

对比增强磁敏感加权成像序列与肺癌脑转移瘤检出的相关性

黎嘉敏^{1,2}, 区杰浩², 李晓丹², 康庄³, 周美娟¹

1. 南方医科大学公共卫生学院放射医学系, 广东 广州 510515; 2. 广东省人民医院(广东省医学科学院)放射科, 广东 广州 510080; 3. 中山大学附属第三医院放射科, 广东 广州 510630

【摘要】目的:研究对比增强磁敏感加权成像(CE-SWI)与肺癌脑转移瘤检出的相关性。**方法:**病例组选取肺癌脑转移瘤病例50例,对照组选取高血压病例50例,分析SWI与CE-SWI检出微出血的病例数、病灶个数、最大直径,采用 χ^2 检验分析两组检出的差异,采用Logistic回归分析CE-SWI与肺癌脑转移瘤、高血压微出血的相关性。**结果:**CE-SWI在病例组检出患者45例,病灶数127个,最大直径5.428(3.663, 11.405) mm;在对照组检出患者28例,病灶数121个,最大直径3.259(2.206, 4.325) mm, χ^2 检验得出两组病例检出均有统计学差异($P<0.05$)。相关性检验中,病例组发生微出血的优势比高于高血压组,差异有统计学意义($P<0.05$)。**结论:**CE-SWI对于微出血和脑转移瘤的检出敏感,肺癌脑转移、高血压都是微出血的危险因素,但肺癌脑转移引起的微出血发生率显著增加。

【关键词】肺癌;脑转移瘤;磁敏感加权成像;对比增强;微出血

【中图分类号】R318;R734.2

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)05-0556-06

Correlation between contrast-enhanced SWI sequence and detection of brain metastases from lung cancer

LI Jiamin^{1,2}, OU Jiehao², LI Xiaodan², KANG Zhuang³, ZHOU Meijuan¹

1. Department of Radiation Medicine, School of Public Health, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 2. Department of Radiology, Guangdong Provincial People's Hospital (Guangdong Academy of Medical Sciences), Guangzhou 510080, China; 3. Department of Radiology, the Third Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510630, China

Abstract: Objective To study the correlation of contrast-enhanced susceptibility-weighted imaging (CE-SWI) to the detection of brain metastases from lung cancer. **Methods** Fifty cases of brain metastases from lung cancer were enrolled as case group, and 50 cases of hypertension as control group. The microbleeds, number of lesions and maximum diameter of lesions in patients were detected by SWI and CE-SWI, separately. Chi square test was used to analyze the difference in detection results between two groups; and Logistic regression was used to analyze the correlations between CE-SWI and brain metastasis from lung cancer or hypertensive microbleeds. **Results** The CE-SWI findings showed that there were 45 patients with 127 lesions in case group, with the maximum lesion diameter of 5.428 (3.663, 11.405) mm, and that there were 28 patients with 121 lesions in control group, with the maximum lesion diameter of 3.259 (2.206, 4.325) mm. Chi square test showed that the detection results were statistically different in two groups ($P<0.05$). In the correlation test, the odds ratio of microbleeds in case group was higher than that in control group, with significant differences ($P<0.05$). **Conclusion** CE-SWI is sensitive to the detections of microbleeds and brain metastases. Both lung cancer brain metastasis and hypertension are risk factors of microbleeds, but the incidence of microbleeds caused by lung cancer brain metastasis is significantly higher.

Keywords: lung cancer; brain metastases; susceptibility-weighted imaging; contrast-enhanced; microbleed

前言

【收稿日期】2022-01-15

【基金项目】广州市科技计划项目(202007030007)

【作者简介】黎嘉敏, 技师, 研究方向: 磁共振成像技术, E-mail: 277672-638@qq.com

【通信作者】周美娟, 教授, 研究方向: 放射生物学, E-mail: lkzmj@smu.edu.cn

在我国,肺癌是排在首位的新发癌症,脑部为最常见的肺癌转移部位。有研究表明,肺癌患者发生脑转移的概率为20%~65%^[1]。脑转移瘤特点为破坏血脑屏障,常合并出血,其出血机制为转移瘤快速生长,瘤内血供不足而发生坏死出血^[2]。当前MRI检查认为肺癌脑转移瘤检出与定性的金标准为增强T₁WI序列,增强T₂ FLAIR是脑膜转移检出的有效补充^[3]。

大量研究表明,发生脑微出血(CMBs)的一个独立危险因素为高血压^[4-7]。血压控制越不理想,CMBs的发生率越高,从而出现的微出血病灶数目越多。此外,收缩压也是微出血发生的独立危险因素,微出血灶出现的数目与血压等级呈正相关^[4]。

磁敏感加权成像(SWI)是一种高分辨梯度回波的三维薄层序列,它以 T_2^* 序列为基础,对脑转移瘤合并出血的检测十分敏感,对早期转移瘤的检出有一定的帮助^[8]。但微出血灶与高血压也密切相关,SWI序列对高血压产生的微出血同样敏感,可能会与早期合并出血转移瘤混淆。近几年来,对比增强SWI(CE-SWI)序列由于注射钆对比剂后显现的 T_1 特性,作为补充序列也被应用到肺癌脑转移瘤的检测中^[9-10]。本研究分析不同序列在高血压对照组与肺癌脑转移瘤病例组中影像征象的异同,探讨CE-SWI序列与肺癌脑转移瘤与高血压微出血的相关性。

1 资料与方法

1.1 一般资料

收集2018年2月~2021年6月于广东省人民医院治疗的病例145例,肺癌脑转移瘤病例组纳入标准:(1)病理证实为肺癌;(2)MRI图像提示脑转移瘤的发生;6个月内两次以上的MRI随访记录。排除标准:(1)图像出现明显运动伪影;(2)CE-SWI与SWI序列都有发现多发低信号区,而CE- T_1 WI与CE-SWI未发现明显强化,且无后续随访将其与脑转移瘤区分。高血压微出血组(对照组)纳入标准:(1)无癌症和外伤病史;(2)SWI与CE-SWI均发现低信号区,但CE- T_1 WI未见异常。排除标准:有明显的运动伪影。

1.2 检查方法

所有扫描均在SIEMENS Espree 1.5 T磁共振设备完成,采用头颅12通道线圈,扫描序列包括常规头颅增强序列以及SWI、CE-SWI。常规序列层厚均设置为5 mm,层间距1 mm,其中包括SE序列 T_1 WITR:496 ms,TE:8.8 ms;TSE序列 T_2 WI TR:5 900 ms,TE:100 ms及使用压脂技术的 T_2 FLAIR TR:5 000 ms, TI:1 800 ms,TE:116 ms。SWI序列参数如下,TR/TE:49 ms/40 ms,层厚1.6 mm,层间距0.32 mm,翻转角为15°,体素 $0.8 \times 0.7 \times 1.6$ mm。所有检查在扫描常规头颅平扫和SWI序列后,经肘静脉手推钆喷酸葡胺对比剂,所有病人的注射对比剂剂量均为0.2 mL/kg,然后进行增强 T_1 WI、 T_2 FLAIR及SWI扫描。

1.3 评估方法

放射科诊断组两名高年资医师独立阅片,病例组首先记录高血压病人的数目,和CE- T_1 WI序列中发现肺癌脑转移瘤的数量及部位,意见不同时则讨

论达成一致,然后二次阅片记录SWI与CE-SWI序列中出现转移瘤的个数计数及分布,颅内微出血灶由于具有磁敏感特性,在CE-SWI中表现为低信号,因此肺癌病人需对照两次头颅MRI随访图像(6个月内),经回顾分析能否在当前CE- T_1 WI找到被忽略的微小病灶,讨论病灶是否为转移瘤,综合研究分析得出转移瘤的真实数量,得到阳性病人数目,并测量记录脑转移瘤在SWI与CE-SWI的最大直径。由于测得的病灶最大直径经正态检验不符合正态分布,因此最大直径用中位数(下四分位数,上四分位数)进行描述。对照组记录高血压病人的数目,SWI与CE-SWI微出血的个数计数及分布,得到阳性病人数目,并查看CE- T_1 WI中增强后的改变,并测量记录微出血灶在SWI与CE-SWI的最大直径。最后以CE-SWI序列为因变量,研究其与肺癌脑转移瘤、高血压微出血的相关性。

1.4 统计学方法

使用SPSS 25进行统计学分析,将病例组在CE-SWI序列检出的病例数及对照组在CE-SWI序列检出的病例数分别与病例组患者数和对照组患者数采用卡方检验进行两两比较, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。CE-SWI对病灶的检出数量与高血压微出血、肺癌脑转移瘤的相关性采用Logistic回归分析。

2 结果

本研究共收集病例组患者50例,男26例,女24例,年龄35~83岁,平均年龄 (57 ± 11) 岁,其中患有高血压8例;病例组中SWI能显示其中40例,病灶数111个,SWI显示的最大直径为 $4.973(3.208, 10.624)$ mm;CE-SWI能显示病例组中的45例,病灶数127个,出现正性强化病灶98个,最大直径 $5.428(3.663, 11.405)$ mm。在病例组中,50%(63/127)瘤周水肿在CE-SWI图像中可见,CE-SWI序列由于肿瘤实质正性强化效应的存在(图1),检出的最大直径较SWI序列大。瘤内血管在钆对比剂注射后显示,可见病灶边缘低信号边界(图2)。对照组患者50例,男30例,女20例,年龄54~91岁,平均年龄 (71 ± 8) 岁,SWI与CE-SWI检出微出血灶的结果相同,为28例,病灶数121个,最大直径 $3.259(2.206, 4.325)$ mm,微出血灶未见强化效应(图3),CE-SWI和SWI检查相关结果见表1。对病例组CE-SWI检出的病例数与脑转移瘤患者病例数以及对照组CE-SWI检出病例数与高血压患者病例数分别进行卡方检验交叉分析,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。

统计学结果表明,CE-SWI序列中微出血病灶的

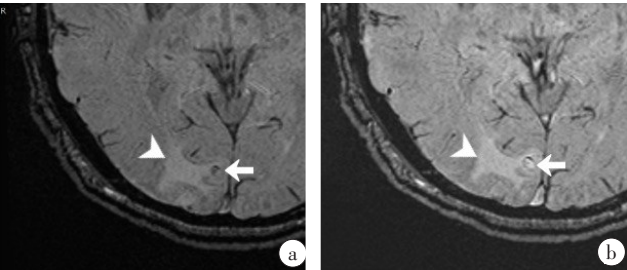


图1 瘤周水肿与强化病灶的显示

Figure 1 Peritumoral edema and enhanced lesions

a:SWI序列,可见一类圆形低信号区(箭),瘤周水肿可见(箭头);b:CE-SWI序列,瘤周水肿同样可见(箭头),与图1a相比,由于T₁穿透效应,在注射钆对比剂后可见肿瘤实质正性强化(箭)

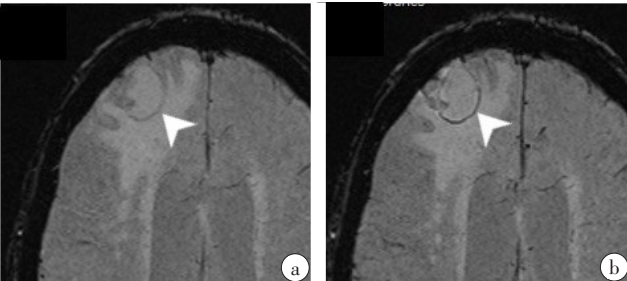


图2 瘤内血管的显示

Figure 2 Intratumoral vessels

a:SWI序列,可见一稍高信号病灶(箭头),边界较模糊;b:CE-SWI序列,病灶边界呈低信号,可见新出现的低信号为血管(箭头)

出现与肺癌脑转移瘤、高血压密切相关。表2数据显示,CE-SWI序列对肺癌脑转移瘤、高血压微出血灶的检出,结果均有统计学差异($P<0.05$)。高血压是CE-SWI检出微出血灶的一个危险因素。而当肺癌患者出现脑转移瘤时,由于转移灶通常伴有微出血,CE-SWI在病例组检出微出血灶的概率大于对照组(表2中 $b_1>b_2>0,OR_1>OR_2$)。

3 讨论

SWI是一种完全流动补偿的、高分辨率三维薄层梯度回波序列,它利用幅值和相位位移增强磁敏感的变化,提供有关颅内静脉血管系统、出血和铁沉积等信息^[11],对钙化和出血(血红蛋白降解的整个阶段)的检测非常敏感。尽管SWI是以T₂*为基础的序列,其实它同时存在T₁穿透效应,即病变在SWI上保留T₁加权图像上预期的特征。因此,钆能强化SWI上的病变,并通过进一步的组织内对比,在早期转移过程中揭示小病变^[12]。已有研究表明,高血压是产生微出血等脑血管病的独立危险因素^[13]。因此,以肺癌脑转移瘤患者和高血压患者两组进行对照试验,CE-SWI能分辨出病例组和对照组产生的微出血灶。

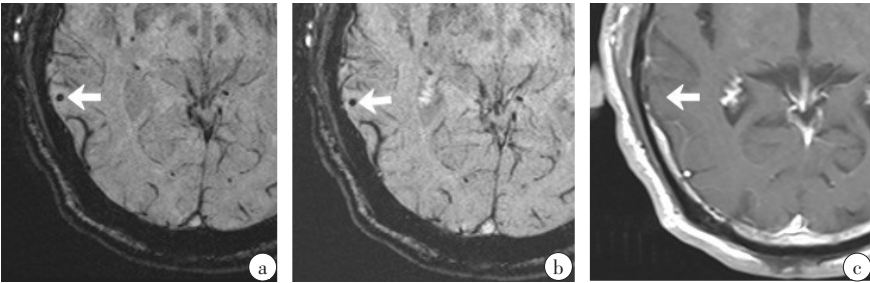


图3 对照组高血压微出血患者图像

Figure 3 Images of patients with hypertensive microbleeds in control group

a:SWI序列,可见一类圆形低信号区(箭);b:CE-SWI序列,类圆形低信号区在钆对比剂注射前后无明显变化(箭);c:CE-T₁WI图像上相同位置未发现明显病灶(箭)

表1 CE-SWI在病例组与对照组微出血检出数的比较

Table 1 Comparison of the number of cases with microbleeds found by CE-SWI in case group and control group

组别	CE-SWI检出的患者数量/人	CE-SWI检出的病灶数/个	CE-SWI显示最大直径/ M(Q1, Q3), mm	SWI显示最大直径/ M(Q1, Q3), mm
病例组(n=50)	45	127	5.428(3.663, 11.405)	4.973(3.208, 10.624)
对照组(n=50)	28	121	3.259(2.206, 4.325)	3.259(2.206, 4.325)
P值	0.008*	-	<0.001 [#]	<0.001 [#]

*表示CE-SWI检出病例数在病例组与对照组的差异采用卡方检验统计;#表示CE-SWI与SWI的最大直径在病例组与对照组的差异采用Mann-Whitney U检验分析

3.1 CMBs

近年来,由于高场强磁共振系统的广泛应用,以

及SWI序列的发展,CMBs在各种疾病以及无症状患者中的检出率更高,因此CMBs的发现在临床上引起

表2 100例患者CE-SWI检出微出血与高血压、肺癌脑转移瘤两个因素的关系

Table 2 Relationships between microbleeds detected by CE-SWI and hypertension or lung cancer brain metastases in 100 cases

变量	CE-SWI检出微出血患者数量		OR(95%置信区间)	b	P值
肺癌脑转移	有(n=50)	45	7.071(2.402, 20.814)	1.956	<0.001
	无(n=50)	28	常数项 1.0	-	-
高血压	有(n=41)	36	4.281(1.463, 12.531)	1.454	0.008
	无(n=59)	37	常数项 1.0	-	-

b为回归系数,当b>0时,呈正相关,表示为危险因子,与疾病的发生相关;OR:优势比,在95%置信区间内,数值越大,对该疾病发生的影响越显著;P值:病例组CE-SWI检出微出血患者数量(45)与肺癌患者数量(50)的交叉分析以及对照组CE-SWI检出微出血病例数(36)与高血压患者数量(41)的交叉分析

了更多的关注。CMBs是由脑组织中微小血管病变导致含铁血黄素的沉积^[14]。在SWI图像上,颅内微出血灶的界定为2~5 mm的类圆形或圆形低信号,界限清晰且周围无水肿,脑微出血灶在相位图上中央呈低信号,周边呈环形高信号^[15]。有研究表明,目前使用的成像技术显著低估了CMBs的真实数量^[16]。CMBs在SWI图像中的低信号容易与钙化灶混淆,但出血的顺磁性和钙化的反磁性,在相位图呈现的信号相反,有助于区分两者。

文献[17]报道,黑色素瘤、肺癌等易产生微小出血的原发性肿瘤脑转移,可能类似于CMBs,SWI序列有助于确定脑转移瘤中的原发肿瘤实体。高血压脑血管病也多以无症状多发性CMBs为特征。与慢性全身性高血压相关的CMBs更常见于丘脑、基底节和小脑^[18]。这些高血压CMBs是随后发生颅内血肿/脑叶出血的危险因素。SWI可以很好地显示这种微出血和大出血,尤其是急性脱氧血红蛋白或慢性含铁血黄素^[19]。而且CMBs的数量也与血压水平有关^[4, 13]。

目前的MRI技术仅帮助临床检测到一部分CMBs,但这些微小病变在特定疾病的诊断中发挥着越来越大的作用。因此,通过先进的影像学早期识别病理特征,可以在症状发生之前减缓病程的进展。

3.2 CE-SWI的应用原理

有研究表明SWI序列中除了T₂*弛豫,同时存在T₁弛豫的信息,在对比剂注入后能观察到T₁WI的强化^[20]。实际上,SWI是一个稳态序列,信号与多个组成参数有关,公式如下:

$$S(t)=\rho_0\sin\theta(1-E1)/(1-E1\cos\theta)\exp(-TE/T_2^*)\quad (1)$$

其中,θ为翻转角,ρ₀为组织自旋密度,TE是回波时间,T₂*是梯度回波成像的横向弛豫时间,公式中E1=exp(-TR/T₁),TR为重复时间,T₁是组织纵向弛豫时间。应用SWI序列时,通常显示T₂*的信号,原因是血液制品在检测时占主导地位,但从公式解释仍存

在T₁弛豫项。由于SWI序列TR是个固定值并且比较短,对于任何已知T₁值的组织来说,都有一个最佳翻转角存在,使组织显示的信号强度最大,这个最佳翻转角称为恩斯特角(θ_E=sqrt(2 TR/T₁))^[21]。

对比增强前后的SWI序列除了有T₁穿透效应的发生,还有新出现的低信号,这些低信号提示肿瘤内的血管。当SWI序列专门用于肿瘤血管成像时,出血可以模拟静脉和背景组织之间的信号导致消除效应的出现。如果在使用对比剂前后都使用SWI,则出血可以与静脉区分开,血管会改变其信号强度,可见更多低信号的呈现,但非活动性出血区域不会改变^[22],见图4。因此,出血灶与瘤内血管可用增强前的SWI与增强后的SWI区分开^[23]。

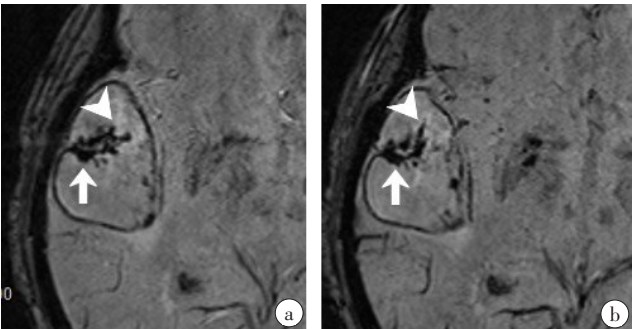


图4 出血与瘤内血管的显示

Figure 4 Hemorrhage and intratumoral vessels

a:SWI图像上可见一低信号出血灶(箭),箭头所指位置未发现低信号;

b:CE-SWI图像上出血灶无明显变化(箭),但箭头所指有更多的低信号出现,提示肿瘤血管

由于SWI提供了不同于传统自旋回波MRI序列的图像对比度和敏感性信息,其可以揭示肿瘤微环境的特征。“肿瘤内易感信号”的概念是作为一个半定量参数引入的,以“肿瘤内有无低信号管状结构或点状结构聚集,及其数量”作为评判标准,指示肿瘤微出血或新生血管^[9],反映肿瘤的活跃程度,这些影

像依据能作为肺癌患者脑转移瘤放疗的效果评价^[24]。

3.3 CE-SWI检出脑转移瘤与微出血的对比

CE-SWI对于肺癌脑转移瘤与微出血灶的检出,有着一定的相关性。临床应用中,由于血红蛋白降解产物(如含铁血黄素)和脱氧血红蛋白的顺磁 T_2^* 敏感性效应,血制品在SWI上都有低信号^[20]。因此对于微出血灶的检出,SWI都高度敏感。但脑转移瘤与高血压产生的CMBs在CE-SWI上的显示又有着明显的区别。首先,SWI序列中使用了一定角度的翻转角,抑制了部分脑脊液的信号,由于 T_2 效应的存在,脑转移瘤周水肿也同样能清晰观察^[25]。而高血压微出血在SWI图像上显示为一个类圆形低信号区,该区域周围没有发生水肿。其次,SWI序列存在 T_1 穿透效应,由于脑转移瘤破坏了血脑屏障,肿瘤在钆对比剂注入后在SWI序列上产生 T_1 像的正性强化效果。若早期肺癌脑转移瘤有合并出血而病灶较小,SWI图像上提示为低信号,而小病灶接受的对比剂浓度较低,在CE- T_1 WI像上正性强化效应弱,诊断时容易被忽略导致漏诊;对于肿瘤破裂出血的病灶,平扫和增强 T_1 WI图像上都呈现高信号,容易混淆。因此,CE-SWI序列的加入,与SWI序列做对照,能区分病灶是单纯CMBs还是脑转移瘤;与CE- T_1 WI互补,能观察到出血范围、肿瘤实质的边界与内部结构。最后,因为钆对比剂同时缩短了组织 T_1 、 T_2 的弛豫时间,导致 T_2^* 缩短,信号降低,所以血管内注入的对比剂增强了信号,导致小静脉显示增多,瘤内的血管表现出新的低信号^[26]。对比剂注入后血管会改变其信号强度,但非活动性出血区域不会改变,因此非活动性出血灶在对比剂注射前后不产生变化。对于高血压产生的微出血,血脑屏障没有被破坏,SWI图像上显示的低信号区为出血灶,不受肿瘤血管信号改变的影响,在注射对比剂前后,微出血灶在CE- T_1 WI图像上未发现明显出血高信号,SWI图像上低信号无明显变化。因此,肺癌脑转移瘤与高血压微出血,可以通过CE- T_1 WI和CE-SWI图像进行鉴别。

3.4 研究的局限性

①研究使用1.5 T磁共振设备,SWI序列TR、TE较长,扫描时间为5 min,对于不耐受的病人,运动伪影出现的概率增大。②SWI序列由于其磁敏感特性,在颅底区或颅骨等位置磁敏感差异大,病灶不易检出。③只研究了CE-SWI序列在肺癌脑转移瘤与高血压微出血灶的相关性,但CE-SWI在多发性硬化、阿尔兹海默症等神经退行性病变中的应用也有很高的临床价值^[27-28]。

SWI序列检测脑小血管病变已有很多学者进行

了深入研究,而且成果显著^[29],但注入对比剂之后的CE-SWI序列的应用相对较少^[30],特别是在脑转移瘤检出的敏感性方面。在CE-SWI序列应用于肺癌脑转移瘤的基础上,本研究通过设置高血压微出血对照组,分析CE-SWI序列对于肺癌患者合并出血脑转移瘤的检出特异性,通过回归分析,可以得出CE-SWI序列对于脑转移瘤微出血的检出更有优势的结论。但Schwarz等^[31]认为在脑转移瘤的检出研究中,SWI序列中出现的低信号孤立病灶,可能是治疗成功后的残余物,不一定有脑转移瘤的发生,因此需要对照随访的MRI图像。

综上所述,SWI序列由于其磁敏感特性,对CMBs的存在与检测十分敏感,肺癌脑转移、高血压等疾病与微出血灶的存在密切相关,这方面特性在临床上已经广泛应用。但 T_1 穿透效应的存在,对脑转移瘤实质的检出提供了很好的诊断依据,而且瘤内血管会在对比剂注射后,出现低信号,对转移瘤的内部结构、静脉引流等情况,较CE- T_1 WI显示更清晰。而且SWI序列由于使用了一定的翻转角,导致部分脑脊液的抑制,瘤周水肿也能在图像上显示。出血、肿瘤实质强化和瘤周水肿3种现象都能在CE-SWI图像上结合起来,帮助放射医生有效诊断肺癌脑转移瘤。SWI序列的放大晕染效应是检出微小病灶的关键,这是一把双刃剑,导致其对转移瘤的真实范围不能准确评估,因此不能替代常规的CE- T_1 WI序列。因此CE-SWI是肺癌患者随访中,脑转移瘤检出的一个有效附加序列,与金标准CE- T_1 WI能互为补充,提供转移瘤的影像依据。对于肺癌脑转移瘤患者而言,利用CE-SWI早期识别病理特征,可以在症状发生之前减缓病程的进展,有助于提高肺癌患者的生存质量。

【参考文献】

- [1] 石远凯,孙燕,于金明,等.中国肺癌脑转移诊治专家共识(2017年版)[J].中国肺癌杂志,2017,20(1):1-13.
Shi YK, Sun Y, Yu JM, et al. China experts consensus on the diagnosis and treatment of brain metastases of lung cancer (2017 version) [J]. Chinese Journal of Lung Cancer, 2017, 20(1): 1-13.
- [2] 易自生,刘一平,陈志斌,等.磁敏感成像在肺癌脑转移检出与随访中的价值[J].中国现代医学杂志,2014,24(8):94-97.
Yi ZS, Liu YP, Chen ZB, et al. Clinical value of susceptibility-weighted imaging (SWI) in diagnosing the cerebral metastases from lung cancer [J]. China Journal of Modern Medicine, 2014, 24(8): 94-97.
- [3] 黄飏,梁长虹,刘红军,等.MR增强后液体衰减反转恢复序列对脑转移瘤的诊断价值[J].临床放射学杂志,2008,27(6):766-769.
Huang B, Liang CH, Liu HJ, et al. Intracranial metastases: value of MR contrast-enhanced fluid attenuated inversion recovery [J]. Journal of Clinical Radiology, 2008, 27(6): 766-769.
- [4] Lyu LC, Shen JY, Zeng CL, et al. Cerebral microbleeds are associated with blood pressure levels in individuals with hypertension [J]. Clin Exp Hypertens, 2020, 42(4): 328-334.

- [5] Iadecola C, Parikh NS. Blood pressure ups and downs foreshadow cerebral microangiopathy[J]. J Am Coll Cardiol, 2020, 75(19): 2400-2402.
- [6] Elkhatib TH, Elsaid AF, Al-molla RM, et al. Prevalence and associated risk factors of cerebral microbleeds in egyptian patients with acute ischemic stroke and atrial fibrillation[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2020, 29(5): 104703.
- [7] Förster A, Wenz R, Maros ME, et al. Anatomical distribution of cerebral microbleeds and intracerebral hemorrhage in vertebrobasilar dolichoectasia[J]. PLoS One, 2018, 13(4): e0196149.
- [8] 刘子珊, 詹茸婷, 王明磊, 等. 磁敏感加权成像在肺癌脑转移瘤诊断中的应用价值[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2016, 22(3): 198-203.
- [9] Liu ZS, Zhan RT, Wang ML, et al. The clinical application of susceptibility weighted imaging in the diagnosis of brain metastases from lung cancer[J]. Chinese Computed Medical Imaging, 2016, 22(3): 198-203.
- [9] Schwarz D, Bendszus M, Breckwoldt MO. Clinical value of susceptibility weighted imaging of brain metastases[J]. Front Neurol, 2020, 11: 55.
- [10] 吴立业, 刘军, 黄子龙, 等. 对比增强SWI对不同病理类型肺癌脑转移瘤检出的初步研究[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2019, 25(1): 1-7.
- [10] Wu LY, Liu J, Huang ZL, et al. A preliminary study of contrast-enhanced magnetic susceptibility-weighted imaging in detection of brain metastases from different pathological types of lung cancer[J]. Chinese Computed Medical Imaging, 2019, 25(1): 1-7.
- [11] Hori M, Ishigame K, Kabasawa H, et al. Precontrast and postcontrast susceptibility-weighted imaging in the assessment of intracranial brain neoplasms at 1.5 T[J]. Jpn J Radiol, 2010, 28(4): 299-304.
- [12] Ceballos-ceballos J, Loza-gallardo DA, Barajas-romero MA, et al. Recognition of brain metastases using gadolinium-enhanced SWI MRI: proof-of-concept study[J]. Front Neurol, 2020, 11: 5.
- [13] Greenberg SM, Vernooij MW, Cordonnier C, et al. Cerebral microbleeds: a guide to detection and interpretation[J]. Lancet Neurol, 2009, 8(2): 165-174.
- [14] Liu SF, Utriainen D, Chai C, et al. Cerebral microbleed detection using susceptibility weighted imaging and deep learning[J]. Neuroimage, 2019, 198: 271-282.
- [15] De Guio F, Jouvent E, Biessels GJ, et al. Reproducibility and variability of quantitative magnetic resonance imaging markers in cerebral small vessel disease[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2016, 36(8): 1319-1337.
- [16] Puy L, Pasi M, Rodrigues M, et al. Cerebral microbleeds: from depiction to interpretation[J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 2021. DOI: 10.1136/jnnp-2020-323951.
- [17] Haller S, Vernooij MW, Kuijter JP, et al. Cerebral microbleeds: imaging and clinical significance[J]. Radiology, 2018, 287(1): 11-28.
- [18] Shuaib A, Akhtar N, Kamran S, et al. Management of cerebral microbleeds in clinical practice[J]. Transl Stroke Res, 2019, 10(5): 449-457.
- [19] Halefoglu AM, Yousem DM. Susceptibility weighted imaging: clinical applications and future directions[J]. World J Radiol, 2018, 10(4): 30-45.
- [20] Hsu CC, Haacke EM, Heyn CC, et al. The T₁ shine through effect on susceptibility weighted imaging: an under recognized phenomenon[J]. Neuroradiology, 2018, 60(3): 235-237.
- [21] Eisele P, Fischer K, Szabo K, et al. Characterization of contrast-enhancing and non-contrast-enhancing multiple sclerosis lesions using susceptibility-weighted imaging[J]. Front Neurol, 2019, 10: 1082.
- [22] Sehgal V, Delproposto Z, Haacke EM, et al. Clinical applications of neuroimaging with susceptibility-weighted imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2005, 22(4): 439-450.
- [23] Mittal S, Wu Z, Neelavalli J, et al. Susceptibility-weighted imaging: technical aspects and clinical applications, Part 2[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2009, 30(2): 232-252.
- [24] 崔恒武, 董津邑, 葛宇曦, 等. 脑转移瘤放疗前后的SWI及增强T₁WI对比研究[J]. 实用放射学杂志, 2014, 30(12): 1955-1957.
- [24] Cui HW, Dong JY, Ge YX, et al. Diagnosis of metastases encephaloma by using susceptibility weighted imaging and contrast-enhanced T₁-weighted imaging of MR before and after radiotherapy[J]. Journal of Practical Radiology, 2014, 30(12): 1955-1957.
- [25] Do Amaral LL, Fragoso DC, Nunes RH, et al. Gadolinium-enhanced susceptibility-weighted imaging in multiple sclerosis: optimizing the recognition of active plaques for different MR imaging sequences[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2019, 40(4): 614-619.
- [26] Sehgal V, Delproposto Z, Haddar D, et al. Susceptibility-weighted imaging to visualize blood products and improve tumor contrast in the study of brain masses[J]. J Magn Reson Imaging, 2006, 24(1): 41-51.
- [27] Li L, Wu DH, Li HQ, et al. Association of cerebral microbleeds with cognitive decline: a longitudinal study[J]. J Alzheimers Dis, 2020, 75(2): 571-579.
- [28] Rauscher A, Sedlacik J, Deistung A, et al. Susceptibility weighted imaging: data acquisition, image reconstruction and clinical applications[J]. Z Med Phys, 2006, 16(4): 240-250.
- [29] Wang H, Jiang Q, Shen Y, et al. The capability of detecting small vessels beyond the conventional MRI sensitivity using iron-based contrast agent enhanced susceptibility weighted imaging[J]. NMR Biomed, 2020, 33(5): e4256.
- [30] Ei-Koussy M, Schenk P, Kiefer C, et al. Susceptibility-weighted imaging of the brain: does gadolinium administration matter?[J]. Eur J Radiol, 2012, 81(2): 272-276.
- [31] Schwarz D, Niederle T, Munch P, et al. Susceptibility-weighted imaging in malignant melanoma brain metastasis[J]. J Magn Reson Imaging, 2019, 50(4): 1251-1259.

(编辑: 薛泽玲)