

论 著

常规及功能磁共振成像对预测脑胶质瘤IDH分型的价值研究

朱晓云^{1,3} 邹文涛^{2,3} 游丁燕^{3,4}
沈龙山^{1,3,*}

- 1.蚌埠医科大学第二附属医院放射科
(安徽 蚌埠 233040)
2.蚌埠医科大学第一附属医院放射科
(安徽 蚌埠 233099)
3.蚌埠医科大学医学影像学院
(安徽 蚌埠 233030)
4.漳州市第三医院 (福建 漳州 363000)

【摘要】目的 通过分析胶质瘤患者的术前常规MRI及功能磁共振成像影像，评估磁共振成像对预测IDH分型的应用价值。方法 回顾性研究经病理诊断为胶质瘤的患者70例；利用3D-Slicer软件对平扫及增强图像进行后处理，获得肿瘤体积、肿瘤实质部分体积、囊变坏死体积、瘤周水肿体积及肿瘤最大层面表面积等信息；同时对DWI及MRS图像进行后处理，测量感兴趣区的ADC值及NAA、CHO、CR等代谢物的浓度值，比较不同IDH状态下脑胶质瘤的影像学特征差异并评估各参数的诊断效能。结果 IDH野生型胶质瘤患者的年龄、肿瘤体积、肿瘤实质部分体积及瘤周水肿体积均较大、强化程度较高，ADCmin、ADCave值及NAA/CR值低，CHO/NAA值高。在II~III级胶质瘤中，IDH野生型患者的肿瘤体积、囊变坏死体积均较大，ADCmin、ADCave值及NAA/CR值低。结论 常规及功能MRI能够预测胶质瘤患者的IDH分型，特别是在预测低级别胶质瘤的IDH分型方面具有重要诊断意义，能够早于病理，辅助临床制定治疗方案。

【关键词】胶质瘤；IDH突变；功能磁共振成像；
【中图分类号】R739.41；R445.2
【文献标识码】A
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.04.008

The Value of Conventional and Functional Magnetic Resonance Imaging in Predicting IDH Genotyping in Gliomas

ZHU Xiao-yun^{1,3}, ZOU Wen-tao^{2,3}, YOU Ding-yan^{3,4}, SHEN Long-shan^{1,3,*}.
1.Department of Radiology, The Second Affiliated Hospital of Bengbu Medical University, Bengbu 233040, Anhui Province, China
2.Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Bengbu Medical University, Bengbu 233099, Anhui Province, China
3.School of Medical Imaging, Bengbu Medical University, Bengbu 233030, Anhui Province, China
4.The Third Hospital of Zhangzhou, Zhangzhou 363000, Fujian Province, China

ABSTRACT
Objective Evaluate the application value of magnetic resonance imaging in predicting IDH classification by analyzing preoperative routine MRI and functional magnetic resonance imaging images of glioma patients. *Methods* Retrospective study of 70 patients diagnosed with glioma through pathological examination; Using 3D Slicer software to post-process plain and enhanced images, obtain information such as tumor volume, tumor parenchymal volume, cystic necrosis volume, peritumoral edema volume, and maximum tumor surface area; Simultaneously, post-processing was performed on DWI and MRS images to measure the ADC values and concentrations of metabolites such as NAA, CHO, and CR in the region of interest. The imaging characteristics of gliomas under different IDH states were compared, and the diagnostic efficacy of each parameter was evaluated. *Results* The age, tumor volume, tumor parenchymal volume, and peritumoral edema volume of IDH wild-type glioma patients are relatively large and have a high degree of enhancement. The ADCmin, ADCave, and NAA/CR values are low, while the CHO/NAA values are high. In grade II-III gliomas, IDH wild-type patients have larger tumor volume and cystic necrosis volume, but lower ADCmin, ADCave values, and NAA/CR values. *Conclusion* Conventional and functional MRI can predict the IDH subtypes of glioma patients, especially in predicting the IDH subtypes of lower grade gliomas, which has important diagnostic significance and can be used earlier than pathology to assist clinical treatment planning.
Keywords: Glioma; IDH mutation; Functional Magnetic Resonance Imaging

胶质瘤是最常见的颅内原发性恶性肿瘤，具有预后差、易复发的特点，根据其恶性程度分为四个等级^[1]，I级和II级为低级别胶质瘤(low-grade glioma, LGG)、III级和IV级为高级别胶质瘤(high-grade glioma, HGG)；其中II级和III级胶质瘤又被称为较低级别胶质瘤(lower-grade glioma, LrGG)^[2]。胶质瘤发病原因主要与遗传、环境刺激等因素有关，常见的临床症状包括恶心呕吐、头痛、癫痫、视物模糊等。2016年(World Health Organization, WHO)中枢神经系统肿瘤分类标准中首次增加了基于分子的肿瘤诊断概念，提出利用基因分型制定更精准的治疗方案在临床治疗上具有重要意义^[3]。由于基因检测的周期较长，早期结合影像学特征预测肿瘤基因分型逐渐成为研究热点。
2021年WHO发布的第五版中枢神经系统肿瘤分类，更加强调了基因分型在胶质瘤患者病程中的重要性^[4]；目前研究较多的是IDH基因分型，异柠檬酸脱氢酶(isocitrate dehydrogenase, IDH)能够促进细胞内能量合成，IDH突变能够将α-酮戊二酸转化为2-羟基戊二酸(D-2-HG)，D-2-HG可竞争性地抑制α-酮戊二酸依赖性的双加氧酶，并抑制细胞分化^[5]，使细胞能量代谢减少，肿瘤细胞增殖速度较慢^[6]，相较于IDH野生型预后较好，生存期较长。多项研究发现在较低级别胶质瘤患者中，IDH突变型占70%-80%；而在IV级胶质细胞瘤中，IDH突变型占比不超过10%^[7]；因此，本文不仅将患者分为IDH野生型组与突变型组，还根据WHO分级，将患者分为LrGG组和IV级胶质瘤组，探讨不同分级下IDH突变状态的影像学特征。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性研究经病理诊断为胶质瘤的患者70例；根据IDH突变状态分为IDH突变型组(36例)、IDH野生型组(34例)，并根据术后肿瘤分级分为LrGG组及IV级胶质瘤组，其中LrGG组患者34例，包括IDH突变型胶质瘤 24例、IDH野生型10例；IV级胶质瘤36例，包括IDH突变型12例、IDH野生型24例；术前均行头颅常规MRI、增强扫描、DWI及MRS检查，术后均行免疫组化检查。
纳入标准：手术病理结果证实为胶质瘤，且有明确免疫组化IDH1基因突变状态诊断结果的II~IV级胶质瘤患者；有完整的术前MRI影像资料和临床病历资料；MRI检查前未进行任何形式的治疗；MRI检查后2周内接受手术。排除标准：合并其他脑肿瘤或脑肿瘤手术史；病理诊断为胶质瘤I级的患者；MRI检查前已行放化疗治疗；MRI图像质量不佳，临床及影像学资料不全。
1.2 方法

【第一作者】朱晓云，女，住院医师，主要研究方向：影像诊断。E-mail: 1425397929@qq.com
【通讯作者】沈龙山，男，主任医师，主要研究方向：影像诊断。E-mail: trede@163.com

1.2.1 MRI检查 本研究所有患者均使用 3.0T Philips MR磁共振设备,行头颅MRI平扫、增强、DWI及 MRS 检查。扫描参数如下: T1WI: TR2000ms, TE20ms, T2WI: TR3000ms, TE80ms; T2-FLAIR: TR8000ms, TE120ms; DWI: b值0/1000s/mm², TR2900 ms, TE 84 ms; FOV 230mm×185mm, 层厚=5mm, 层间距=1mm。增强扫描分别扫描轴位、矢状位和冠状位,扫描前经肘前静脉注射钆喷酸葡胺对比剂。¹H-MRS检查采用点分辨波谱技术,扫描参数有: TR2000ms, TE144ms, FOV 200mm×162mm, 体素大小为 10mm×10mm×10mm, 感兴趣区的选取范围应根据病变的大小进行调整。

1.2.2 病理学检查 将术后肿瘤标本进行HE染色,根据WHO胶质瘤分类对切片进行分级。并用IDH1 R132H突变型抗体检测IDH1突变状态,诊断为突变型或野生型。

1.3 图像后处理

1.3.1 平扫及增强影像特征分析 本研究参照伦勃朗视觉感受图像(visually accesible rembrandt images,VASARI)特征^[8]提取6个影像学特征,包括:肿瘤体积,肿瘤实质部分体积,囊变坏死体积,瘤周水肿体积,肿瘤最大层面直径(<4.5cm),肿瘤强化程度等,具体操作如下,见图1。

将患者平扫及增强检查上传至3D-Slicer软件,图像经配准后,由两名具有6年以上工作经验的影像科医师根据上述影像特征,对感兴趣区逐层勾画,利用Segment Editor模块对感兴趣区进行半自动化分割后,利用Quantification-Segment Statistics模块自动生成肿瘤体积、实质部分体积、囊变坏死体积及瘤周水肿体积等数据;勾画观点不一致时,由第三者参与协商解决。

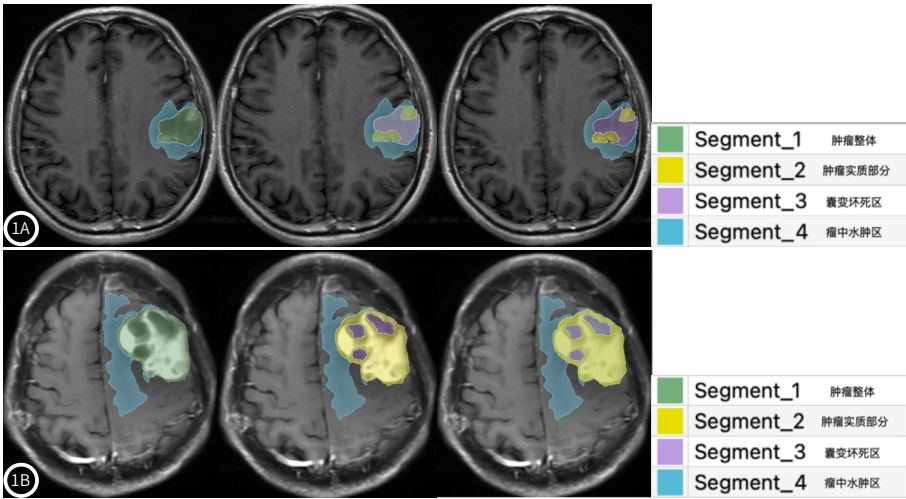


图1A-图1B 病例1A:男,74岁,左额叶肿瘤,经病理证实为弥漫型星形细胞瘤(WHO II级),IDH1突变型。病例1B:男,60岁,左额叶肿瘤,经病理证实为胶质母细胞瘤(WHO IV级),IDH1野生型。图中绿色区域表示肿瘤整体部分,为T1WI增强图像上的异常信号区;黄色区域表示肿瘤实质部分,为T1WI增强后的强化区域;紫色区域表示肿瘤的囊变坏死区,为T1WI增强图像上的未强化区;蓝色区域表示瘤周水肿区,为T2-flair上肿瘤周围的高信号区。

1.3.2 功能磁共振后处理 将原始数据导入Philips后处理工作站,对患者DWI图像进行后处理生成ADC图,并在ADC图上勾画感兴趣区(region of interest, ROI),ROI大小为10-15mm²,避开出血及囊变坏死,测量肿瘤实质区的ADC(ADCmin、ADCmax及ADCmean)值,每个病例选定3个RIO,取其平均值;参照上述方法,对MRS图像进行后处理,在波谱图上选定感兴趣区,测定N-乙酰天门冬氨酸(N-acetylaspartate, NAA),胆碱(choline, CHO)和肌酸(creatine, CR)值,并计算NAA/CR、CHO/CR和CHO/NAA的相对比值。

1.4 数据分析 采用SPSS 26.0软件进行数据分析,对于计量资料用均数±标准差表示,组间比较采用独立样本t检验,计数资料的比较采用卡方检验,比较不同级别脑胶质瘤的上述各指标的差异, P<0.05表示差异具有统计学意义。利用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC),评估上述各指

标在预测脑胶质瘤IDH分型中的价值。

2 结果

2.1 临床资料分析 纳入本研究的70例胶质瘤患者中,男性40例,女性30例;其中IDH突变型与野生型胶质瘤患者的平均年龄分别为(49.59±10.72岁, 55.91±11.38岁), P=0.043,提示IDH突变型较野生型患者年龄小。

根据胶质瘤分级继续将患者分为较低级别胶质瘤及IV级胶质瘤,其中LrGG患者34例,男性17例,女性17例, IDH突变型与野生型胶质瘤患者的平均年龄分别为(48.63±9.91岁, 45.90±19.26岁), P=0.545; IV级胶质瘤36例,男性23例,女性13例, IDH突变型与野生型患者的平均年龄分别为(53.36±12.62岁, 56.64±12.31岁), P=0.184;差异均无统计学意义(P>0.05)。见表1。

表1 基本资料

分组	IDH突变状态	例数	性别		平均年龄(岁)	t/ x ² 值	P值
			男	女			
胶质瘤患者	IDH+	36	19(52.8%)	17(47.2%)	49.59±10.72	-2.076	0.043
	IDH-	34	21(61.8%)	13(38.2%)	55.91±11.38		
LrGG	IDH+	24	10(41.7%)	14(58.3%)	48.63±9.912	23.564	0.545
	IDH-	10	7(70%)	3(30%)	45.9±19.261		
IV级	IDH+	12	9(75%)	3(25%)	53.36±12.62	27.75	0.184
	IDH-	24	14(58.3%)	10(41.7%)	56.64±12.319		

2.2 常规MRI影像学特征分析 根据提取的上述影像学特征，对不同分级及IDH状态的胶质瘤进行分析。结果显示：

(1)在70例胶质瘤患者中，IDH突变型与野生型患者在肿瘤体积、肿瘤实质部分体积、瘤周水肿体积及强化程度方面的差异显著，IDH突变型及野生型患者的肿瘤体积分别为(44.81±23.91cm³，63.19±28.94cm³)，P=0.015；肿瘤实质部分体积分别为(35.27±19.34cm³，48.48±19.36cm³)，P=0.018；瘤周水肿体积分别为(53.03±50.42cm³，80.64±48.23cm³)，P=0.05；患者肿瘤明显强化的例数分别为(15例，24例)，P=0.02；表明相较于IDH突变型患者，IDH野生型患者的肿瘤体积、肿瘤实质部分体积及瘤周水肿体积均较大、强化程度高。

(2)在34例较低级别胶质瘤患者中，IDH突变型与野生型患者肿瘤体积及囊变坏死体积的差异具有统计学意义，IDH突变型及野生型患者肿瘤体积分别为(42.38±24.98 cm³，72.67±29.13cm³)，P=0.013；囊变坏死体积分别为(9.14±10.50 cm³，24.63±21.54cm³)，P=0.017；提示在LrGG患者中，IDH突变型患者的肿瘤体积及囊变坏死体积均较小。IDH野生型患者的肿瘤实质部分体积及瘤周水肿体积均较大，但差异不显著。

(3)在36例IV级胶质瘤患者中，IDH野生型患者的肿瘤体积、肿瘤实质部分体积及瘤周水肿体积均较大，但差异较小，不具有统计学意义。见表2。

2.3 DWI及MRS影像学特征分析 对患者的DWI及MRS图像进行后处理，分析测得ROI区的ADC值(ADCmin、ADCmax及ADCave值)、代谢物(NAA/CR、CHO/CR及CHO/NAA)比值，结果显示：

在70例患者中，IDH野生型组患者的ADCmin、ADCave值及NAA/CR值低于突变型组，CHO/NAA值高于突变型组。在LrGG患者中，IDH野生型患者的ADCmin、ADCave值及NAA/CR值低于突变者组。在IV级胶质瘤患者中，IDH野生型患者的NAA/CR值较突变型低。见表3。

2.4 ROC曲线分析 根据上述影像学特征，对有统计学差异的指标绘制ROC曲线，分析各指标对预测IDH分型的准确性，结果显示：70例不同IDH分型胶质瘤患者常规影像学特征、DWI及MRS各参数的AUC值分别为：0.678、0.685、0.714、0.562、0.775、0.695、0.724、0.799，CHO/NAA对IDH分型具有较高的诊断效能；LrGG患者中IDH野生型及突变型胶质瘤患者各参数的AUC值分别为0.773、0.812、0.788、0.744、0.711，其中囊变坏死体积对LrGG患者IDH分型的诊断效能最高。

表2 常规MRI影像特征分析

参数	胶质瘤		t/ x ² 值 P值		LrGG		t/ x ² 值 P值		IV级胶质瘤		t/ x ² 值 P值	
	IDH+	IDH-			IDH+	IDH-			IDH+	IDH-		
肿瘤体积(cm ³)	44.81±23.91	63.19±28.94	-2.507	0.015	42.38±24.98	72.67±29.13	-2.669	0.013	48.4±20.97	59.05±28.79	-0.877	0.39
肿瘤实质部分体积(cm ³)	35.27±19.34	48.48±19.36	-2.452	0.018	33.24±20.31	48.03±17.83	-1.715	0.098	37.04±14.07	48.67±20.56	-1.356	0.189
囊变坏死体积(cm ³)	9.54±10.47	15.10±17.24	-1.437	0.157	9.14±10.50	24.63±21.54	-2.562	0.017	11.39±11.68	10.93±13.76	0.075	0.941
瘤周水肿体积(cm ³)	53.03±50.42	80.64±48.23	-1.998	0.050	39.78±34.50	49.08±35.72	-0.612	0.546	67.94±44.54	94.44±47.26	-1.258	0.222
肿瘤最大层面直径(<4.5cm)	22例(61.1%)	20例(58.8%)	0.193	0.848	17例(70.8%)	7例(70%)	0.047	0.963	5例(41.7%)	13例(54.2%)	-0.629	0.494
(>4.5cm)	14例(38.9%)	14例(41.2%)			7例(29.2%)	3例(30%)			7例(58.3%)	11例(45.8%)		
强化程度			-2.384	0.020			-1.181	0.246			0.745	0.462
无强化	8例(22.2%)	4例(11.8%)			8例(33.3%)	3例(30%)			0	1例(4.2%)		
轻度强化	13例(36.1%)	6例(17.6%)			12例(50%)	3例(30%)			1例(8.3%)	3例(12.5%)		
明显强化	15例(41.7%)	24例(70.6%)			4例(16.7%)	4例(40%)			11例(91.7%)	20例(83.3%)		

表3 DWI及MRS影像特征分析

参数	胶质瘤		t/ x ² 值 P值		LrGG		t/ x ² 值 P值		IV级胶质瘤		t/ x ² 值 P值	
	IDH+	IDH-			IDH+	IDH-			IDH+	IDH-		
ADCmin	1.244	0.925	3.143	0.003	1.337	1.044	2.36	0.031	1.058	0.852	1.269	0.222
(×10 ⁻³ mm ² /s)	(0.68,1.96)	(0.62,1.35)			(0.99,1.87)	(0.65,1.35)			(0.68,1.96)	(0.62,1.12)		
ADCmax	1.493	1.346	0.929	0.359	1.570	1.346	1.81	0.089	1.340	1.346	-0.019	0.985
(×10 ⁻³ mm ² /s)	(0.86,2.45)	(0.71,1.58)			(1.22,1.98)	(0.71,1.58)			(0.86,2.45)	(1.00,1.41)		
ADCave	1.362	1.101	2.383	0.023	1.196	1.042	2.212	0.042	1.196	1.042	0.761	0.458
(×10 ⁻³ mm ² /s)	(0.76,2.21)	(0.68,1.43)			(1.11,1.87)	(0.68,1.43)			(0.76,2.21)	(0.75,1.27)		
NAA/CR	1.199	0.737	2.402	0.025	0.971	0.576	2.331	0.050	1.530	0.896	2.920	0.014
	(0.35,2.30)	(0.18,1.93)			(0.35,1.72)	(0.18,1.08)			(0.68,2.30)	(0.58,1.93)		
CHO/CR	1.994	2.636	-1.136	0.268	1.539	2.201	-1.497	0.153	3.126	2.823	0.308	0.764
	(1.09,4.57)	(0.96,6.91)			(1.09,3.11)	(0.96,2.89)			(1.65,4.57)	(1.08,6.91)		
CHO/NAA	1.966	5.284	-2.086	0.048	1.596	11.103	-2.054	0.056	2.176	3.101	-1.025	0.327
	(0.69,4.62)	(1.80,21.59)			(0.69,4.62)	(2.08,21.59)			(0.91,3.07)	(1.80,7.41)		

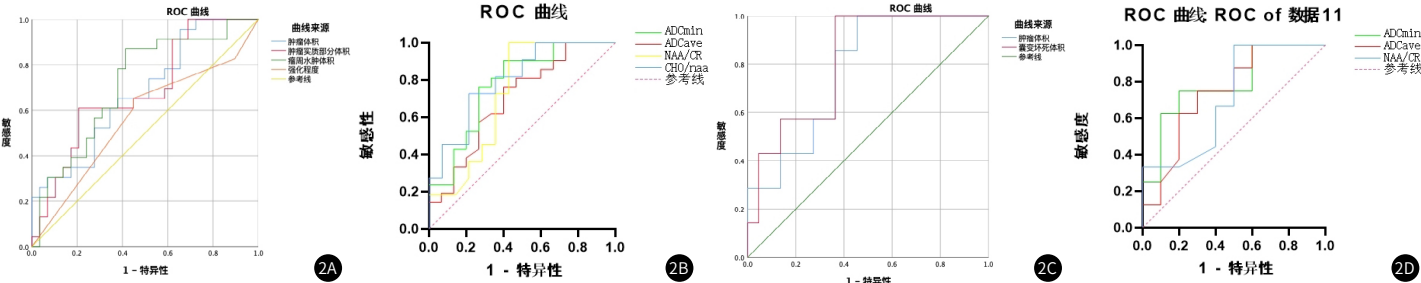


图2A-图2D 各参数的ROC曲线。2A-2B: 常规影像特征、DWI及MRS鉴别70例胶质瘤患者IDH分型的ROC曲线；2C-2D: 常规影像特征、DWI及MRS鉴别LrGG患者IDH分型的ROC曲线。

3 讨 论

胶质瘤是最常见的颅内原发性恶性肿瘤^[9]，致死率及致残率均较高。近年来，在病理分级的基础上，基因分型诊断逐渐成为胶质瘤研究的重点，分子分型对提供精准治疗方案及预测预后具有重要意义^[10]。

本研究通过研究70例胶质瘤患者的常规及增强MR检查发现，相较于IDH突变型患者，野生型患者的年龄、肿瘤体积、肿瘤实质部分体积及瘤周水肿体积均较大，强化程度较高。在LrGG患者中，IDH突变型患者的肿瘤体积及囊变坏死体积均较小；IDH能够促进能量合成，当IDH发生突变时，可使能量供应及微血管生成相对减少，细胞增殖受抑制^[11]，这与IDH突变型患者的肿瘤体积及囊变坏死体积较小相一致。肿瘤细胞对临近脑组织的浸润，所产生的细胞毒性水肿及肿瘤的占位效应导致瘤周水肿带的出现^[12]，IDH突变型患者的肿瘤生长速度慢、占位效应小，且肿瘤细胞对临近脑组织的浸润范围较小，这与瘤周水肿体积较小相一致。

联合DWI及MRS检查发现，在70例患者中，IDH野生型患者的ADCmin、ADCave值及NAA/CR值均较低，CHO/NAA值较高；在LrGG患者中，IDH野生型患者的ADCmin、ADCave值及NAA/CR值较低；在IV级胶质瘤患者中，IDH野生型患者的NAA/CR值较低。MRS能够定量反映组织微结构内的代谢物浓度，NAA/CR、CHO/CR及CHO/NAA值常被用来评估患者神经元的受损程度及代谢程度^[13-15]。本研究中IDH野生型患者NAA/CR值均较低，这与野生型患者肿瘤生长速度快、代谢旺盛，微血管生成较为密集，神经元破坏严重相符。本研究结果显示IDH野生型患者ADCmin及ADCave值较低，这与以往的研究结果相符^[16]，ADC值作为反映DWI的定量指标，能够反映组织内的游离水分子运动扩散速率^[17]，多项研究表明，ADC值与肿瘤的分级与预后呈负相关^[18]，ADC值越小细胞排列越紧密，提示肿瘤恶性程度越高，预后越差^[19]。

本研究还发现，不同分组下影像学特征分析的结果有差异。先对肿瘤分级后，再进行基因分型，结果更具有可靠性。本研究结果显示：在70例患者中，不同IDH分型患者的发病年龄、肿瘤实质部分体积、瘤周水肿体积、强化程度及CHO/NAA值等方面均有显著差异，而继续将患者细分为LrGG及IV级胶质瘤后，患者这些方面的差异均不显著；其原因可能是因为在LrGG患者中，IDH突变型比例高^[11,20]；而在IV级胶质瘤中IDH突变型比例低，直接根据IDH分型进行分组，则IDH野生型组中患者的整体分级较高，患者发病年龄、肿瘤体积及瘤周水肿体积均较大，强化程度也较高；同时高级别胶质瘤的恶性程度也较高，ADC值较低、CHO/NAA值较高。根据胶质瘤的分级及分型进行分组后发现，在IV级胶质细胞瘤中，不同IDH分型的患者仅在NAA/CR值方面的差异具有统计学意义，这可能是由于IV级胶质瘤本身恶性程度比较高，并且即使在IDH突变型患者中，IDH突变的比例也较低（一般为少部分突变），而LrGG患者的IDH突变多为大部分突变。

综上所述，常规及功能MRI在预测胶质瘤IDH分型，特别是预测较低级别胶质瘤IDH分型上具有重要诊断意义^[21-22]。在日常工作中，根据病人的临床特点及MRI表现，在排除I级及IV级胶质瘤后，MRI有助于诊断LrGG患者的IDH分型，肿瘤体积及囊变坏死体积较小者多提示为突变型。其次，目前研究中多以IDH突变型及野生型进行分组，较少考虑胶质瘤的分级，本研究结果显示，在胶质瘤分级的基础上研究IDH分型的诊断更具有准确性。

本研究的不足之处在于样本量较小，未能将胶质瘤病例继续细分为II级胶质瘤与III级胶质瘤组；其次，本文主要研究的检查方法主要包括常规MRI、DWI及MRS检查等较为成熟的检查方法，计划以后的研究中将收集更多病例，并加入PWI、APT及DKI等新技术研究，探讨不同分级下IDH分型的影像学特征差异。

参考文献

- [1] Gritsch S, Batchelor TT, Gonzalez Castro LN. Diagnostic, therapeutic, and prognostic implications of the 2021 World Health Organization classification of tumors of the central nervous system[J]. *Cancer*, 2022, 128: 47-58.
- [2] Liu X, Li YM, Qian ZH, et al. A radiomic signature as a non-invasive predictor of progression-free survival in patients with lower-grade gliomas[J]. *Neuroimage Clin*, 2018, 20: 1070-1077.
- [3] Karaman MM, Zhang JX, Xie KL, et al. Quartile histogram assessment of glioma malignancy using high b-value diffusion MRI with a continuous-time random-walk model[J]. *NMR Biomed*, 2021, 34: e4485.
- [4] Yang KY, Wu ZJ, Zhang H, et al. Glioma targeted therapy: insight into future of molecular approaches[J]. *Mol Cancer*, 2022, 21: 39.
- [5] Pavlova NN, Zhu JJ, Thompson CB. The hallmarks of cancer metabolism: Still emerging[J]. *Cell Metab*, 2022, 34: 355-377.
- [6] 何金龙, 高阳, 吴琼, 等. 多序列影像组学结合临床及影像学特征预测脑胶质瘤IDH1基因突变[J]. *磁共振成像*, 2023, 14(08): 27-33, 134.
- [7] Wang LB, Karpova A, Gritsenko MA, et al. Proteogenomic and metabolomic characterization of human glioblastoma[J]. *Cancer Cell*, 2021, 39: 509-528. e20.
- [8] Rios VE, Meier R, Dunn WD, et al. Fully automatic GBM segmentation in the TCGA-GBM dataset: Prognosis and correlation with VASARI features[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 16822.
- [9] 王伟, 沈龙山, 程雯, 等. 基于常规MRI的影像学特征联合MRS在脑胶质瘤术前分级评估及预测术后复发的应用研究[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(7): 15-18.
- [10] Choi YS, Bae S, Chang JH, et al. Fully automated hybrid approach to predict the IDH mutation status of gliomas via deep learning and radiomics[J]. *Neuro Oncol*, 2021, 23: 304-313.
- [11] Kurokawa R, Kurokawa M, Baba A, et al. Major changes in 2021 World Health Organization classification of central nervous system tumors[J]. *Radiographics*, 2022, 42: 1474-1493.
- [12] Qin XP, Liu R, Akter F, et al. Peri-tumoral brain edema associated with glioblastoma correlates with tumor recurrence[J]. *J Cancer*, 2021, 12: 2073-2082.
- [13] Bumke E, Fellner C, Fellner FA, et al. Validation study for non-invasive Prediction of IDH mutation status in patients with glioma using in vivo ¹H-magnetic resonance spectroscopy and machine learning[J]. *Cancers (Basel)*, 2022, 14(11): 2762.
- [14] Lin K, Cidan WJ, Qi Y, et al. Glioma grading prediction using multiparametric magnetic resonance imaging-based radiomics combined with proton magnetic resonance spectroscopy and diffusion tensor imaging[J]. *Med Phys*, 2022, 49: 4419-4429.
- [15] 徐彤彤, 王贝茹, 赵海珊, 等. 磁共振DWI评估脑胶质瘤预后及其与肿瘤细胞 Ki-67表达及IDH1基因型的相关性[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(10): 5-7.
- [16] 孟令松, 黄梦月, 张小安, 等. DWI与¹H-MRS预测胶质瘤基因分型的价值[J]. *临床放射学杂志*, 2023, 42(2): 210-215.
- [17] Maynard J, Okuchi S, Wastling S, et al. World Health Organization grade II/III glioma molecular status: prediction by mri morphologic features and apparent diffusion coefficient[J]. *Radiology*, 2021, 298: E61.
- [18] van den Elshout R, Scheenen TWJ, Driessen CML, et al. Diffusion imaging could aid to differentiate between glioma progression and treatment-related abnormalities: a meta-analysis[J]. *Insights Imaging*, 2022, 13: 158.
- [19] 邓凯吉, 郑晴予, 范淑萍, 等. ADC三维直方图分析对胶质瘤IDH1基因突变的预测研究[J]. *临床放射学杂志*, 2021, 40: 864-869.
- [20] Manikis GC, Ioannidis GS, Siakallis L, et al. Multicenter DSC-MRI-based radiomics predict idh mutation in gliomas[J]. *Cancers (Basel)*, 2021, 13(16): 3965.
- [21] Yang XF, Lin Y, Xing Z, et al. Predicting 1p/19q codeletion status using diffusion-, susceptibility-, perfusion-weighted, and conventional MRI in IDH-mutant lower-grade gliomas[J]. *Acta Radiol*, 2021, 62: 1657-1665.
- [22] Feraco P, Franciosi R, Picori L, et al. Conventional MRI-derived biomarkers of adult-type diffuse glioma molecular subtypes: a comprehensive review[J]. *Biomedicines*, 2022, 10(10): 2490.

(收稿日期: 2023-04-25)

(校对编辑: 姚丽娜)