

论 著 · 头颈部

磁共振动态对比增强成像联合磁共振波谱分析在脑肿瘤诊断中的应用

周秀秀 曾亚伟 郑 冬*
解放军总医院第九医学中心放射诊断科
(北京 100000)

【摘要】目的 探讨磁共振动态对比增强成像(DCE-MRI)联合磁共振波谱分析(NMRS)在脑肿瘤诊断中的应用价值。方法 回顾性收集2018年4月至2024年6月至解放军总医院第九医学中心手术治疗的120例脑肿瘤患者临床资料,依据术后病理诊断结果分为脑恶性肿瘤组(n=76,包括胶质瘤71例、脑转移瘤5例)和脑良性肿瘤组(n=44,包括脑膜瘤24例、垂体腺瘤11例、听神经瘤9例);依据WHO分级,将71例脑胶质瘤患者进一步分为 I-II级(n=31)和III-IV级(n=40)两组。统计所有患者术前DCE-MRI检查参数[容量转运参数(K^{trans})、速率常数(K_{ep})及血管外细胞外间隙容积比(V_e)]及NMRS检查参数[N-乙酰天门冬氨酸(NAA)、胆碱化合物(Cho)、肌酸(Cr)],计算NAA/Cho、Cho/Cr及NAA/Cr值,探讨DCE-MRI联合NMRS在脑肿瘤良恶性及胶质瘤分级中的应用价值。结果 脑恶性肿瘤组 K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e 、Cho/Cr大于脑良性肿瘤组,NAA/Cho、NAA/Cr小于脑良性肿瘤组,差异有统计学意义($P<0.05$)。绘制受试者工作特征曲线(ROC曲线),提示DCE-MRI参数(K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e)、NMRS检查参数(NAA/Cho、Cho/Cr、NAA/Cr)单独及联合诊断脑肿瘤良恶性的曲线下面积(AUC)值分别为0.622、0.624、0.648、0.732、0.696、0.635、0.855,DCE-MRI联合NMRS诊断脑肿瘤良恶性价值最高($P<0.05$)。胶质瘤III-IV组 K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e 、Cho/Cr大于胶质瘤 I-II级组,NAA/Cho、NAA/Cr小于胶质瘤 I-II级组,差异有统计学意义($P<0.05$)。相关性分析显示,DCE-MRI、NMRS检查参数与胶质瘤不同分级间存在相关性($P<0.05$)。结论 DCE-MRI联合NMRS在诊断脑肿瘤良恶性中应用价值较高,且可辅助胶质瘤分级诊断。

【关键词】脑肿瘤;胶质瘤;
磁共振动态对比增强成像;
磁共振波谱分析;诊断

【中图分类号】R739.41
【文献标识码】A
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.10.003

Application of Dynamic Contrast Enhanced-magnetic Resonance Imaging Combined with Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy Analysis in the Diagnosis of Brain Tumors

ZHOU Xiu-xiu, ZENG Ya-wei, ZHENG Dong*.
Department of Diagnostic Radiology, the Ninth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100000, China

ABSTRACT
Objective To explore the application value of dynamic contrast enhanced-magnetic resonance imaging (DCE-MRI) combined with magnetic resonance spectroscopy (NMRS) in the diagnosis of brain tumors. **Methods** The clinical data of 120 patients with brain tumors who underwent surgical treatment in the Ninth Medical Center of Chinese PLA General Hospital from April 2018 to June 2024 were retrospectively collected. According to the results of postoperative pathological diagnosis, they were divided into malignant brain tumor group (n=76, including 71 cases of glioma and 5 cases of brain metastasis) and benign brain tumor group (n=44, including 24 cases of meningioma, 11 cases of pituitary adenoma and 9 cases of acoustic neuroma). According to WHO classification, 71 patients with glioma were further divided into two groups: grade I-II (n=31) and grade III-IV (n=40). Preoperative DCE-MRI examination parameters [volume transport parameter (K^{trans}), rate constant (K_{ep}), extracellular space volume ratio (V_e)] and NMRS examination parameters (N-acetylaspartate (NAA), choline compound (Cho), creatine (Cr)) of all patients were analyzed. NAA/Cho, Cho/Cr and NAA/Cr values were calculated] to explore the application value of DCE-MRI combined with NMRS in the classification of benign and malignant brain tumors and glioma. **Results** K^{trans} , K_{ep} , V_e , Cho/Cr in the brain malignant tumor group were higher than those in the brain benign tumor group, while NAA/Cho and NAA/Cr were lower than those in the brain benign tumor group, with statistical significant differences ($P<0.05$). Receiver operating characteristic curves (ROC curves) were drawn to indicate that the area under the curve (AUC) values for DCE-MRI parameters (K^{trans} , K_{ep} , V_e) and NMRS examination parameters (NAA/Cho, Cho/Cr, NAA/Cr) alone and in combination for diagnosing benign and malignant brain tumors were 0.622, 0.624, 0.648, 0.732, 0.696, 0.635, and 0.855, respectively. DCE-MRI combined with NMRS had the highest diagnostic value for benign and malignant brain tumors ($P<0.05$). K^{trans} , K_{ep} , V_e , Cho/Cr in glioma group III-IV were higher than those in glioma grade I-II group, while NAA/Cho and NAA/Cr were lower than those in glioma grade I-II group, with statistical significant differences ($P<0.05$). Correlation analysis showed that there was a correlation between DCE-MRI, NMRS examination parameters and different grades of glioma ($P<0.05$). **Conclusion** DCE-MRI combined with NMRS has high application value in the diagnosis of benign and malignant brain tumors, and can assist in the grading diagnosis of gliomas.

Keywords: Brain Tumor; Glioma; Dynamic Contrast Enhanced-magnetic Resonance Imaging; Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy Analysis; Diagnosis

脑肿瘤是一种神经系统肿瘤,易发生在外周神经、脑膜、神经上皮等颅腔内部位,根据肿瘤部位不同,可使患者渐进性出现头痛、呕吐、感觉障碍、视力减退等不同症状,严重影响患者日常生活^[1]。临床对于脑肿瘤,常依据肿瘤良恶性给予不同诊疗方案,如脑良性肿瘤,一般经由外科手术切除即可达到良好疗效;而对于脑恶性肿瘤,在外科手术最大安全切除基础上还需给予放疗化疗等辅助治疗。因此,明确脑肿瘤良恶性具有重要意义。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)利用无线电波和强磁场可获取患者脑部结构高清图像,是临床常用脑肿瘤定性诊断方法^[2-3]。而磁共振动态对比增强成像(dynamic contrast enhanced-MRI, DCE-MRI)和磁共振波谱(nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMRS)是MRI两种成像技术,前者可增强脑正常组织与肿瘤病灶之间对比度,且可反映肿瘤内部血供状态;后者利用核磁共振和化学位移原理成像,可提供颅脑病灶内部细胞代谢情况。基于此,本研究聚焦于MRI中的DCE-MRI、NMRS两种成像技术,探讨DCE-MRI联合NMRS在脑肿瘤诊断中的应用价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集2018年4月至2024年6月至解放军总医院第九医学中心手术治疗的120例脑肿瘤患者临床资料,依据术后病理诊断结果分为脑恶性肿瘤组(n=76,包括胶质瘤71例、脑转移瘤5例)和脑良性肿瘤组(n=44,包括脑膜瘤24例、垂体腺瘤11例、听神经瘤9例)。纳入标准:(1)所有患者术前均接受DCE-MRI、NMRS检查;(2)初诊初治;(3)患者一般资料、检查结果及病理诊断结果完整;(4)原发性脑肿瘤。排除标准:(1)合并脑部以外恶性肿瘤;(2)合并精神疾病;(3)合并其他严重脑部病变,如颅脑损伤;

【第一作者】周秀秀,女,主治医师,主要研究方向:放射诊断。E-mail:angle1230425@163.com
【通讯作者】郑 冬,男,在职研究生,副主任医师,主要研究方向:放射诊断学。E-mail:zdjfyzy@163.com

(4)DCE-MRI或NMRS检查图像质量差,无法辅助诊断。脑恶性肿瘤组男40例,女36例;年龄41~60岁,平均 (51.14 ± 4.25) 岁;肿瘤最大径18~33mm,平均 (25.31 ± 3.56) mm;身体质量指数 $19 \sim 27 \text{ kg/m}^2$,平均 $(23.34 \pm 1.76) \text{ kg/m}^2$ 。脑良性肿瘤组男23例,女21例;年龄45~61岁,平均 (50.98 ± 4.18) 岁;肿瘤最大径17~32mm,平均 (25.26 ± 3.71) mm;身体质量指数 $18 \sim 27 \text{ kg/m}^2$,平均 $(23.36 \pm 1.78) \text{ kg/m}^2$ 。比较两组基线资料,差异无统计学意义($P > 0.05$)。本研究共纳入120例患者,样本量基于前期预实验和统计学分析确定,旨在确保研究的可靠性和有效性。本研究经解放军总医院第九医学中心医学伦理委员会审核通过。

1.2 方法

1.2.1 DCE-MRI检查 检查设备为西门子公司生产的Trio 3.0T型磁共振成像仪及其配套的头颈联合线圈。进入扫描室前告知患者去除身上所有金属异物;进入扫描室后指导患者仰卧位平躺于扫描床上,头先进,肩部贴近头颈线圈下方,左右居中,使用防噪耳机或楔形软垫固定头部,必要时加放海绵垫,叮嘱患者扫描过程中全程闭眼,下颌内收。先进行常规T1WI、T2WI扫描,扫描序列为自旋回波脉冲序列,设置参数如下:T1WI:TR为400ms,TE为2.48 ms,层厚5mm;T2WI:TR为5090ms,TE为91ms,层厚5mm。常规扫描结束后行DCE-MRI检查:首先进行三维容积内插快速扰相T1WI梯度回波序列扫描,反转角度分别取 5° 、 10° 、 15° 、 20° ,参数分别为TR为3.89ms,TE为1.31ms,FOV=270mm $\times$ 270mm,层厚4mm。经高压注射器以3mL/s团注0.1mmol/L造影剂(钆喷酸葡胺,规格469.01mg/mL $\times$ 10mL添加造影剂的具体名称和规格),于造影剂注射完毕后立即以相同速率团注等量生理盐水冲洗导管内残留造影剂,而后以反转角度 15° 行动态增强扫描,共采集75次,扫描结束后将DCE-MRI检查图像和数据传至工作站,经软件中的血流动力学模型分析后,获取病灶部位的容量转运参数(K^{trans})、速率常数(K_{ep})及血管外细胞外间隙容积比(V_e)。

1.2.2 NMRS检查 DCE-MRI检查完成后行NMRS检查:采用点分辨波谱分析法,根据常规扫描中病变大小及部位选取感兴趣区

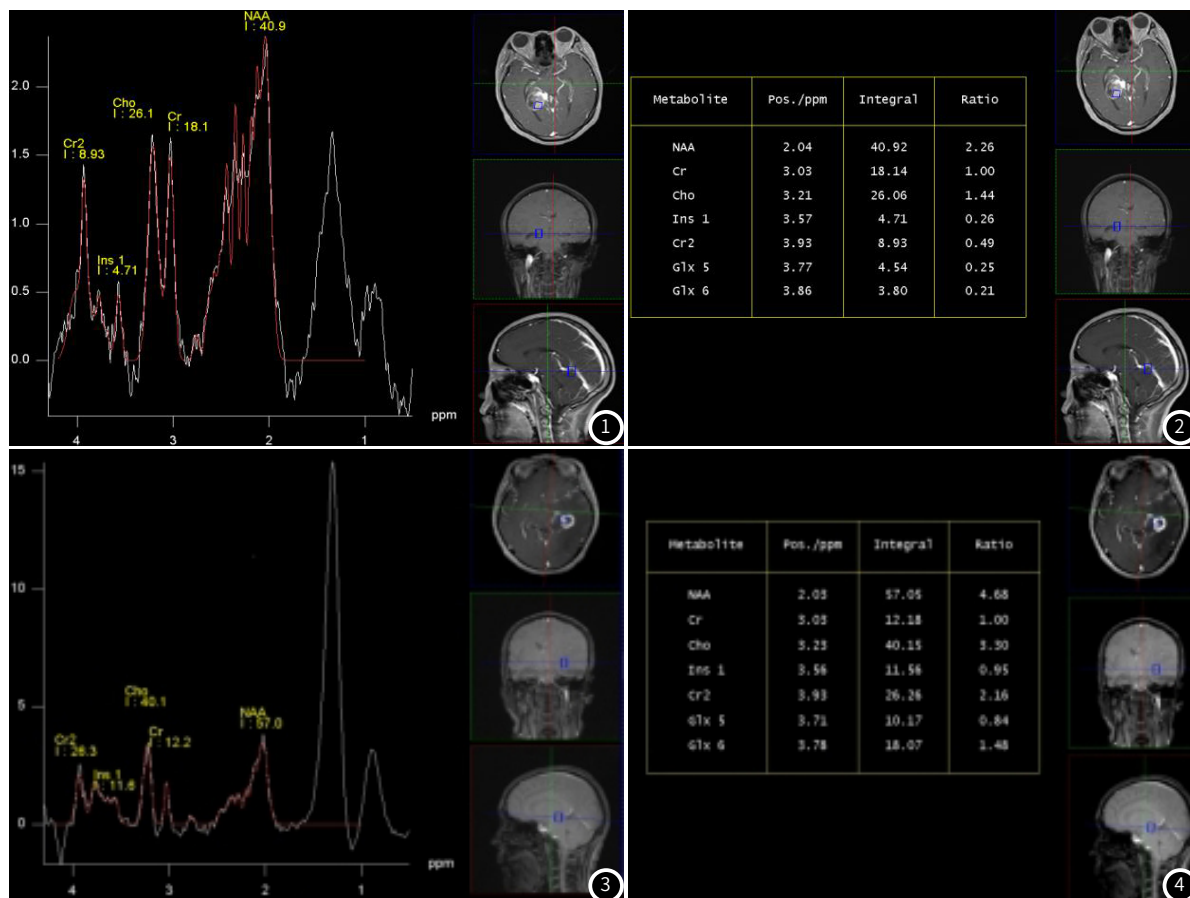
分别进行单体素波谱检查和多体素波谱检查,设置参数:单体素:TR为1500ms,TE为32ms,体素为 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$;多体素:TR为1500ms,TE为135ms,体素为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,选取感兴趣区尽量避免颅骨、脑脊液、大血管等干扰组织,扫描过程中告知患者需严格制动;将扫描完成的图像和数据传至工作站,获取瘤体实性部分代谢物浓度,包括N-乙酰天门冬氨酸(N-acetyl-aspartate, NAA)、胆碱化合物(Choline, Cho)、肌酸(Creatine, Cr),并据此计算NAA/Cho、Cho/Cr及NAA/Cr值。

1.3 观察指标 对比脑良恶性肿瘤患者DCE-MRI、NMRS检查参数;依据术后病理结果和WHO分级^[4],将71例脑胶质瘤患者进一步分为I-II级($n=31$)和III-IV级($n=40$)两组,对比不同分级脑胶质瘤患者的DCE-MRI、NMRS检查参数。

1.4 统计学分析 使用统计学软件SPSS 25.0对本研究数据进行处理,所有资料均经正态性检验(脑良性肿瘤组、胶质瘤I-II级及III-IV级用Shapiro-Wilk检验,脑恶性肿瘤组采用Kolmogorov-Smirnov检验),将符合正态分布采用“ $\bar{x} \pm s$ ”表示,并进行Barlett方差齐性检验,方差齐时用独立样本t检验,方差不齐时采用t,检验,计数资料用%和n表示,采用 χ^2 检验;通过相关性分析DCE-MRI、NMRS检查参数与胶质瘤不同分级间的关系。绘制受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC),并计算曲线下面积(Area Under Curve, AUC),分析DCE-MRI联合NMRS对脑肿瘤的诊断价值。(参照标准: AUC值 > 0.9 : 诊断效能较高; $0.7 < \text{AUC值} \leq 0.9$: 诊断效能中等; $0.5 < \text{AUC值} \leq 0.7$: 诊断效能较低; AUC值 ≤ 0.5 : 无诊断效能)。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 脑良恶性肿瘤患者DCE-MRI、NMRS检查参数对比 脑恶性肿瘤组 K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e 、Cho/Cr、NAA/Cho、NAA/Cr小于脑良性肿瘤组,差异有统计学意义($P < 0.05$)。见图1~8、表1。



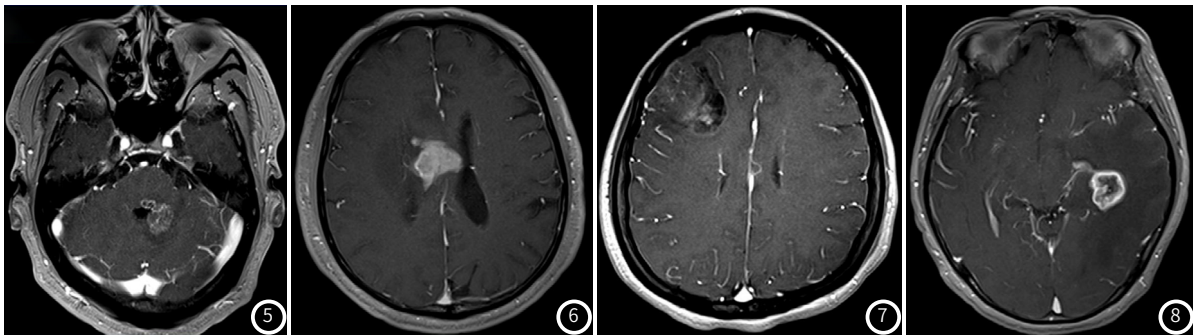


图1~2 NMRS显示部分区域可见高耸的乳酸及脂质代谢峰。
图3~4 NMRS显示部分区域可见Cho峰升高，NAA峰减低，亦可见宽大乳酸峰。
图5 DCE-MRI显示左侧桥脑及小脑病变呈显著不均匀强化，以花环状强化为主。
图6 DCE-MRI显示患者右侧半卵圆中心及胼胝体部见形态不规则显著强化，最大截面大小约41mm×16mm；右侧海马见斑片状可疑强化影，大小约6mm×8mm；右侧半卵圆中心见斑片状显著强化影，径约3mm。
图7 DCE-MRI显示患者右侧额叶占位内可见斑片状轻-中度强化影，病变边界欠清晰，大小约42mm×37mm×29mm，强化欠均匀，部分未见明确强化，病变内见多发强化的细小血管影，相邻脑膜亦未见明确强化征象；余脑实质及脑膜未见明确异常强化征象。
图8 DCE-MRI显示患者左侧额叶及右侧额叶团块及结节状异常强化影，左侧额叶为著，大小约22mm×20mm；脑膜未见明确异常强化征象。

表1 脑良恶性肿瘤患者DCE-MRI、NMRS检查参数对比

参数		脑良性肿瘤(n=44)	脑恶性肿瘤(n=76)	t/t'值	P值
DCE-MRI参数	$K^{trans}/(min)$	0.17 ± 0.08	0.21 ± 0.09	2.485	0.014
	K_{ep}	1.45 ± 0.32	1.61 ± 0.41	2.374	0.019
	$V_e/(min)$	0.39 ± 0.11	0.45 ± 0.14	2.752	0.007
NMRS参数	NAA/Cho	0.51 ± 0.18	0.38 ± 0.12	4.937	<0.001
	Cho/Cr	2.16 ± 0.35	2.42 ± 0.41	3.511	0.001
	NAA/Cr	1.01 ± 0.14	0.95 ± 0.12	2.774	0.006

2.2 DCE-MRI、NMRS检查参数对脑肿瘤良恶性的诊断价值 将脑肿瘤良恶性作为状态变量(“0”为脑良性肿瘤;“1”为脑恶性肿瘤),将DCE-MRI、NMRS检查参数作为检验变量,绘制ROC曲线,提示DCE-MRI参数(K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e)、NMRS检查参数(NAA/Cho、Cho/Cr、NAA/Cr)单独及联合诊断脑肿瘤良恶性的AUC值分别为0.622、0.624、0.648、0.732、0.696、0.635、0.855,DCE-MRI联合NMRS诊断脑肿瘤良恶性价值最高($P<0.05$)。见表2、图9。

2.3 不同分级脑胶质瘤患者的DCE-MRI、NMRS检查参数对比 胶质瘤III-IV级组 K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e 、Cho/Cr大于胶质瘤I-II级组,NAA/Cho、NAA/Cr小于胶质瘤I-II级组,差异有统计学意义($P<0.05$)。见表3。

2.4 DCE-MRI、NMRS检查参数与胶质瘤不同分级的相关性 点二列相关性分析显示,DCE-MRI、NMRS检查参数与胶质瘤不同分级间存在相关性($P<0.05$)。见表4。

表2 DCE-MRI、NMRS检查参数对脑肿瘤良恶性的诊断价值

参数	AUC	AUC的95%CI	P	cut-off值	敏感度	特异性	约登指数
K^{trans}	0.622	0.520~0.723	0.027	0.195/min	0.539	0.705	0.244
K_{ep}	0.624	0.524~0.723	0.024	1.555	0.553	0.682	0.235
V_e	0.648	0.547~0.748	0.007	0.405/min	0.658	0.591	0.249
NAA/Cho	0.732	0.631~0.833	<0.001	0.455	0.750	0.682	0.432
Cho/Cr	0.696	0.600~0.793	<0.001	2.345	0.618	0.727	0.345
NAA/Cr	0.635	0.529~0.742	0.014	0.995	0.658	0.545	0.203
联合诊断	0.855	0.783~0.927	<0.001	-	0.829	0.795	0.624

表3 不同分级脑胶质瘤患者的DCE-MRI、NMRS检查参数对比

参数		I-II级(n=31)	III-IV级(n=40)	t/t'值	P值
DCE-MRI参数	$K^{trans}/(min)$	0.13 ± 0.09	0.27 ± 0.11	5.816	<0.001
	K_{ep}	1.38 ± 0.35	1.89 ± 0.36	6.102	<0.001
	$V_e/(min)$	0.39 ± 0.12	0.50 ± 0.14	3.396	0.001
NMRS参数	NAA/Cho	0.47 ± 0.13	0.28 ± 0.10	6.596	<0.001
	Cho/Cr	2.21 ± 0.37	2.64 ± 0.38	4.687	<0.001
	NAA/Cr	1.01 ± 0.11	0.92 ± 0.11	3.411	0.001

表4 DCE-MRI、NMRS检查参数与胶质瘤不同分级的相关性

参数	r	P
DCE-MRI参数	$K^{trans}/(min)$	0.574
	K_{ep}	0.592
	$V_e/(min)$	0.378
NMRS参数	NAA/Cho	-0.622
	Cho/Cr	0.491
	NAA/Cr	-0.380

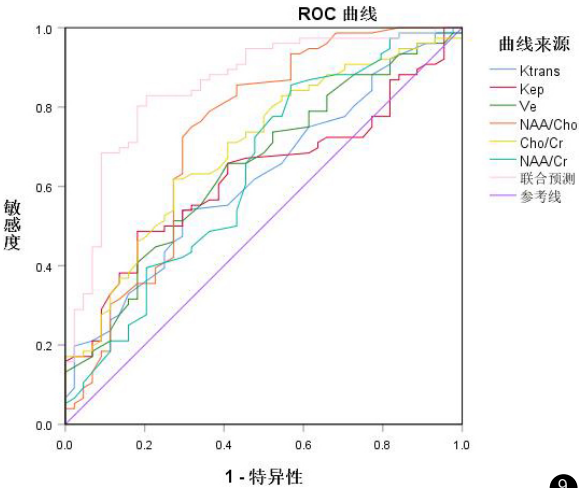


图9 DCE-MRI联合NMRS检查参数对脑肿瘤良恶性的诊断价值。

3 讨论

研究指出,相较于良性肿瘤,脑恶性肿瘤具有新生血管多和代谢速率快等生物学特点^[5]。因此,如何精确评估病灶内部血管生成和细胞代谢状态是鉴别诊断脑肿瘤良恶性的关键所在。DCE-MRI可动态评估肿瘤病灶内部血流灌注、毛细血管通透性等血管生成相关微循环病理特征^[6]。NMRS是一种检测活体脑内代谢和化学成分的非创性影像学技术^[7]。鉴于此,本研究探讨DCE-MRI联合NMRS在脑肿瘤诊断中的应用价值。

DCE-MRI通过注射对比剂改变病变组织与周围正常组织间的信号差与密度差,可在病变组织与正常组织间形成良好的对比度,帮助医师更好观察病变组织位置、包膜、边缘等信息。而脑恶性肿瘤在形态学方面存在差异。一般脑良性肿瘤形态规则、边界清晰且具有明显包膜;脑恶性肿瘤因生长速度快且侵袭能力强,所以具有边界模糊、无包膜、形态欠规则特点。由此可见,DCE-MRI可辅助医师从形态学层面对脑肿瘤良恶性进行鉴别诊断。

DCE-MRI在注射对比剂后,利用快速连续的MRI扫描观察对比剂在肿瘤血管内外及病灶组织间隙的分布和清除情况,并据此获取病灶组织血流动力学信息,并以 K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e 等参数量化显示。其中 K^{trans} 代表单位时间内从血管内转移到血管外的对比剂容积, K_{ep} 则代表对比剂从血管外向血管内回流的速率,两者可综合反映肿瘤病灶内部微血管渗透性和血流灌注情况^[8]。 V_e 则代表血管内体积分数,可反映病灶内部毛细血管密度,且与组织坏死程度呈正比,高 V_e 值可能提示肿瘤内部坏死或间质纤维化核查一下,是正比还是反比^[9-10]。当 K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e 升高,提示肿瘤病灶内部新生血管较多,毛细血管密度增大,组织渗透性高,血流灌注强,则脑恶性肿瘤可能性较高^[11-12]。但对于部分病灶直径较小的脑恶性肿瘤,其形态特征和内部微循环灌注等解剖结构和病理特征与良性肿瘤类似,因此,单独应用DCE-MRI诊断脑肿瘤良恶性具有一定局限性。

脑恶性肿瘤无论直径大小,均增殖速度较快,且为满足增殖所需生物合成需求,需从周围环境中不断摄入代谢有关营养物质。因此其相较于脑良性肿瘤,脑恶性肿瘤具有高合成代谢率的生物学特点。有研究指出,在相同的磁场环境下,处于不同代谢物质中的原子核在电磁波影响下可产生不同的共振频率^[13]。而NMRS便是利用此原理,通过检测脑组织中不同代谢物中原子核共振频率微小差异产生的化学位移,来区分不同代谢物质并检测其含量,如NAA、Cr、Cho等^[14-15]。其中NAA主要存在神经元和神经轴突中,是神经元功能完整性、密度及活性的标志,其值减少通常反映神经元数量减少或功能受损^[16]。Cr是脑组织能量代谢的提示物,在低代谢状态下增加,在高代谢状态下降低,但因其人体组织中含量相对稳定,所以增加或降低幅度通常较小^[17]。Cho可参与细胞膜转运、合并和蜕变,其值增加多提示肿瘤细胞密度增加^[18]。但NAA、Cr、Cho测量容易受磁场不均匀性、容积效应等因素影响而出现数据偏差,因此临床一般不单独观察上述指标,而是用NAA/Cho、Cho/Cr及NAA/Cr比值更为精准的评估细胞或组织代谢状况。脑恶性肿瘤增殖过程可侵犯患者脑神经元,导致NAA水平显著下降,且其增殖过程中的高代谢水平可导致Cho显著升高和Cr轻微下降,进而表现为NAA/Cho、NAA/Cr降低和Cho/Cr升高等特异性表现^[19]。由此可见,NMRS可通过检测上述肿瘤代谢物水平变化来辅助医师对脑肿瘤良恶性进行鉴别诊断。但NMRS在肿瘤形态学检测方面效能欠佳,因此无法单独应用于脑肿瘤诊断中。而DCE-MRI、NMRS联合应用可实现优势互补,增加对脑肿瘤良恶性鉴别诊断的价值。正如本研究结果中,相较于DCE-MRI、NMRS检查参数单独诊断,DCE-MRI联合NMRS诊断价值最高,证实上述结论。

胶质瘤作为最常见脑恶性肿瘤,准确诊断其分级对于临床诊疗决策制定和预后提前评估等具有重要意义。而从本研究结果中发现,不同分级的胶质瘤患者DCE-MRI、NMRS参数存在统计学差异,提示可通过DCE-MRI联合NMRS除了可以鉴别脑肿瘤良恶性,还可为脑恶性肿瘤分级诊断提供支持。推测原因可能为:随着胶质瘤恶性程度的提高,病灶内新生血管越多,肿瘤细胞代谢

速率越快,进而促使 K^{trans} 、 K_{ep} 、NAA/Cho、Cho/Cr等出现差异化变化^[20-21]。

综上所述,DCE-MRI与NMRS联合应用,不仅可辅助医师进行脑肿瘤良恶性鉴别诊断,还可帮助医师明确胶质瘤恶性分级情况,具有较好的临床应用价值。本研究存在一定局限性,如样本量相对有限、未考虑其他潜在影响因素等。未来研究将进一步扩大样本量,并考虑更多影响因素,以验证本研究的结论。

参考文献

- [1] Behnam M, Motamedzadeh A, Aalinezhad M, et al. The role of aquaporin 4 in brain tumors: implications for pathophysiology, diagnosis and therapy [J]. *Mol Biol Rep*, 2022, 49 (11): 10609-10615.
- [2] Borja AJ, Saini J, Raynor WY, et al. Role of molecular imaging with PET/MR imaging in the diagnosis and management of brain tumors [J]. *PET Clin*, 2022, 17 (3): 431-451.
- [3] Scola E, Del Vecchio G, Busto G, et al. Conventional and advanced magnetic resonance imaging assessment of non-enhancing peritumoral area in brain tumor [J]. *Cancers (Basel)*, 2023, 15 (11): 2992.
- [4] Louis DN, Perry A, Reifenberger G, et al. The 2016 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary [J]. *Acta Neuropathol*, 2016, 131 (6): 803-820.
- [5] 王涛, 徐勇, 阳波, 等. 磁共振DWI联合MRS在诊断脑肿瘤中的临床价值 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2021, 19 (6): 21-25.
- [6] 汪洁, 包磊, 胡月, 等. 动态对比增强磁共振成像影像组学评估胶质瘤异柠檬酸脱氢酶1突变与微血管生成 [J]. *放射学实践*, 2023, 38 (6): 685-692.
- [7] 古兰白尔·买买提, 古力吉热·太来提, 巴图尔·吐尔地, 等. 动态对比增强磁共振成像技术在脑胶质瘤诊断中的应用及对微血管的评估价值分析 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21 (8): 23-25.
- [8] Li SH, Shen NX, Wu D, et al. A comparative study between tumor blood vessels and dynamic contrast-enhanced MRI for identifying isocitrate dehydrogenase gene 1 (IDH1) mutation status in glioma [J]. *Curr Med Sci*, 2022, 42 (3): 650-657.
- [9] Zheng H, Jian L, Li L, et al. Delta-radiomics based on dynamic contrast-enhanced MRI for predicting lymphovascular invasion in invasive breast cancer [J]. *Acad Radiol*, 2024, 31 (5): 1762-1772.
- [10] Bressler I, Ben Bashat D, Buchsweiler Y, et al. Model-free dynamic contrast-enhanced MRI analysis: differentiation between active tumor and necrotic tissue in patients with glioblastoma [J]. *MAGMA*, 2023, 36 (1): 33-42.
- [11] Wang Z, Wang B, Li Z, et al. The consistence of dynamic contrast-enhanced MRI and filter-exchange imaging in measuring water exchange across the blood-brain barrier in high-grade glioma [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2023, 58 (6): 1850-1860.
- [12] Woodall RT, Sahoo P, Cui Y, et al. Repeatability of tumor perfusion kinetics from dynamic contrast-enhanced MRI in glioblastoma [J]. *Neurooncol Adv*, 2021, 3 (1): 174.
- [13] 李光, 张金凤, 陈飞, 等. 磁共振MRS技术在颅脑肿瘤鉴别诊断中的临床应用分析 [J]. *实用癌症杂志*, 2021, 36 (9): 1533-1535.
- [14] 李珮, 冷琦, 夏春潮, 等. 优化扫描矩阵对脑肿瘤患者头部多元素氢质子磁共振波谱成像的临床应用价值 [J]. *中国医疗设备*, 2021, 36 (10): 56-58, 74.
- [15] 刘璟仪, 石莹, 田园, 等. (1)H-MRS在脑胶质瘤诊断中的研究进展 [J]. *现代肿瘤医学*, 2024, 32 (4): 782-786.
- [16] Lemarié A, Lubrano V, Delmas C, et al. The STEMRI trial: magnetic resonance spectroscopy imaging can define tumor areas enriched in glioblastoma stem-like cells [J]. *Sci Adv*, 2023, 9 (44): eadi0114.
- [17] 庞瑜丹, 张伟, 胡喆. 磁共振波谱成像检查对脑胶质瘤的诊断价值 [J]. *癌症进展*, 2022, 20 (24): 2527-2529.
- [18] Taglang C, Batsios G, Mukherjee J, et al. Deuterium magnetic resonance spectroscopy enables noninvasive metabolic imaging of tumor burden and response to therapy in low-grade gliomas [J]. *Neuro Oncol*, 2022, 24 (7): 1101-1112.
- [19] Iwahashi H, Nagashima H, Tanaka K, et al. 2-Hydroxyglutarate magnetic resonance spectroscopy in adult brainstem glioma [J]. *J Neurosurg*, 2023, 139 (2): 355-362.
- [20] 陈鹏, 康厚艺, 张乐天, 等. 磁共振动态对比增强不同后处理模型在脑胶质瘤分级中的应用 [J]. *第三军医大学学报*, 2021, 43 (23): 2577-2583.
- [21] 张利琴, 刘明, 曹兵. 氢质子磁共振波谱在脑胶质瘤分级中的应用价值 [J]. *实用心脑血管病杂志*, 2022, 30 (6): 94-97.

(收稿日期: 2025-04-30)

(校对编辑: 赵望淇、姚丽娜)