· 胸部影像学 ·

肺癌 MUSE-DWI 与 ss-EPI DWI 成像质量的对比研究

周磊,焦志云,何玲,孙其安,瞿航

【摘要】目的:探讨多重灵敏度编码扩散加权成像(MUSE-DWI)与常规扩散加权成像(ss-EPI DWI)在肺癌成像质量的对比。方法:连续性收集 44 例于扬州大学附属医院行胸部磁共振检查的肺癌 患者,获取患者 ss-EPI DWI 和 MUSE-DWI 图像。由两名观察者分别对两种 DWI 序列的图像质量进 行主观视觉定性评估,评估指标包括病灶辨识度、图像伪影、形变程度及整体图像质量;客观评估方面, 计算并比较信噪比(SNR)、对比噪声比(CNR)、表观扩散系数(ADC)及最大横纵经。结果:MUSE-DWI 序列在病灶辨识度、图像伪影、形变程度及整体图像质量方面优于传统 ss-EPI DWI,差异有统计 学意义(P<0.001)。MUSE-DWI 序列显示肺癌病灶的 SNR、CNR 高于 ss-EPI DWI,差异有统计学意 义(P<0.001,P<0.05),两组间扫描肺癌的最大纵径差异有统计学意义(P<0.001),两组间病灶 ADC 值及病灶最大横径差异无统计学意义。结论:与常规单次激发平面回波扩散加权成像相比,MUSE-MRI 可以提升肺癌图像质量,减少肺部 DWI 图像中的伪影和几何形变,提高病灶的 SNR 和 CNR,在不 影响 ADC 值测量的情况下提高解剖细节及病灶边界的清晰度。

【关键词】 肺肿瘤; 扩散加权成像; 多重灵敏度编码; 图像质量控制

【中图分类号】R445.2;R734.2 【文献标志码】A 【文章编号】1000-0313(2024)11-1459-06 DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.11.006 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



[Abstract] **Objective:** To compare the imaging quality of multi-sensitivity encoding diffusionweighted imaging (MUSE-DWI) and single-shot echo planar imaging diffusion-weighted imaging (ss-EPI DWI) in lung cancer. Methods: A total of 44 patients with lung cancer who underwent chest magnetic resonance imaging in the Affiliated Hospital of Yangzhou University were continuously collected. Ss-EPI DWI and MUSE-DWI images were obtained, and two observers performed subjective visual qualitative assessment of the image quality of the two DWI sequences, The evaluation indicators included lesion identification, image artifacts, degree of deformation and overall image quality. In terms of objective evaluation, signal-to-noise ratio (SNR), contrast-to-noise ratio (CNR), apparent diffusion coefficient (ADC), maximum transverse and longitudinal diameters were calculated and compared. Results: In terms of subjective evaluation: MUSE-DWI sequence was superior to traditional ss-EPI DWI in lesion identification, image artifacts, deformation degree and overall image quality, and the differences were statistically significant ($P \le 0.001$). For objective evaluation: MUSE-DWI sequence showed higher SNR and CNR of lung cancer lesions than those of ss-EPI DWI, and the differences were statistically significant (P < 0.001, P < 0.05). There were statistically significant differences in the maximum longitudinal diameter of lung cancer between the two groups ($P \le 0.001$). There was no significant difference in ADC value and maximum transverse diameter of lesions between the two groups. Conclusion: Compared with conventional single-shot planar echo diffusion-weighted imaging, MUSE-MRI can improve the image quality of lung cancer, reduce artifacts and geometric deformation in lung DWI images, improve the SNR and CNR of lesions, and improve the clarity of anatomical details and

作者单位:225000 江苏,扬州大学附属医院影像科

作者简介:周磊(1999一),男,江苏宝应人,硕士研究生,住院医师,主要从事功能影像学在全身多部位疾病中的应用研究。

通讯作者:焦志云,E-mail:jiaozhiyun@qq.com

lesion boundaries without affecting ADC value measurement.

(Key words) Lung neoplasms; Diffusion-weighted imaging; Multiple sensitivity encoding; Image quality control

肺癌是全球癌症相关死亡的主要原因之一,在治 疗前获得诊断、分期、组织学亚型以及肿瘤分化程度的 准确信息对于临床治疗决策的洗取至关重要[1],在临 床实践中,肺部病变的检测主要依赖计算机断层扫描, 以获取肺部病灶的形态、边界、密度、强化方式等重要 形态学特征,鉴于肺部良恶性病变在形态学上通常有 特征重叠,常常难以准确区分肺癌和其他良性病变[2]; 组织学活检作为肺癌诊断及病理分型的金标准,具有 一定创伤性,不适合心肺功能较差的患者[3],磁共振成 像(magnetic resonance imaging, MRI)技术无创且无 电离辐射,且能够提供较高软组织对比度及多参数成 像^[4];扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)通过测量生物组织内水分子的随机运动,反映其 特有的扩散特征,侧面表征组织的微观结构;表观扩散 系数(apparent diffusion coefficient, ADC)值可以量化 这种扩散特征[5],实现对肺癌病灶的定量分析,既往的 临床研究已经证实 ADC 值在鉴别肺部病灶良恶性、 监测肺癌预后等方面的潜在价值^[6-8]。

由于肺部解剖部位的特殊性,呼吸运动伪影、磁敏 感伪影、空间分辨率等影响图像质量的因素仍然是当 前磁共振在肺部研究所面临的挑战,既往 DWI 在肺癌 研究的诊断结果存在较大的异质性^[9]:临床研究中常 规使用的 DWI 序列采用单次激发平面回波成像(single-shot echo planar imaging, ss-EPI)技术,在单次激 发后使用 EPI 序列采集完整的 K 空间数据,成像速度 较快,对运动不敏感[10],但其常常会受到磁敏感伪影 和几何失真的影响[11],且读出和回波间隔较长,易导 致图像质量的下降,例如 T2 衰减效应引起的图像模 糊[12.13],难以实现高分辨率的肺癌图像采集。尽管既 往研究中^[14]分段读出平面回波成像(readout-segmented echo planar imaging, RS-EPI)技术能沿读出方向 将 K 空间分割成若干段以实现更短的回波间隔,获得 失真更少、信噪比更高的图像,但肺部的扫描由于主体 呼吸运动导致的相位误差较大,图像伪影仍然存在,需 要导航器回波对相位误差进行校正。

笔者认为,图像质量的限制可能是导致研究结果 差异的重要原因,为更加精确地了解肺癌的内部扩散 特征需要对 DWI 序列的图像质量提出更高的要求。 基于复合灵敏度编码(multiple sensitivity encoding, MUSE)的高分辨率扩散成像(multiplexed sensitivity encoding diffusion-weighted imaging, MUSE-DWI)通 过多次激励脉冲激发,在相位编码方向上进行交错分 段采集,很好地控制了图像形变并获得相对更高的信 噪比^[15,16]。本研究旨在比较采用 ss-EPI 及 MUSE 技 术分别获得的扩散加权图像质量,初步探讨 MUSE-DWI 在肺癌临床诊疗及后续研究中的应用价值。

材料与方法

1.一般资料

连续收集 2022 年 9 月-2023 年 7 月经扬州大学 附属医院收治的 44 例疑似肺癌患者的临床以及影像 学资料,其中男 23 例,女 21 例;年龄 47~83(72±11) 岁,并追踪其病理检查结果。纳入标准:①常规影像学 证实的肺部原发占位性病灶;②病灶最大径≥1.5 cm, 实性成分占整个病灶的 50%以上;③拥有完整的临床 及影像资料;④术后或穿刺活检追踪到病理检查结果 并证实为肺癌且在行磁共振检查前未行手术、放化疗、 靶向免疫治疗。排除标准:①患者配合不佳等造成图 像质量不理想,伪影或形变严重,影响数据测量;②常 规影像学显示病灶为磨玻璃性质;③存在相关磁共振 检查相关禁忌症;④患者合并其他部位的恶性肿瘤。 参与本次研究的患者检查前均签署知情同意书,本次 研究获伦理委员会批准。

2.检查方法

本研究中的所有扫描序列均在 GE Architect 3.0T MRI 扫描仪上进行,检查开始前对患者进行呼 吸训练,指导其规律呼吸,患者取仰卧位,双臂上举,脚 先进,同时使用呼吸门控进行呼吸监测。所有患者均 采用仰卧位扫描,尽量减少呼吸运动所带来的影像。 图像采集包括横轴面 T₂WI 单次激发快速自旋回波 (single shot fast spin echo, SSFSE)抑脂序列、常规 ss-EPI DWI 以及 MUSE-DWI 序列。具体扫描参数 见表 1。

3.图像质量评价与测量

表1 两种扩散加权序列扫描参数对比

DWI序列	Num Shots	回波时间 /ms	视野 /mm ²	矩阵	层厚 /mm	相位编 码方向	层间距 /mm	b值 /s/mm²
	011013	/ 1113	/ 111111		/ 111111	~~~ / I-J	/ 111111	/ 3/ 11111
ss-EPI DWI	1	Min(72)	380×380	128×128	4	A/P	1	0,800
MUSE DWI	2	Min(72)	380×380	128×128	4	A/P	1	0,800

所有图像的评估和测量均在 GE 的后处理工作站 (AW 4.7)上进行。由 2 名具有 5 年以上工作经验的 放射科医师在对临床诊断不知情的情况下独立进行, 评估对象包含 ss-EPI DWI 和 MUSE DWI。在评估 前,均未告知评估者 DWI 序列的类型,所有病例的图 像均以匿名及随机的方式呈现;采用 Likert 5 分制量 表进行综合评估,具体评估方案,①病灶辨识度(病灶 轮廓及细节显示清晰度):1分,病灶无法辨识;2分,病 灶显示模糊;3分,病灶显示尚可;4分,病灶显示良好; 5分,病灶显示清晰。②磁敏感伪影(病灶局部):1分, 重度伪影,严重干扰诊断;2分,中度伪影,干扰诊断;3 分,中度伪影,尚不影响最终诊断;4分,轻度伪影;5 分,几乎没有伪影。③几何形变程度(病灶):1分,病 灶形变严重,几乎无法辨别;2分,病灶形变较严重,但 可识别部分区域;3分,病灶中度形变,可识别全部结 构;4分,病灶轻度形变;5分,病灶几乎无形变。④整 体图像质量(肺部):1分,图像质量差;2分,图像质量 较差:3分,图像质量适中:4分,图像质量较好:5分, 图像质量优秀。

为了在主观评价的基础上量化比较两种 DWI 序列肺癌成像的形变矫正能力,研究者在横轴面 DWI 序列图像上手动测量病灶最大层面的横径及纵径,重复测量三次并取平均值。

参照 T₂ WI 图像,在 b 值为 800 s/mm² 的 DWI 序 列的图像中通过勾画圆形感兴趣区 (region of interest,ROI)对肺癌进行定量分析,勾画过程中尽可能避 开病灶坏死囊变出血的部分,排除受图像形变及伪影 干扰较大的区域,ROI 面积为(25±1) mm²,测量出肺 癌病灶信号强度值(SI_{病灶});在同一层面测量图像背景 噪声的标准差值(SD_{育录})以及脊髓的信号强度值 (SI_{育髓});上述数据均重复测量三次,并最终得出平均 值。分别采取以下公式计算出两种 DWI 序列图像的 信噪比(signal to noise ratio,SNR)、肺癌病灶区域与 相同层面脊髓的对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR):

$$SNR = \frac{SI_{\#\pm}}{SD_{\#\#}}$$
(1)

$$CNR = \frac{|SI_{\hat{n}\hat{\pi}} - SI_{\hat{n}\hat{\pi}}|}{SD_{\hat{n}\hat{\pi}}}$$
(2)

ADC 图通过 READYView 软件包自动生成。由两名观察者选取 MUSE DWI和 ss-EPI DWI 序列中病灶最大层面,在病灶实性部分勾画圆形 ROI;将 ROI 复制粘贴至相应 ADC 图中得出 ADC 值。为进一步缩小测量偏倚,决定均选取病灶最大层面以及相邻上下两个层面分别进行三次勾画、测量,取平均值作为测量结果,两种 DWI 序列的病灶 ADC 最终值取两名观察者的平均值。每次测量的 ROI 面积尽可能保

持相同,面积为(25±1) mm²。比较两种 DWI 序列所 测病灶 ADC 值的差异是否具有统计学意义。

4.统计学方法

采用 SPSS 26.0 进行统计学分析。定量资料首先 采用 Kolmogorov-Smirnov 检验其正态性,对于符合 正态分布规律的定量资料统一采用平均值±标准差的 形式表示,采用 t 检验以及方差分析比较组间差异,对 于不符合正态分布规律的定量资料统一采用中位数 (上、下四分位数)的形式表示,采用配对样本 Wilcoxon 秩和检验比较组间差异。该研究中的等级资料采 用频数以及中位数(上、下四分位数)描述,并使用 Wilcoxon 秩和检验比较定性参数。采用 Fleiss'kappa 评估定性参数的观察者间一致性:Kappa 值 \geq 0.80,两 名观察者间一致性极好;0.60<Kappa 值 \leq 0.80,一致 性良好;Kappa 值 \leq 0.60,一致性一般或较差。以 P<0.05 为差异具有统计学意义。

结 果

1.图像质量主观评价结果

两名放射科医师对 DWI 图像(b=800 s/mm²)主 观评价的一致性总体表现良好(Kappa 值:0.77~ 0.89,P < 0.001,表 2)。MUSE-DWI 在病灶辨识度 (Z = -5.61)、磁敏感伪影(Z = -4.60)、几何形变程 度(Z = -5.83)以及整体图像质量(Z = -5.67)4个评 价指标中的表现均优于 ss-EPI DWI 序列(P < 0.001)。两种 DWI 序列在肺癌磁共振扫描中应用案例 及主观评价比较结果见图 1~2 和表 3。

表 2 两种序列主观评分观察者间一致性

证从北上	ss-EP	I DWI	MUSE-DWI		
计例指称	Kappa 值	P 值	Kappa 值	P 值	
病灶辨识度评分	0.80	< 0.001	0.83	< 0.001	
磁敏感伪影评分	0.77	< 0.001	0.78	<0.001	
几何形变评分	0.86	< 0.001	0.87	<0.001	
整体图像质量评分	0.79	<0.001	0.89	< 0.001	

2.图像质量客观评价结果

本研究中 MUSE-DWI 上测量肺癌最大纵径为 (25.45±9.80) mm,ss-EPI DWI 上测量肺癌最大纵径 为(29.41±9.63) mm,差异有统计学意义(P < 0.001),两种 DWI 序列中病灶最大横径差异无统计学 意义(P = 0.21),见表 4。MUSE-DWI 显示病灶的 SNR 值明显高于 ss-EPI DWI(P < 0.001),MUSE-DWI 中病灶与同层面脊髓的 CNR 也高于 ss-EPI DWI 序列(P < 0.05),见图 3。对比两种序列所测病 灶实性区域平均 ADC 值,MUSE-DWI 序列上测得的 肺癌 ADC 值为(1.73±0.28)×10⁻³ mm²/s,ss-EPI DWI 序列上测得的肺癌 ADC 值为(1.69±0.27)×10⁻³ mm²/s, 两组间差异无统计学意义(P = 0.51),见表 4。

表 3 ss-EPI DWI 和 MUSE-DWI 图像质量主观分析结果 (例)

图像质量评分	ss-EPI DWI	MUSE-DWI	Z 值	P 值
病灶辨识度			-5.61	<0.001
1分	0	3		
2分	0	22		
3分	13	18		
4 分	26	1		
5分	5	0		
得分	4(3,4)	2(2,3)		
磁敏感伪影			-4.60	<0.001
1分	0	0		
2分	0	9		
3分	20	31		
4 分	23	4		
5 分	1	0		
得分	4(3,4)	3(3,3)		
几何形变			-5.83	<0.001
1分	0	3		
2 分	1	29		
3分	6	10		
4 分	35	2		
5 分	2	0		
得分	4(4,4)	2(2,3)		
整体图像质量			-5.67	<0.001
1分	0	2		
2 分	0	25		
3分	9	16		
4 分	32	1		
5分	3	0		
得分	4(4,4)	3(2,3)		

讨 论

本研究分别对两种 DWI 序列的图像质量进行主 观评价,得出较常规使用的 ss-EPI DWI 序列, MUSE-DWI在病灶辨识度、磁敏感伪影、几何形变程度等评 价指标的表现均更加优异,这可能是由于 MUSE-DWI 是一种基于相位编码方向对 K 空间进行交错分次采 集的方法,可以在不使用导航器回波的情况下通过每 次激发重建灵敏度编码确定低分辨率相位,并将所获 取的相位信息和线圈灵敏度复合到 MUSE 框架中,从 而有效校正非线性多次激发间的相位变化[17],产生伪 影较少、空间分辨率更高的图像数据[18]。已有文献报 道 MUSE-DWI 在颅内^[17,19]、乳腺^[12,15]、肠道^[20]、甲状 腺[11]以及肝脏[21]等部位病变的成像优势,相关研究 均提示 MUSE-DWI 可以在提高图像信噪比的同时, 减少图像的变形失真,一定程度上优化病灶的解剖细 节,尤其是病灶边缘的清晰度,这一改善使得临床在 DWI 图像上观察病灶边缘的浸润情况成为可能:同 时,更高的病灶辨识度和空间分辨率使得 MUSE-DWI 可以更好地检测较小的病灶[21],然而这些均未在肺癌 的研究中得到证实。本研究同时发现 MUSE-DWI 可



图 1 女,48岁,右肺下叶腺癌,病理以腺泡型及乳头型为主。a)ss-EPI DWI 示右侧病灶边缘模糊不清,病灶 上下缘可见不同程度的伪影及背景噪声,可见部分形变,对细节的显示欠清;b) MUSE-DWI 示右侧病灶边界 明显清晰,未见明显几何形变及伪影,直观信号更高,病灶及所取层面的胸骨、椎体分辨率明显更高;c) 相应 层面的 T₂ SSFSE 抑脂序列。 图 2 男,47岁,右肺下叶腺癌。a) ss-EPI DWI 示病灶显示欠佳,边缘显示 模糊,肺部可见模糊噪声信号;b) MUSE-DWI 示病灶呈现出的信号更高,对细节的显示更佳,病灶边缘更清 楚;c) 相应层面的 T₂ SSFSE 抑脂序列。

	评价指标	ss-EPI DWI	MUSE-DWI	<i>t/Z</i> 值	P 值
	SNR	477.17 ± 288.69	835.25 ± 342.25	6.65ª	<0.001
	CNR	289.91(156.71,472.64	364.82(198.32,622.32)	-2.59^{b}	<0.05
	ADC 值/ $\times 10^{-3}$ mm ² /s	1.69 ± 0.27	1.73 ± 0.28	0.67ª	0.51
	横径/mm	31.20(18.18,55.50)	31.20(18.20,49.60)	-1.25^{b}	0.21
	_纵径/mm	29.41 ± 9.63	25.45 ± 9.80	-6.55^{a}	<0.001
¹⁵⁰⁰]	注: ^a 为t值, ^b 为Z值。 ***	¹⁵⁰⁰] [* E	CPI DWI 进	行肺癌成
1000-		1000- Kg	× N	化提升病灯 AUSE-DWI 是升病灶的	通过增力 信号强度
500 -		500-	N	AUSE-DWI	通过校正

表 4 ss-EPI DWI 和 MUSE-DWI 图像质量定量分析

n MUSE-DWI ss-EPI DWI MUSE-DWI ss-EPI DWI යා ദ്ര 图 3 ss-EPI DWI 和 MUSE-DWI 图像质量定量分析参数箱式图。a) SNR;时对比了两种序列所测得病灶

b)CNR *** P<0.001, P<0.05 $^{\circ}$

500

SNR

以有效提高整体图像质量,提示 MUSE-DWI 能够在 显著提升病灶区域清晰度的同时,一定程度上减少呼 吸运动造成的胸部其他部位的伪影,提高了胸部整体 图像质量。

几何形变也是 ss-EPI DWI 序列在临床应用过程 中的限制因素, MUSE-DWI 依赖其分段 EPI 技术使 其沿相位编码方向填充 K 空间的速度更快,改善了几 何失真^[12];此外,由于 B0 场的不均匀性,加之 ss-EPI DWI 序列对磁场不均匀性敏感,对于空气与组织交界 处的部分,例如肺癌病灶边缘与肺组织交界处附近结 构的成像仍然具有挑战,尤其针对一些较小病灶[22]。 本次研究的主观评分结果显示 MUSE-DWI 较 ss-EPI DWI 有更为突出的抑制形变能力,并测量了肺癌扫描 最大层面的横纵径,发现两组测量的病灶最大纵径差 异有统计学意义,这与刘琴等[23]在直肠癌的研究结果 相一致, MUSE-DWI 能有效控制直肠癌的几何形变; 笔者认为这可能是由于 ss-EPI DWI 更容易累计相位 误差,导致图像形变更为严重,而 MUSE-DWI 则是基 于相位编码方向对 K 空间的分段式采集,提高采集效 率的同时,减少了相位误差带来的影响,从而控制病灶 在相位编码方向及纵向的几何形变。本研究将病灶横 径、纵径纳入定量分析研究中,通过参照 T₂WI 脂肪抑 制序列的病灶图像,通过主客观评估相结合证实 MUSE-DWI 在肺部应用过程中对病灶几何形变的控 制能力,探讨其在肺癌扫描中的应用价值。

本研究表明,使用 MUSE-DWI 代替传统的 ss-

癌成像,可以有 SNR、CNR 值, 增加激发次数, 强度;另一方面 校正运动引起的 相位误差来降低图像的噪声水 平[16]。这一研究结果还可能与 MUSE-DWI 提高了回波采集效 率,减少了采集时间相关。笔者同 ADC 值,发现两种 DWI 序列测得 的 ADC 值分别为(1.69±0.27)× $10^{-3} \,\mathrm{mm^2/s}$ 和 (1.73 ± 0.28) ×

10⁻³ mm²/s,差异不具有统计学意义,这与以往的一些 研究结果相同^[23,24],可能在一定程度上说明,MUSE-DWI 可以在不影响 ADC 值测量结果的基础上,改善 图像的质量,有效说明了 MUSE-DWI 在肺癌成像中 的可重复性;但 Kim 等[21]的研究结果称,两种序列之 间的肝脏肿瘤 ADC 值差异有统计学意义,该研究认 为,这可能与两种序列获取时对比剂摄取的浓度不同 有关;Wang 等^[11]认为,MUSE-DWI 获取的病灶 ADC 测量值可能比传统 ss-EPI DWI 的 ADC 测量值更准 确,原因可能和 ss-EPI DWI 中病灶失真严重有关;因 此,两种 DWI 序列对于病灶 ADC 值的比较研究还需 讲一步扩大样本量证实。

本研究存在一些局限性, MUSE-DWI 虽然可以 显著减低图像的失真率,减少病灶周围的磁敏感伪影, 但在部分病例并不能完全消除伪影对图像的干扰;其 次,由于 MRI 空间分辨率有限,对于较小病灶细节显 示欠佳,因而本次本研究仅纳入了直径≥1.5 cm 的实 性或部分实性病灶,可能导致一定的选择偏倚;同时, 在部分层面,ss-EPI DWI 的图像形变严重,对于病灶 解剖细节的显示有限,在勾画 ROI 获取 ADC 值时仍 受到一定主观因素的影响;后续将进一步扩充样本量 来证实本次研究的结果,并纳入更多的临床及病理指 标以探索 MUSE-DWI 序列在肺部病灶中的诊断效 能。

综上所述,对于肺癌患者,相对于常规 ss-EPI

DWI 序列, MUSE-DWI 序列可以提供几何形变和磁 敏感伪影更少的图像,同时可以有效提升病灶信噪比 和对比噪声比,实现高分辨率肺部磁共振成像,可用于 后续评估肺癌的研究。

参考文献:

- [1] 向露,秦宇,杨红,等.IVIM-DWI 全域直方图参数鉴别孤立性肺结 节良恶性的价值[J].放射学实践,2023,38(12):1539-1547.
- [2] Li J, Wu B, Huang Z, et al. Whole-lesion histogram analysis of multiple diffusion metrics for differentiating lung cancer from inflammatory lesions[J].Front Oncol,2022,12:1082454.
- [3] Uto T, Takehara Y, Nakamura Y, et al. Higher sensitivity and specificity for diffusion-weighted imaging of malignant lung lesions without apparent diffusion coefficient quantification[J]. Radiology, 2009, 252(1):247-254.
- [4] Li G, Huang R, Zhu M, et al. Native T₁-mapping and diffusionweighted imaging (DWI) can be used to identify lung cancer pathological types and their correlation with Ki-67 expression[J]. J Thorac Dis,2022,14(2):443-454.
- [5] Koyama H, Ohno Y, Nishio M, et al. Diffusion-weighted imaging vs. STIR turbo SE imaging:capability for quantitative differentiation of small-cell lung cancer from non-small-cell lung cancer[J]. Br J Radiol, 2014,87(1038):20130307.
- [6] Chen NK, Guidon A, Chang HC, et al. A robust multi-shot scan strategy for high-resolution diffusion weighted MRI enabled by multiplexed sensitivity-encoding (MUSE)[J]. Neuroimage, 2013, 72:41-47.
- [7] Usuda K, Iwai S, Yamagata A, et al. Relationships and qualitative evaluation between diffusion-weighted imaging and pathologic findings of resected lung cancers [J]. Cancers (Basel), 2020, 12 (5):1194.
- [8] 岳炫形,陈康,姚倩东,等.磁共振扩散加权成像对非小细胞肺癌的 诊断价值[J].临床放射学杂志,2020,39(11):2227-2231.
- [9] Sim AJ,Kaza E,Singer L,et al.A review of the role of MRI in diagnosis and treatment of early stage lung cancer[J].Clin Transl Radiat Oncol,2020,24:16-22.
- [10] 张辉,忻燕芬,朱勇猛,等.RESOLVE,Slice_Adjust 和 SS-EPI 技 术在乳腺扩散加权成像中的对比研究[J].实用放射学杂志, 2022,38(12):1971-1975.
- [11] Wang X, Wang P, Zhang H, et al. Multiplexed sensitivity-encoding versus single-shot echo-planar imaging: a comparative study for diffusion-weighted imaging of the thyroid lesions[J]. Jpn J Radiol, 2024, 42(3): 268-275.
- [12] Baxter GC, Patterson AJ, Woitek R, et al. Improving the image quality of DWI in breast cancer: comparison of multi-shot DWI using multiplexed sensitivity encoding to conventional single-shot echo-planar imaging DWI[J]. Br J Radiol, 2021, 94 (1119):

20200427.

- [13] Hu Y.Ikeda DM.Pittman SM.et al.Multishot diffusion-weighted MRI of the breast with multiplexed sensitivity encoding (MUSE) and shot locally low-rank (Shot-LLR) reconstructions [J].J Magn Reson Imaging, 2021, 53(3):807-817.
- [14] Wu W, Miller KL. Image formation in diffusion MRI: A review of recent technical developments [J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 46(3):646-662.
- [15] Daimiel Naranjo I, Lo Gullo R, Morris EA, et al. High-spatialresolution multishot multiplexed sensitivity-encoding diffusionweighted imaging for improved quality of breast images and differentiation of breast lesions: A feasibility study[J].Radiol Imaging Cancer, 2020, 2(3); e190076.
- [16] Zhao W, Ju S, Yang H, et al. Improved value of multiplexed sensitivity encoding DWI with reversed polarity gradients in diagnosing prostate cancer: A comparison study with single-shot DWI and MUSE DWI[J]. Acad Radiol, 2024, 31(3);909-920.
- [17] Chen X, Zhang Y, Cao Y, et al. A feasible study on using multiplexed sensitivity-encoding to reduce geometric distortion in diffusion-weighted echo planar imaging[J]. Magn Reson Imaging, 2018,54:153-159.
- [18] 刘琴,周智鹏.基于复合灵敏度编码的高分辨率磁共振扩散成像 原理及其临床应用[J].磁共振成像,2022,13(1):167-170.
- [19] Johansson J, Lagerstrand K, Ivarsson L, et al. Brain diffusion MRI with multiplexed sensitivity encoding for reduced distortion in a pediatric patient population[J].Magn Reson Imaging, 2022, 87:97-103.
- [20] Chang HC, Chen G, Chung HW, et al. Multi-shot diffusionweighted MRI with multiplexed sensitivity encoding (MUSE) in the assessment of active inflammation in Crohn's disease[J].J Magn Reson Imaging, 2022, 55(1):126-137.
- [21] Kim YY, Kim MJ, Gho SM, et al. Comparison of multiplexed sensitivity encoding and single-shot echo-planar imaging for diffusion-weighted imaging of the liver[J]. Eur J Radiol, 2020, 132: 109292.
- [22] Wan Q, Lei Q, Wang P, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging of lung cancer; comparison between turbo spin-echo and echo-planar imaging[J].J Comput Assist Tomogr, 2020,44(3);334-340.
- [23] 刘琴,周智鹏.直肠癌 MUSE-DWI 与常规 DWI 成像对比研究 [J].放射学实践,2023,38(10):1291-1296.
- [24] Konar AS, Fung M, Paudyal R, et al. Diffusion-weighted echo planar imaging using multiplexed sensitivity encoding and reverse polarity gradient in head and neck cancer: An initial study[J]. Tomography, 2020,6(2):231-240.

(收稿日期:2024-02-02 修回日期:2024-04-28)