

磁敏感加权成像在弥漫性轴索损伤的临床应用

张竞文 苗延巍 伍建林

磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)是一种不同于以往的质子密度、 T_1 或 T_2 WI 的新的 MR 成像方法^[1]。它在包括脑梗死及出血、脑血管畸形、脑肿瘤、脑外伤、铁沉积及钙沉积和淀粉样脑血管病等在内的中枢神经系统病变诊断中的应用已引起了人们越来越多的关注^[2-5], 同时对于小静脉和神经核团解剖结构的显示也具有很大优势。现将 SWI 在诊断外伤后弥漫性轴索损伤的应用价值及前景综述如下。

一、SWI 的基本原理

SWI 采用的是高空间分辨率的三维(3D)梯度回波序列, 它利用不同组织间磁敏感度的差异产生图像对比, 与周围组织磁敏感度不同的物质产生的信号在 SWI 相位图上可以被区别出来。相位图经高通滤波校正后, 背景场中的低空间频率成分被去除, 因此即使是小的解剖结构也可以有很好的对比度和分辨率, 如小静脉、铁沉积增加的脑深部核团、甚至是白质纤维束等, 同时灰、白质之间的对比度也得以增加。滤波后的相位图经处理产生相位蒙片, 再与强度图像多次加权叠加, 并采用最小强度投影显示出来^[1, 6]。在所生成的图像中, 失相位区域的负性信号得以最大显示, 不同磁敏感度的组织间便形成很好的对比。

SWI 最初被应用于 MR 静脉成像^[7], 尤其对小静脉的显示有明显的优势。这是因为静脉内含有较多量的顺磁性脱氧血红蛋白, 其在较长 TE 条件下快速的自旋失相位可导致局部信号缺失, 因而在 SWI 上便可将静脉与邻近组织区分开来。因为利用的是血管结构及微血管结构中氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白之间含量的不同, 故以往的文献中也曾将 SWI 称作高分辨率血氧水平依赖性静脉成像(HRBV)^[8]。另外, SWI 对顺磁性的出血后血红蛋白代谢产物(脱氧血红蛋白、细胞内正铁血红蛋白、含铁血黄素)^[9]以及铁沉积^[10]的显示也非常敏感。这都与因磁敏感效应引起的失相位有关。

二、弥漫性轴索损伤的病理改变及病理生理机制

外伤性脑损伤(traumatic brain injury, TBI)在临床工作中很常见, 脑部剪切伤是引起深部脑组织损伤的一种特殊外伤形式。由于脑内各种组织质量不同, 其运动的加速度及惯性不同, 又由于脑组织的不易屈性, 以致突然的加速、减速运动或角加速运动、旋转运动等可使不同组织间产生相对移位, 白质联合纤维发生剪应力损伤, 组织学检查轴索呈弥漫撕裂, 轴浆外溢, 在损伤后 12 h 至数天出现轴索回缩球^[11],

轴索断裂处小血管可发生断裂、出血, 所以也称作弥漫性轴索损伤(diffuse axonal injury, DAI)。外力除引起原发性轴索损伤外, 更多的是导致轴索非中断性损伤。轴索在受伤当时并不出现断裂, 但是轴膜因机械性损伤致使 Ca^{2+} 通道的通透性增高, Ca^{2+} 持续内流, 激活钙蛋白酶, 分解神经元及神经轴突的细胞骨架蛋白, 导致细胞骨架崩解, 使轴突快速运输系统中断, 引起轴突肿胀, 最终发生继发性轴突断裂, 并破坏细胞间的传递引起细胞死亡^[12]。除机械性损伤外, 脑外伤时因颅内压升高、血管痉挛和脑疝形成等原因, 导致脑血流量减少引起脑组织缺氧, 神经元去极化使得大量的兴奋性氨基酸释放到细胞外间隙, 激活突触后的 N-甲基-D-天冬氨酸受体及代谢型谷氨酸受体, 不仅促进 Ca^{2+} 大量内流, 还使得 Na^+ 、 K^+ 大量流入突触后神经元, 引起细胞毒性水肿, 进一步加重了脑缺血的程度^[11-12]。DAI 是一种严重的脑损伤, 是引起死亡、导致严重残疾及植物生存状态的主要原因。因此, DAI 早期诊断将为早期治疗提供科学依据, 对阻止 DAI 的进展、提高临床治疗 DAI 的疗效有着重要意义。

三、常用 MRI 序列对弥漫性轴索损伤灶的检测

常规的 SE T_1 WI 及 T_2 WI 序列常用于显示外伤后的脑组织的形态改变, 在 T_2 WI 和液体衰减反转恢复(FLAIR)序列上, 非出血性剪应力损伤灶表现为高信号灶^[13]。快速自旋回波序列因其多个 180 脉冲的聚相位作用而对由出血产物所导致的磁敏感效应不敏感, 对出血灶的检出率不高。而 T_2^* WI 的梯度回波(GRE)序列由于没有 180 重聚脉冲, 不能补偿由于磁场不均匀造成的信号丢失, 因此对顺磁性出血产物(如脱氧血红蛋白、细胞内正铁血红蛋白及含铁血黄素)和脑实质间磁敏感性的差异非常敏感, 出血灶在其上呈低信号改变^[14-15]。与 GRE 序列相同, 梯度回波-平面回波成像(GRE-EPI)序列对磁敏感性的差异同样敏感, 但对于幕下及后颅窝的出血灶因磁敏感伪影明显, 导致图像易出现扭曲、变形, 同时对于脑灰质及皮层下的出血灶也显示欠佳^[16]。

四、SWI 在弥漫性轴索损伤中的应用

在外伤所致的多种病理改变中, 颅内出血的检测对于外伤性脑损伤患者的治疗和预后非常重要, 出血灶往往预示着胶质增生或组织坏死的区域, 已有研究表明合并明显出血的 DAI 患者与无明显出血的患者相比较预后更差^[17], 因此明确有无出血灶及其位置对预测病情的预后很有帮助。但是出血灶在常规 MRI 上的表现十分多样, 易受多种因素影响, 如血红蛋白的氧化状态、红细胞的完整性以及磁场强度、接收器带宽、成像序列、 T_1 或 T_2 加权的权重等^[18]。对于 SWI

而言,大多数血红蛋白代谢产物包括脱氧血红蛋白、细胞内的正铁血红蛋白、含铁血黄素都是顺磁性物质,这些物质可因快速自旋失相位而出现明显的信号强度下降,再加之 SWI 具有高空间分辨率的特点,因此即使是微量的出血灶也可以在 SWI 上非常敏感地检测出来。

最近的研究发现在外伤后的儿童,SWI 对于出血性 DAI 病灶的显示较常规 MRI 和 GRE 序列更为敏感。Tong 等^[18]的研究表明在 SWI 上显示的出血性 DAI 病灶的数目和出血量分别是常规 T_2^* WI 二维(2D)-GRE 序列的 6 倍和 2 倍,相比于 CT 和常规 MRI,SWI 可以显示更小的和更多的出血灶。Akter 等^[19]将 SWI 与 GRE、GRE-EPI 序列对脑内出血灶的显示能力进行了比较,其结果同样也发现 SWI 对小出血灶的检出率高于 GRE 和 GRE-EPI 序列,对于位于颅底或者幕下的小低信号出血灶,SWI 的检出能力仍很高,而且 SWI 的对比噪声比(CNR)明显高于 GRE 和 GRE-EPI 序列。早期关于脑外伤的病理学研究显示绝大多数 DAI 病灶为非出血性病灶^[20],仅有约 20%的病灶在 MRI 上诊断为出血性病灶。但随着 SWI 在脑外伤的应用逐渐开展,上述观念正在发生转变,部分学者发现 DAI 病灶中多数为出血性病灶,推测这很可能与 SWI 提高了对出血灶的检测能力有关。在以往的临床工作中,由于常规的影像手段不能反映脑内的微观病理学改变,因此 DAI 的诊断往往依赖于临床症状,如长时间的昏迷或意识障碍等^[21]。但随着影像技术的不断发展,特别是 SWI 的出现可以为脑外伤的诊断提供更多无创性、准确的信息。

在 Tong 等^[22]的另一项研究中,有 40 例中、重度的 DAI 儿童和青少年患者接受了 SWI,该项研究将出血灶的数目和体积与就诊时的临床症状及 6~12 个月后的随访情况相对照。结果表明具有较低格拉斯哥昏迷评分(GCS)或者昏迷期较长的患儿出血灶的数目和出血量明显多于预后较好的患儿。Ashwal 等^[23]也报道了病灶的数目和受累部位与患者的预后密切相关。由于 SWI 对出血性 DAI 病灶非常敏感,因此可以更客观、更准确地评价急性脑外伤的严重程度,其显示的出血范围也可为疾病预后的预测提供更多信息^[24-25]。最近还有学者将 SWI 与 MR 波谱成像(MRS)等联合应用于外伤性脑损伤的研究当中。学者们根据 DAI 病灶在 T_2 WI、SWI、MRS 等序列上的表现,建议将其划分为两种类型:“可视性损伤灶”和“正常表现脑组织”^[26]。可视性损伤灶包括可以被 SWI 敏感地检测出的出血性病灶和在 T_2 WI、FLAIR 上显示的非出血性病灶。所谓“正常表现脑组织”是指在 MRI 上无异常发现但 MRS 提示有异常代谢物浓度变化(如 N-乙酰天冬氨酸下降,胆碱升高)的脑区。这种联合应用能使我们更清楚更准确地判断损伤部位和损伤程度,对于指导治疗和预测功能性恢复有更深远的意义。

SWI 中相位值的改变是基于脑组织间磁敏感度的不同,而后者又与血氧饱和度密切相关,因此目前已有研究尝试将 SWI 应用于损伤后静脉血氧含量及脑血流量(CBF)变化的定量显示。通过动物脑损伤模型的实验发现,SWI 反映的

CBF 相对值的改变及其随时间变化的规律与动脉自旋标记法一致。同时该研究还发现 SWI 能显示外伤后静脉结构的动态改变。因此对于外伤患者而言,SWI 除了提高了颅内微出血灶的检测能力,还有可能利用其对 CBF 的监测能力实现对颅高压患者治疗效果的评价。因此与传统的有创性检查相比,SWI 提供了一种安全无创的方法,不仅可用于定量分析血氧含量、CBF 的变化,还能显示静脉结构改变^[27]。

五、问题与展望

尽管 SWI 由于其对出血性病灶的高敏感性而在脑外伤的诊断及治疗中具有巨大的潜力,但也必须清楚地认识到其在临床应用中仍然存在一些局限性。

1. 就实际工作的可操作性而言,SWI 突出的缺点在于成像时间较长^[21],增加了运动伪影出现的可能,因此对外伤患者的配合要求较高。有学者利用不同场强 MR 扫描仪行 SWI 研究时发现,在高场强条件下, T_2 及 T_2^* 时间缩短,信号失相位加速,从而允许 TE 适当缩短,这样 TR 和成像时间也可相应缩短,便于临床应用^[8]。

2. 观察 SWI 图像时,出血灶与颅内磁敏感性伪影的鉴别也不容忽视^[18],特别是靠近颅顶骨处的伪影与少量脑外出血灶之间的鉴别。另外由于 SWI 的高空间分辨率和敏感性,有可能造成出血灶的过高估计,特别当出血灶在连续层面的分布用血管走行的连续性无法解释时尤其应当注意。

3. 尽管 SWI 对微出血灶的显示有着独特的优势,但通过对 DAI 病理学的研究得知,断裂轴索周边的出血灶只是 DAI 病理及病生改变中的一部分,轴索损伤和局部脑缺血、缺氧是 DAI 病程发展中非常重要的影响因素,能否把握住合适的治疗窗,避免继发性的轴索断裂,对于患者的疗效和预后至关重要。因此,若能进一步开展 SWI 对 CBF 和血氧含量的定量分析研究,并将 SWI 与多种成像方法联合应用或者优化组合,则不仅能提高对微出血灶的检测,还能提供更多有关神经轴索及脑内血氧水平、脑血流、脑内化合物改变的信息。另外,SWI 和神经病理学的对照研究仍需进一步深入,这样就可以从病理上更好地理解病变与影像表现的关系。

综上所述,SWI 能非常敏感地检测出 DAI 患者脑内的出血性损伤灶,并能利用相位值的改变尝试开展定量研究,为 DAI 的诊断、治疗和预后提供很多有价值的信息。但 SWI 在病变诊断方面还存在一定的局限性,应与多种 MR 检查方法进行深入的对比研究,寻找对外伤性脑损伤患者的诊断和预后诊断价值更高的检查方法。

参 考 文 献

- [1] Haacke EM, Xu Y, Cheng YC, et al. Susceptibility weighted imaging (SWI). *Magn Reson Med*, 2004, 52: 612-618.
- [2] Sehgal V, Delproposito Z, Haacke EM, et al. Clinical applications of neuroimaging with susceptibility-weighted imaging (Review). *J Magn Reson Imaging*, 2005, 22: 439-450.
- [3] 王彩云, 张强, 薛敏. 磁化率加权成像:一种对颅内血管疾病敏感的 MRI 技术. *国外医学临床放射学分册*, 2007, 30: 135-140.

- [4] 刘亚欧, 杨延辉, 李坤成. 磁敏感加权成像在中枢神经系统的临床应用. 医学影像学杂志, 2007, 17: 210-212.
- [5] 朱文珍, 漆剑频, 申皓, 等. MR 磁敏感成像技术在脑部血管性病变中的应用. 中华放射学杂志, 2007, 41: 1040-1044.
- [6] Rauscher A, Sedlacik J, Barth M, et al. Magnetic susceptibility-weighted MR phase imaging of the human brain. AJNR, 2005, 26: 736-742.
- [7] Reichenbach JR, Venkatesan R, Schillinger DJ, et al. Small vessels in the human brain: MR venography with deoxyhemoglobin as an intrinsic contrast agent. Radiology, 1997, 204: 272-277.
- [8] Noebauer-Huhmann IM, Pinker K, Barth M, et al. Contrast-enhanced, high-resolution, susceptibility-weighted magnetic resonance imaging of the brain: dose-dependent optimization at 3 tesla and 1.5 tesla in healthy volunteers. Invest Radiol, 2006, 41: 249-255.
- [9] Hermier M, Nighoghossian N. Contribution of susceptibility-weighted imaging to acute stroke assessment. Stroke, 2004, 35: 1989-1994.
- [10] Haacke EM, Cheng NY, House MJ, et al. Imaging iron stores in the brain using magnetic resonance imaging (Review). Magn Reson Imaging, 2005, 23: 1-25.
- [11] Medana IM, Esiri MM. Axonal damage: a key predictor of outcome in human CNS diseases (Review). Brain, 2003, 126: 515-530.
- [12] Sahuquillo J, Poca MA, Amoros S. Current aspects of pathophysiology and cell dysfunction after severe head injury (Review). Curr Pharm Des, 2001, 7: 1475-1503.
- [13] Gallagher CN, Hutchinson PJ, Pickard JD. Neuroimaging in trauma. Curr Opin Neurol, 2007, 20: 403-409.
- [14] Yanagawa Y, Tsushima Y, Tokumaru A, et al. A quantitative analysis of head injury using T_2^* -weighted gradient-echo imaging. J Trauma, 2000, 49: 272-277.
- [15] Scheid R, Preul C, Gruber O, et al. Diffuse axonal injury associated with chronic traumatic brain injury: evidence from T_2^* -weighted gradient-echo imaging at 3 T. AJNR, 2003, 24: 1049-1056.
- [16] Liang L, Korogi Y, Sugahara T, et al. Detection of intracranial hemorrhage with susceptibility-weighted MR sequences. AJNR, 1999, 20: 1527-1534.
- [17] Paterakis K, Karantanas AH, Komnos A, et al. Outcome of patients with diffuse axonal injury: the significance and prognostic value of MRI in the acute phase. J Trauma, 2000, 49: 1071-1075.
- [18] Tong KA, Ashwal S, Holshouser BA, et al. Hemorrhagic shearing lesions in children and adolescents with posttraumatic diffuse axonal injury: improved detection and initial results. Radiology, 2003, 227: 332-339.
- [19] Akter M, Hirai T, Hiai Y, et al. Detection of hemorrhagic hypointense foci in the brain on susceptibility-weighted imaging clinical and phantom studies. Acad Radiol, 2007, 14: 1011-1019.
- [20] Gentry LR, Godersky JC, Thompson B. MR imaging of head trauma: review of the distribution and radiopathologic features of traumatic lesions. AJR, 1988, 150: 663-672.
- [21] Smith DH, Meaney DF, Shull WH. Diffuse axonal injury in head trauma (Review). J Head Trauma Rehabil, 2003, 18: 307-316.
- [22] Tong KA, Ashwal S, Holshouser BA, et al. Diffuse axonal injury in children: clinical correlation with hemorrhagic lesions. Ann Neurol, 2004, 56: 36-50.
- [23] Ashwal S, Babikian T, Gardner-Nichols J, et al. Susceptibility-weighted imaging and proton magnetic resonance spectroscopy in assessment of outcome after pediatric traumatic brain injury (Review). Arch Phys Med Rehabil, 2006, 87(12 Suppl 2): S50-S58.
- [24] Tong KA, Ashwal S, Obenaus A, et al. Susceptibility-weighted MR Imaging: a review of clinical applications in children (Review). AJNR, 2008, 29: 9-17.
- [25] Babikian T, Freier MC, Tong KA, et al. Susceptibility weighted imaging: neuropsychologic outcome and pediatric head injury. Pediatr Neurol, 2005, 33: 184-194.
- [26] Ashwal S, Holshouser BA, Tong KA. Use of advanced neuroimaging techniques in the evaluation of pediatric traumatic brain injury (Review). Dev Neurosci, 2006, 28: 309-326.
- [27] Shen Y, Kou Z, Kreipke CW, et al. In vivo measurement of tissue damage, oxygen saturation changes and blood flow changes after experimental traumatic brain injury in rats using susceptibility weighted imaging. Magn Reson Imaging, 2007, 25: 219-227.

(收稿日期: 2007-10-08)

(本文编辑: 张琳琳)

第三届全国泌尿系统影像诊断与技术应用研讨会征文通知

由中华放射学杂志编辑委员会、山东省医学影像学研究所、山东省医学影像学研究会共同举办的“第三届全国泌尿系统影像诊断与技术应用研讨会”，将于 2008 年 7 月 31 日至 8 月 4 日在湖北省宜昌市召开。大会将邀请知名医学影像专家作学术报告。欢迎大家积极撰写学术论文，参会交流，参加大会者将获得国家级继续教育学分。

1. 征文范围: 凡未正式公开发表过的关于泌尿系统影像诊断(包括普通放射诊断、CT、MRI、DSA、超声和核医学)、影像技术学、护理学等方面的论著、实验研究、综述、短篇报道和经验介绍, 文章内容应体现真实性、实用性和科学性。

2. 征文要求: 来稿请寄 4000 字左右全文及 800 字的摘要各一份, 摘要请按“目的、方法、结果、结论”四部分撰写。文章务必 Word 格式打印, (请附磁盘和打印稿, 也可发 Email)。文章需附作者简介, 写于首页左下方, 内容包括: 姓

名、出生年月、性别、民族、籍贯、学历学位、职称和研究方向, 联系电话。作者请自留底稿, 概不退稿。来稿请注明“第三届全国泌尿系统影像诊断与技术应用研讨会”字样, 寄至: 100710 北京市东四西大街 42 号中华放射学杂志编辑部张晓冬收, 电话: 010-85158292, Email: zhangxd@cma.org.cn 或 cjr.zhangxd@vip.163.com。优秀论文经有关专家审阅通过后, 可优先在《中华放射学杂志》或《医学影像学杂志》上发表。所有投稿, 经专家评审通过的将收录在论文汇编中。

3. 截稿日期: 2008 年 5 月 31 日, 以当地邮戳为准。会议具体时间、地点见第 2 轮通知。

(中华放射学杂志编辑委员会
山东省医学影像学研究所
山东省医学影像学研究会)