血肿(图 3)。根据其 T₁ 和 T₂ 信号特征,诊断为超急性期 7 例、亚急性晚期 12 例及慢性期 1 例。

1. 四个序列上管腔和管壁图像质量的比较

四个序列图像上血管腔和血管壁的各项参数测量结果见表 1。

表 1 四个序列图像上管腔和管壁各项参数测量结果

参数	SNAP	T ₁ WI-BB	T ₂ WI-BB	VISTA-PDWI
SNR 管壁	296.5131	34.4640	28.0044	12.2500
SNR 管腔	278.2809	7.0778	5.6420	2.7836
CNR 管壁-管腔	2.9831	3.4460	3.2700	1.2098
SDNR 管壁-管腔	18.0139	26.4418	22.1160	9.2796

四个序列图像上颅颈部血管的管腔和管壁的

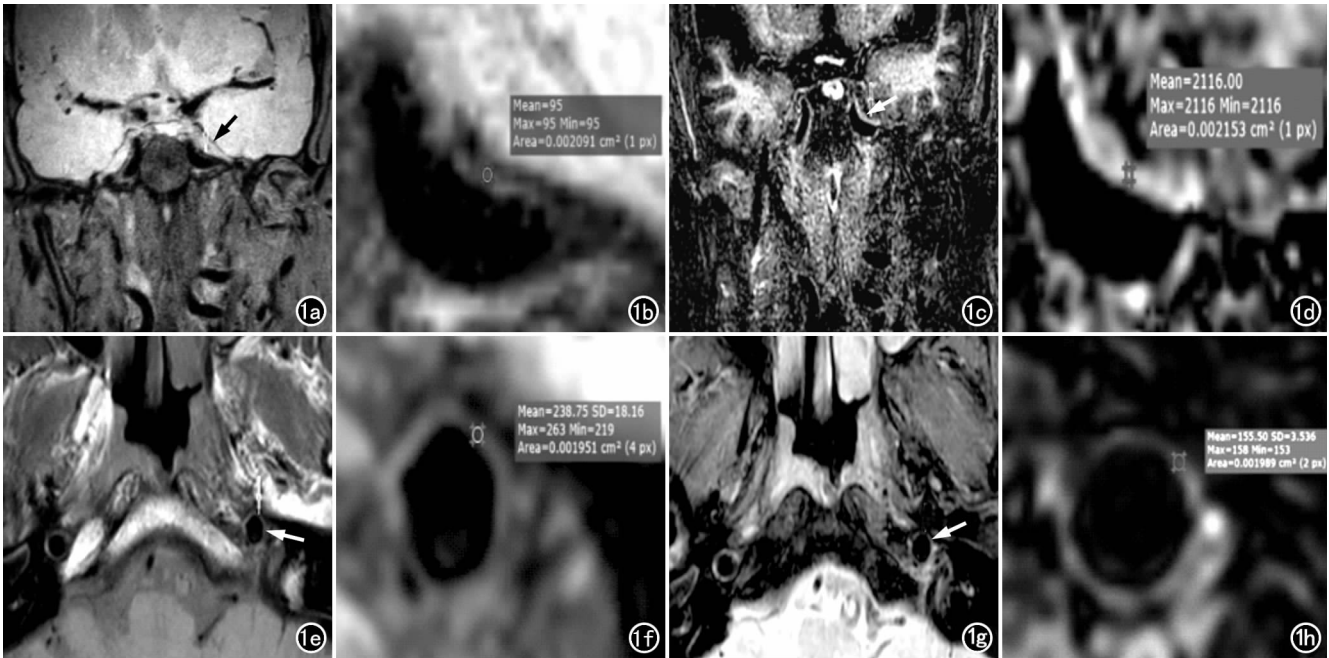


图 1 正常左侧颈内动脉。a) VISTA-PDWI 序列冠状面图像,显示左侧颈内动脉水平段(箭),血管壁呈等~高信号;b)图 a 的局部放大图像,在颈内动脉管壁勾画 ROI;c) SNAP 序列冠状面图像,显示左侧颈内动脉水平段(箭),血管壁呈稍高信号;d)图 c 的局部放大图像,在颈内动脉管壁勾画 ROI;e) T₁ WI-BB 序列横轴面图像,显示左侧颈内动脉水平段(箭),血管壁呈稍高信号;f)图 e 的局部放大图像,在颈内动脉管壁勾画 ROI;g) T₂ WI-BB 序列横轴面图像,显示左侧颈内动脉水平段(箭),血管壁呈稍高信号;h)图 g 的局部放大图像,在颈内动脉管壁勾画 ROI。

SNR 比较,差异均有高度统计学意义($F=243.182$, $P<0.001$; $F=201.303$, $P<0.001$),且以 SNAP 序列上管腔和管壁的 SNR 值最高。四个序列之间管壁与管腔 SDNR 的差异有高度统计学意义($F=12.948$, $P<0.001$),以 T_1 WI-BB 序列上的均值最高。四个序列之间管壁与管腔 CNR 的差异无统计学意义($F=3.657$, $P=0.014$)。

进一步对组间差异有高度统计学意义的 3 个参数采用 q 检验进行组间两两比较,结果显示:SNAP 序列上管腔和管壁的 SNR 与其它 3 个序列间的差异均有统计学意义(管腔 SNR: $P=0.0003$, $P=0.0002$, $P=0.0005$; 管壁 SNR: $P=0.0002$, $P=0.0001$, $P=0.0001$);而 T_1 WI-BB、 T_2 WI-BB 及 VISTA-PDWI 序列之间进行两两比较,管腔和管壁 SNR 的差异均无统计学意义(管腔 SNR: $P=0.908$, $P=0.729$, $P=0.818$; 管壁 SNR: $P=0.635$, $P=0.103$, $P=0.247$);管壁与管腔 SDNR 在 SNAP 序列与 T_1 WI-BB 和 VISTA-PDWI 之间差异具有统计学意义($P=0.004$, $P=0.003$),在 VISTA-PDWI 与 T_1 WI-BB 和 T_2 WI-BB 之间差异亦具有统计学意义($P=0.0001$, $P=0.0001$),而在 SNAP 序列与 T_2 WI-BB 之间、及 T_1 WI-BB 与 T_2 WI-BB 之间差异无统计学意义($P=0.156$, $P=0.134$)。

2. 四个序列上血肿成像质量的比较

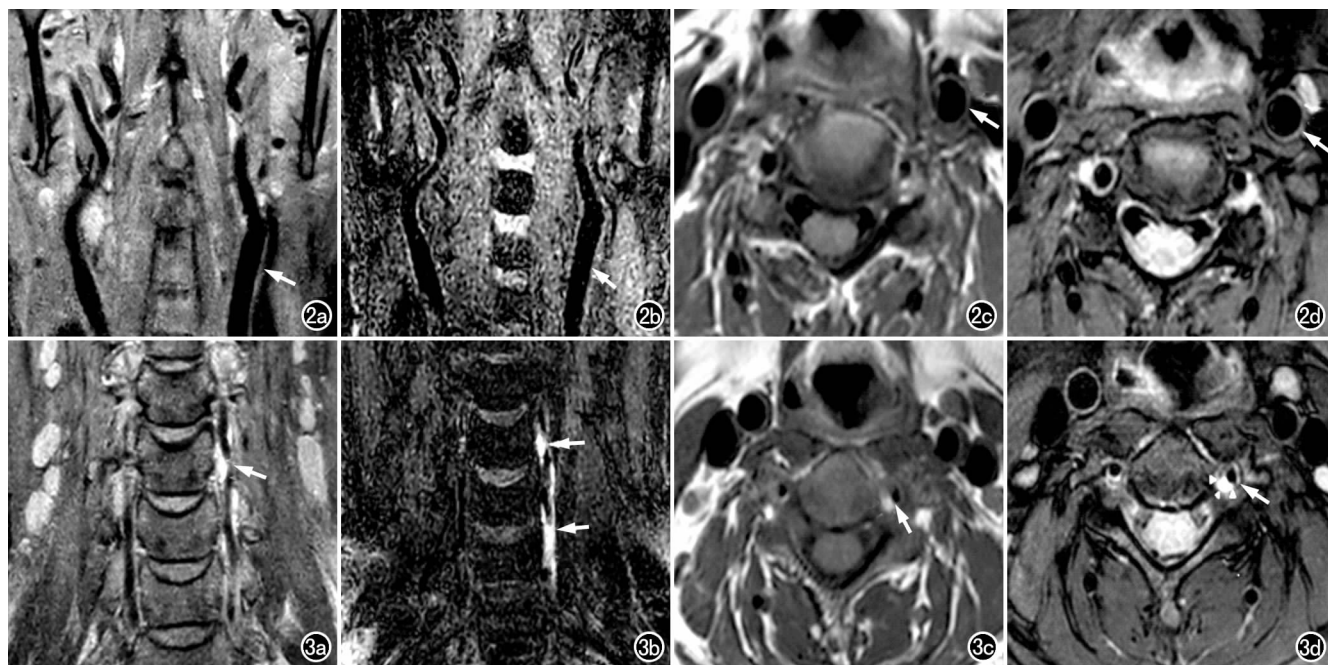


图 2 正常左侧颈总动脉。a) VISTA-PDWI 序列冠状面图像,显示血管壁呈稍高信号(箭);b) SNAP 序列冠状面图像,显示血管壁呈稍高信号(箭);c) T_1 WI-BB 序列图像,管壁在 T_1 WI-BB 序列上呈等信号(箭);d) T_2 WI-BB 序列图像,管壁在 T_2 WI-BB 序列上呈等信号(箭)。图 3 左侧椎动脉狭窄合并壁内血肿。a) VISTA-PDWI 序列,显示左侧椎动脉管壁内高信号灶(箭);b) SNAP 序列,显示壁内血肿呈高信号(箭);c) T_1 WI-BB 序列,显示壁内血肿呈高信号(箭);d) T_2 WI-BB 序列,显示壁内血肿呈高信号(白箭)。

对 4 个序列图像上血肿(20 例)的 SNR 进行比较,差异有高度统计学意义($F=120.536$, $P<0.001$),且以 SNAP 序列上的 SNR 均值最高。四个序列之间血肿与管腔 CNR 的差异有高度统计学意义($F=10.848$, $P<0.001$),且以 SNAP 序列上的 CNR 均值最高。四个序列之间血肿与管腔 SDNR 的差异有统计学意义($F=2.764$, $P=0.048$),以 SNAP 序列上的 SDNR 均值最高。

进一步采用 q 检验进行组间两两比较,结果显示:SNAP 序列上血肿的 SNR 及血肿与管腔 CNR 分别与 T_1 WI-BB、 T_2 WI-BB 及 VISTA-PDWI 进行比较,差异均有统计学意义(SNR: $P=0.0008$, $P=0.0009$, $P=0.0004$; CNR: $P=0.0002$, $P=0.0003$, $P=0.0005$);而在 T_1 WI-BB、 T_2 WI-BB 及 VISTA-PDWI 序列之间进行两两比较,差异均无统计学意义(SNR: $P=0.0975$, $P=0.403$, $P=0.386$; CNR: $P=0.919$, $P=0.730$, $P=0.655$)。

讨论

SNR、SDNR 及 CNR 是评价图像质量的客观指标^[4-6]。改善图像质量主要可通过提高组织的信号强度和降低噪声来提高 SNR,MR 设备的场强越高,图像的 SNR 越高^[7]。SNR 越高表示组织信号成分越多,解剖结构清晰度越高。影响 SNR 的扫描参数主要

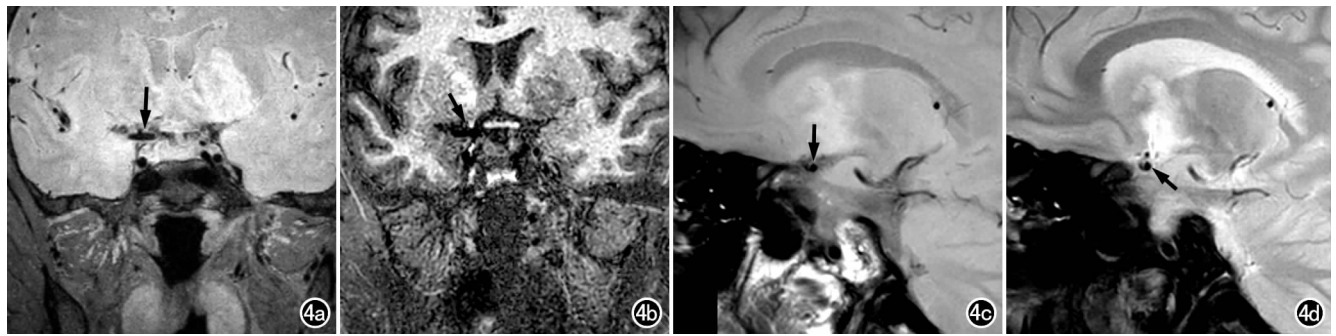


图4 正常右侧大脑中动脉。a)VISTA-PDWI 序列冠状面图像,显示右侧大脑中动脉 M1 段,血管壁呈稍高信号(箭);b)SNAP 序列冠状面图像,显示右侧大脑中动脉 M1 段,血管壁呈稍高信号(箭);c) T_1 WI-BB 序列矢状面图像,显示右侧大脑中动脉 M1 段,血管壁呈等信号(箭);d) T_2 WI-BB 序列矢状面图像,显示右侧大脑中动脉 M1 段,血管壁呈稍高信号(箭)。

有 TR、TE、视野、层厚及激励次数等^[8]。SDNR 反映的是不同组织的信号强度的相对差异,它是评价图像质量的另一项指标。由于受噪声的影响较大,单纯通过组织的信号强度的差异尚不能真实反映图像的对比度,所以常采用 SDNR 来反映图像的对比度。CNR 指不同组织信噪比的差异,也可以反映组织的对比度。影响 MRI 对比度的因素主要有脉冲序列、成像参数 (TR、TE、TI、翻转角度等) 及对比剂等^[9]。本研究结果显示,SNAP 序列与 T_1 WI-BB、 T_2 WI-BB 及 PDWI-VISTA 序列之间的管腔 SNR 及管壁 SNR 的差异具有高度统计学意义,且 SNAP 序列的管腔 SNR 及管壁 SNR 均值最高,说明 SNAP 序列不仅可以清晰显示血管管壁及管腔的结构,而且缩短了扫描时间。但 T_1 WI-BB 序列的 SDNR 及 CNR 优于 SNAP 序列,表明 SNAP 序列较 T_1 WI-BB 序列在图像对比度方面即管壁与管腔的对比方面仍有一定欠缺。在图像质量众多参数指标中,在保证足够 SNR 时,获得最佳的对比度更为重要,因为它会直接影响对病变的检出率^[8]。因此,还需要优化 SNAP 序列的相关参数以提高管壁与管腔的对比度,进一步发挥其血管壁成像的优势。

颅颈部动脉夹层是中青年发生缺血性脑卒中最常见的病因^[10]。SNAP 序列具有较大的纵向覆盖率和较短的扫描时间,单次扫描能同时获得管壁和非对比增强 MRA 图像,在诊断颅颈部动脉夹层 (craniocervical artery dissection, CCAD) 中具有能替代其它序列的潜力,并且使得诊断效率提高^[3]。此外,SNAP 技术不需要注射对比剂,因此可用于不耐受静脉注射或禁用钆对比剂 (例如妊娠或肾功能衰竭) 的患者。对壁内血肿一类的出血信号,目前多采用传统的多对比技术联合经典的磁化准备快速采集梯度回波 (magnetisation-prepared rapid acquisition gradient-echo sequence, MP-RAGE) 序列,但这项技术对管腔内血流的抑制效

果欠佳,SNAP 序列以层块选择性相位敏感反转恢复 (slab-selective phase-sensitive inversion-recovery, SPI) 序列作为基础,可降低对血液 T_1 值估计和序列参数设置准确性的要求,并可通过增加管腔、管壁及出血三者间的信号对比度,来提高对出血的显示能力。Li 等^[11] 对比分析了 MP-RAGE 与 SNAP 成像在表征颈动脉斑块内出血 (intra-plaque hemorrhage IPH) 中的有效性,发现 SNAP 能发现更多的斑块内出血,尤其是斑块内小出血灶。Shu 等^[12] 的研究结果显示,SNAP 序列的亮血图像与对比增强 MRA 对判断管腔狭窄率具有较高的一致性。Wang 等^[13] 的研究表明,SNAP-MRA 与 TOF-MRA 在定量测量颈动脉管腔面积方面具有高度相关性 (组内相关系数值为 0.96, 95% 置信区间为 0.94~0.97)。SNAP 不仅可以评价血管腔的狭窄程度,还能同时检出壁内血肿。本研究中 20 例壁内血肿患者,包括超急性期 7 例、亚急性晚期 12 例和慢性期 1 例,SNAP 序列在显示壁内血肿的成像质量上明显优于其它 3 个序列,但对于血肿分期仍需结合常规黑血序列。另外,也说明 SNAP 可以辅助常规黑血序列用于评价颅颈部动脉夹层,并提高诊断效率。

本研究的局限性:首先,本研究的样本量较小;其次,SNAP 及 PDWI-VISTA 序列为三维冠状面成像,而 T_1 WI-BB 及 T_2 WI-BB 为二维横轴面成像,存在几种序列参数不一致及成像方向不一致的问题,会造成一定的误差,但本研究中都是在原始图像上进行测量及比较的;第三,由于研究中主要通过客观性指标 (SNR、SDNR 及 CNR) 来评价图像质量,但各序列的分辨率有差异,SNAP 序列的体素大于其它序列,这可能会影响到图像的 SNR 及 CNR;第四,颅颈部尤其是颅内血管的管壁较薄,测量误差较大,会对结果造成一定的影响,而且数据测量可能会受到主观因素的影响,

因此需要进一步进行更大样本量的研究去证实;第五,本研究没有使用订制的线圈,可能对图像质量产生影响;最后,本研究通过特征性的影像表现诊断了 20 例壁内血肿,并没有病理结果,需要后续的临床复查及病理验证。

总之,SNAP 序列仅用一次扫描即可获得 MRA 和血管壁图像,且不需要注射对比剂,能够节省大量检查时间。本研究结果显示 SNAP 序列上管腔和管壁的 SNR 明显优于其它 3 个序列,SNAP 序列在识别壁内血肿方面较其它 3 个序列具有优势,表明了 SNAP 序列在临床实践中具有实用性;此外,SNAP 序列在图像对比度等其它相关参数方面还有待于进一步优化,在一些复杂情况下可能需要多序列 MR 成像技术,从而为临床全面评估颅颈动脉病变患者的血管腔和血管壁的情况提供更全面的信息,指导下一步治疗。

参考文献:

- [1] Alexander MD, Yuan C, Rutman A, et al. High-resolution intracranial vessel wall imaging: imaging beyond the lumen[J]. J Neurol Neurosurg Psychiatr, 2016, 87(6): 589-567.
- [2] Chen S, Zhao H, Li J, et al. Evaluation of carotid atherosclerotic plaque surface characteristics utilizing simultaneous noncontrast angiography and intraplaque hemorrhage (SNAP) technique[J]. JMRI, 2018, 47(3): 634-639.
- [3] Li Q, Wang J, Chen H, et al. Characterization of craniocervical artery dissection by simultaneous MR noncontrast angiography and intraplaque hemorrhage imaging at 3T[J]. AJNR, 2015, 36(9): 1769-1775.
- [4] Diehm N, Kickuth R, Baumgartner I, et al. Magnetic resonance angiography in infrapopliteal arterial disease: prospective comparison of 1.5 and 3 Tesla magnetic resonance imaging[J]. Invest Radiol, 2007, 42(6): 467-476.
- [5] 王龙辰. 基于信噪差分比方法的磁共振射频线圈在头颅血管造影中的对比研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2011, 35(4): 256-259.
- [6] Tafreshi AS, Riener R, Klamroth-Marganska V. Quantitative analysis of externally-induced patterns and natural oscillations in the human cardiovascular response: implications for development of a biofeedback system[J]. Biomed Signal Proc Contr, 2017, 36(7): 76-83.
- [7] 钱秋平, 王韦, 李澄, 等. 3.0T 高分辨率 MRI 大脑中动脉粥样硬化斑块成像序列选择的探讨[J]. 临床放射学杂志, 2013, 32(1): 18-23.
- [8] 薛正和, 王永峰, 赵一冰. 磁共振成像的质量控制及参数优化[J]. 磁共振成像, 2013, 4(6): 441-444.
- [9] 赵子周, 赵辉林, 曹烨, 等. 3.0T MR 颈动脉成像技术[J]. 放射学实践, 2011, 26(7): 785-787.
- [10] Kwon JY, Kim NY, Suh DC, et al. Intracranial and extracranial arterial dissection presenting with ischemic stroke: Lesion location and stroke mechanism[J]. J Neurol Sci, 2015, 358(1-2): 371-376.
- [11] Li D, Zhao H, Chen X, et al. Identification of intraplaque haemorrhage in carotid artery by simultaneous non-contrast angiography and intraplaque haemorrhage (SNAP) imaging: a magnetic resonance vessel wall imaging study[J]. Eur Radiol, 2017, 28(4): 1681-1686.
- [12] Shu H, Sun J, Hatsukami TS, et al. Simultaneous noncontrast angiography and intraplaque hemorrhage (SNAP) imaging: comparison with contrast-enhanced MR angiography for measuring carotid stenosis[J]. JMRI, 2017, 46(4): 1045-1052.
- [13] Wang J, Börnert P, Zhao H, et al. Simultaneous Non-contrast Angiography and intra-plaque hemorrhage (SNAP) imaging for carotid atherosclerotic disease evaluation[J]. Magn Reson Med, 2013, 69(2): 337-345.

(收稿日期: 2018-12-27 修回日期: 2019-04-20)