

·临床研究·

## 磁共振弹性成像在常见颅内肿瘤质地评估中的应用

林京怡<sup>1</sup>, 赵静<sup>1</sup>, 胡天宇<sup>2</sup>, 胡曼诗<sup>1</sup>, 刘敏芬<sup>1</sup>, 谢定祥<sup>1</sup>

(1. 中山大学附属第一医院放射科, 广东广州510080; 2. 中山大学附属第一医院神经外科, 广东广州510080)

**摘要:**【目的】探讨磁共振弹性成像(MRE)在评估常见颅内肿瘤质地方面的临床应用价值。【方法】回顾性收集2023年4月至2024年9月于中山大学附属第一医院接受手术治疗的47例脑肿瘤患者,包括胶质瘤10例、前庭神经鞘瘤12例和脑膜瘤25例。所有患者术前均接受多参数MRI和MRE检查。将弹性图与增强3DT1图像配准后,分别于肿瘤硬度最大及最小区域各放置3个ROI测量弹性值,取其均值作为平均弹性值;同时在基底节层面侧脑室后角区域的脑白质和脑灰质内各置一个ROI,获取正常参考值。由一名对MRE结果单盲的神经外科医师根据手术录像按5分法(1分:柔软,5分:坚硬)对肿瘤术中硬度进行分级。采用组内相关系数(ICC)评估观察者一致性,采用方差分析及非参数检验比较组间弹性值差异,运用Spearman相关分析弹性值与临床病理参数的相关性,并通过受试者工作特征(ROC)曲线评估弹性值对肿瘤类型的鉴别效能。【结果】两名医师在肿瘤最硬区域和最软区域所测弹性值的ICC分别为0.868和0.831(均 $P<0.01$ )。脑膜瘤的最大弹性值、最小弹性值及平均弹性值分别为:( $1.91\pm 0.28$ )m/s、( $1.66\pm 0.25$ )m/s、( $1.78\pm 0.26$ )m/s,均显著高于胶质瘤,分别为:( $1.59\pm 0.23$ )m/s、( $1.42\pm 0.23$ )m/s、( $1.50\pm 0.22$ )m/s, ( $P<0.05$ );前庭神经鞘瘤的各弹性值分别为:( $1.70\pm 0.30$ )m/s、( $1.51\pm 0.23$ )m/s、( $1.61\pm 0.26$ )m/s,均低于脑膜瘤而高于胶质瘤,但差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ )。脑白质弹性值( $1.63\pm 0.08$ )m/s高于脑灰质( $1.39\pm 0.12$ )m/s,差异具有统计学意义( $P<0.05$ )。整体样本中,最大、最小及平均弹性值均与术中硬度分级呈显著正相关(分别为: $r_s=0.591$ ,  $r_s=0.541$ ,  $r_s=0.571$ , 均 $P<0.001$ ),与WHO分级呈负相关(分别为: $r_s=-0.458$ ,  $r_s=-0.458$ ,  $r_s=-0.480$ , 均 $P<0.01$ ),与Ki-67均无相关性(均 $P>0.05$ )。【结论】MRE可用于评估颅内肿瘤质地,并在一定程度区分肿瘤类型,有助于术前制订更个体化的手术方案。

**关键词:**磁共振弹性成像;胶质瘤;前庭神经鞘瘤;脑膜瘤;硬度

中图分类号:R445.2

文献标志码:A

文章编号:1672-3554(2026)01-0143-09

DOI:10.11714/jssysu.med.YX20250138

## Application of Magnetic Resonance Elastography in the Evaluation of Common Intracranial Tumor Stiffness

LIN Jingyi<sup>1</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>, HU Tianyu<sup>2</sup>, HU Manshi<sup>1</sup>, LIU Minfen<sup>1</sup>, XIE Dingxiang<sup>1</sup>

(1. Department of Radiology, The First Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China;

2. Department of Neurosurgery, The First Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China)

Correspondence to: XIE Dingxiang; E-mail: xiedx7@mail.sysu.edu.cn

**Abstract:**【Objective】To explore the clinical potential of magnetic resonance elastography (MRE) for assessing the stiffness of common intracranial tumors.【Methods】A retrospective analysis was conducted on 47 patients with brain tumors who underwent surgical treatment at The First Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University between April 2023 and September 2024. The cohort included 10 cases of glioma, 12 cases of vestibular schwannoma, and 25 cases of meningioma. All patients underwent multiparameter MRI and MRE preoperatively. After co-registering MRE images with

收稿日期:2025-09-23

录用日期:2025-12-16

基金项目:国家自然科学基金(82402232);广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515030233, 2025A1515012827)

作者简介:林京怡,第一作者,研究方向:磁共振弹性成像, E-mail: linjy235@mail.sysu.edu.cn; 谢定祥,通信作者, E-mail: xiedx7@mail.sysu.edu.cn

contrast-enhanced 3D T1-weighted images, three regions of interest (ROIs) were placed in the areas of maximum and minimum tumor stiffness respectively to measure the shear stiffness values, and the mean was calculated as the average shear stiffness. Additionally, one ROI was placed in the white matter and one in the grey matter of the posterior horn of the lateral ventricle at the basal ganglia level to obtain normal reference values. A neurosurgeon, blind to the MRE results, graded the intraoperative tumor stiffness based on surgical videos using a 5-point scale (1: soft; 5: hard). Intraclass correlation coefficient (ICC) was used to assess inter-observer consistency. Analysis of variance (ANOVA) and nonparametric tests were employed to compare the differences of shear stiffness values between groups. Spearman correlation analysis was used to examine the correlation between elasticity values and clinicopathological parameters. The discriminatory efficacy of shear stiffness values for tumor types was evaluated with receiver operating characteristic (ROC) curves. **【Results】** The ICCs for elasticity values measured by two physicians in the hardest and softest tumor areas were 0.868 and 0.831, respectively (both  $P < 0.01$ ). The maximum, minimum, and average shear stiffness values of meningiomas [(1.91±0.28) m/s, (1.66±0.25) m/s, (1.78±0.26) m/s, respectively] were significantly higher than those of gliomas [(1.59±0.23) m/s, (1.42±0.23) m/s, (1.50±0.22) m/s, respectively ( $P < 0.05$ )]. The shear stiffness values of vestibular schwannomas [(1.70±0.30) m/s, (1.51±0.23) m/s, (1.61±0.26) m/s, respectively] were lower than those of meningiomas and higher than those of gliomas, but these differences were not statistically significant (both  $P > 0.05$ ). The shear stiffness values of white matter were significantly higher than that of grey matter [(1.63±0.08) m/s vs. (1.39±0.12) m/s,  $P < 0.05$ ]. In the overall sample, the maximum, minimum, and average shear stiffness values were significantly positively correlated with the intraoperative hardness grade ( $r_s = 0.591$ ,  $r_s = 0.541$ ,  $r_s = 0.571$ , respectively; all  $P < 0.001$ ), negatively correlated with WHO grade ( $r_s = -0.458$ ,  $r_s = -0.458$ ,  $r_s = -0.480$ , respectively; all  $P < 0.01$ ), but showed no correlation with Ki-67 (all  $P > 0.05$ ). **【Conclusion】** MRE can be used to assess the stiffness of intracranial tumors and to some extent differentiate between tumor types, which aids in formulating more individualized preoperative surgical plans.

**Key words:** magnetic resonance elastography; glioma; vestibular schwannoma; meningioma; stiffness

[J SUN Yat-sen Univ(Med Sci), 2026, 47(1): 143-151]

中枢神经系统肿瘤在各年龄段人群中有着较高的发病率和死亡率,其中胶质母细胞瘤和脑膜瘤分别是最常见的原发脑恶性和良性肿瘤,前庭神经鞘瘤也有着较高的发病率<sup>[1-3]</sup>。对于需要手术干预的脑肿瘤患者而言,肿瘤质地是影响手术切除难度的重要因素之一。质地较硬的肿瘤常与周围脑实质结构紧密粘连,术中分离困难,易造成血管和神经损伤;而质地较软的肿瘤虽更易于切除,但其内部可能存在局灶性纤维化或钙化区域,会显著增加手术难度和术中出血风险。因此,术前准确评估肿瘤质地,对于制订手术计划、选择合适的手术入路以及确定切除策略具有至关重要的意义<sup>[4-6]</sup>。目前,临床对颅内肿瘤质地的评估主要依赖于传统影像学方法。Hoover等<sup>[7]</sup>指出,T2WI高信号及T1WI低信号的脑膜瘤通常质地较软,而T2WI表现为低信号、T1WI为等信号的脑膜瘤则更可能质地较硬,但该方法对坚硬肿瘤的检测灵敏度较低。Romani等<sup>[8]</sup>发现,常规MRI成像的信号变化与脑膜瘤质地

之间并无显著相关性。尽管有研究尝试基于扩散加权MRI评估垂体瘤的硬度<sup>[9]</sup>,其结果仍存在一定争议。近年来,磁共振弹性成像(magnetic resonance elastography, MRE)作为一种无创、定量评估组织生物力学特性的新兴成像技术迅速发展,其原理可类比为“影像触诊”。与传统触诊相比,MRE能够定量测量体内深部组织的粘弹性参数<sup>[10]</sup>。目前,肝脏MRE已成为评估慢性肝病肝纤维化的非侵入性标准方法,且有较高的准确性<sup>[11-12]</sup>。在脑肿瘤领域,Xu等<sup>[13]</sup>于2007年首次报道了术前MRE评估与术中肿瘤质地分级相关性的研究,但样本量较小( $n=6$ ),研究价值有限。Sakai等<sup>[14]</sup>虽将MRE应用于4种常见颅内肿瘤的硬度评估,但其成像空间分辨率较低,限制了其进一步临床应用。因此,亟需探索高分辨MRE技术预测常见颅内肿瘤质地的临床应用价值。本研究拟采用多频(25、30、40和50 Hz)高分辨率MRE技术,对常见脑肿瘤(胶质瘤、脑膜瘤及前庭神经鞘瘤)进行定

量质地评估,并将其结果与术中观察及术后病理进行对比分析,以系统评估 MRE 在术前无创预测肿瘤质地及鉴别肿瘤类型方面的潜在临床应用价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 病例收集

本研究回顾性收集 2023 年 4 月至 2024 年 9 月于中山大学附属第一医院就诊怀疑脑肿瘤的患者,所有患者术前均行多参数 MRI 和 MRE 检查。纳入标准:年龄 $\geq 18$ 岁;经手术病理证实为胶质瘤、脑膜瘤和前庭神经鞘瘤;具有完整的临床病历及影像学资料。排除标准:影像存在严重运动伪影或弹性图传导不佳;既往有颅脑手术及治疗史。研究初步纳入 63 例患者,其中 3 例数据丢失,11 例弹性传导不佳,2 例图像存在严重运动伪影。最终纳入 47 例患者,其中胶质瘤 10 例,脑膜瘤 25 例,前庭神经鞘瘤 12 例。本研究已获得中山大学附属第一医院研究伦理委员会批准,批准号为[伦审临[2025]760号]并豁免知情同意。

### 1.2 多频磁共振图像采集

所有患者均使用 3.0 T 超导型 MR 扫描仪(MAGNETOM, Prisma, Siemens Healthcare, Erlangen, Germany)和 64 通道相控阵头线圈进行常规磁共振检查和 MRE 扫描,体位为仰卧位,头先进。在进行 MRE 检查时,将两个弹性垫片置于患者颅底后方,并通过专用管道连接磁体间外的主动驱动器,同时把产生的机械波引入患者颅内。MRE 扫描采用自旋平面回波(spin-echo echo-planar imaging, SE-EPI)序列,扫描参数如下:重复时间(repetition time, TR)7 390 ms,回波时间(echo time, TE)68 ms,层厚 2 mm,层间隔 0 mm,视野(field of view, FOV)240 mm $\times$ 240 mm,体素 2 $\times$ 2 $\times$ 2,层数 62 层,4 种振动频率(25、30、40 和 50 Hz)。

常规磁共振扫描序列包括:①横断面 T1WI: TR:2 000 ms, TE:17 ms, FOV:230 mm $\times$ 230 mm,层厚 6 mm,矩阵 320 $\times$ 240;②横断面 T2WI: TR:4 000 ms, TE:100 ms; FOV:230 mm $\times$ 230 mm,层厚 6 mm,矩阵 384 $\times$ 269;③横断面 T2 FLAIR: TR:9 000 ms, TE:80 ms, FOV:230 mm $\times$ 230 mm,层厚 6 mm,矩阵 320 $\times$ 224;④矢状面 3D-MPRAGE 序列(T1-MPRAGE): TR:2 300 ms, TE:2.43 ms, FOV:240 mm $\times$

240 mm,层厚 0.75 mm,矩阵 320 $\times$ 320。平扫完成后,注入对比剂(Gd-DTPA, 0.1 mmol/kg, Magnevist, Bayer Schering),注射速率为 1 mL/s,然后用相同的注射速率进行 20 mL, 0.9% 生理盐水冲洗,获得增强后 T1WI 序列和矢状面 3D-MPRAGE 序列(T1-MPRAGE)。

### 1.3 图像后处理及分析

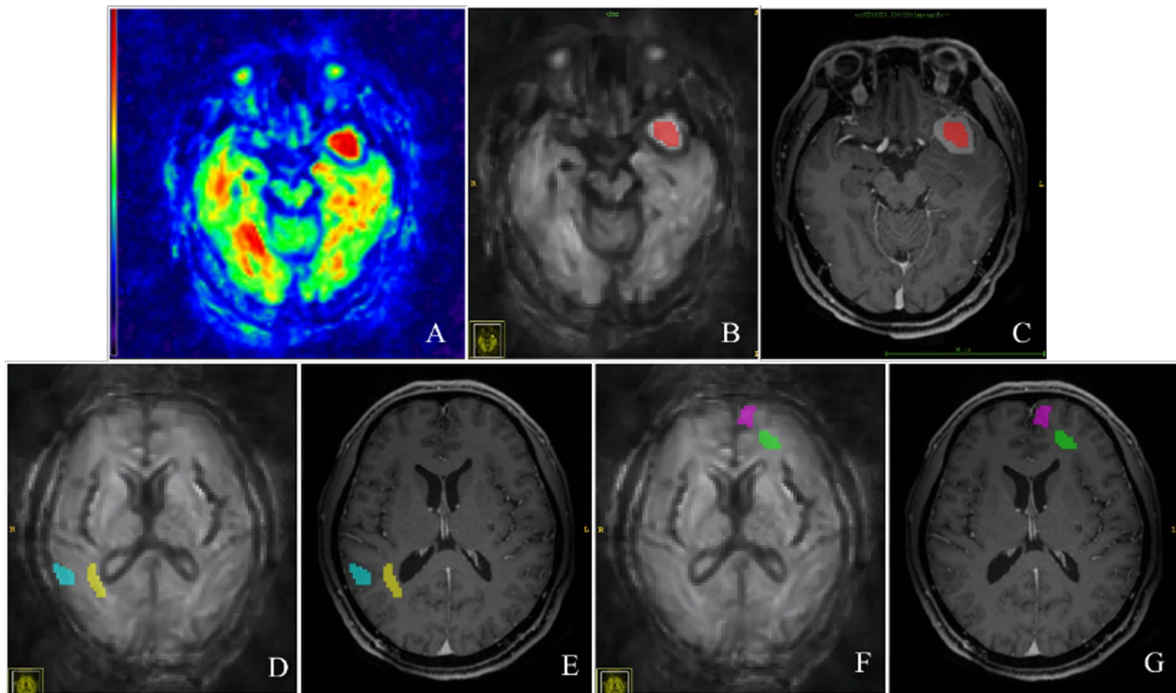
多频 MRE 通过一次扫描可同时获取提供解剖信息的幅值图以及反映剪切波运动信息的相位差图。后续处理采用基于波数的多频双粘弹性(k-MDEV)的反演算法<sup>[15-16]</sup>;首先将 4 个频率(25、30、40 和 50 Hz)的振幅加权波数叠加,生成复合剪切波速度图 cMap 图(即弹性图),该图像融合了各频率下的机械波信息,用于量化剪切波速度(m/s),以表征组织硬度(后文亦称“弹性值”)。同时生成 T2WI 幅值图用于显示解剖结构。本研究后处理流程在德国洪堡大学提供的弹性成像后处理官方网站 www.bioqic-apps.com 上进行。

将 cMap 图与增强 3D-T1 MPRAGE 图像导入 ITK-SNAP 软件进行配准后,由两名放射科医师(分别具有 5 年和 8 年头颈部影像诊断经验)避开肿瘤的坏死、囊变及出血区域,分别在主观判定为硬度最大和最小的区域中各放置 3 个感兴趣区(regions of interest, ROI, 面积 10~80 mm<sup>2</sup>),用于测量弹性值。硬度区域的判定基于 MRIcron 软件中对 cMap 图的显示设置:背景显示模式选用 NIH, 阈值设为 0.2 至 2.4,数值越接近 2.4 表示组织越硬(图 1A)。在确认图像质量符合评估要求后,记录硬度极值所在层面。肿瘤体积通过 ROI 内体素数乘以单一体素体积计算,单位为 cm<sup>3</sup>。如两名医师判断存在差异,则经讨论达成一致。

取 3 个最硬 ROI 的弹性值均值作为肿瘤最大弹性值,3 个最软 ROI 的均值作为最小弹性值,全部 6 个 ROI 的均值作为平均弹性值。此外,在无病变的基底节层面侧脑室后角区域(若该区域有肿瘤,则选择基底节层面额叶区域),分别于脑白质和脑灰质内各放置一个 ROI,记录其弹性值作为参考。NIH 背景图像及 ROI 放置示例见图 1。

### 1.4 术中肿瘤硬度分级

所有患者均于我院接受手术治疗,手术过程均以数字录像设备完整记录。由一名具有丰富手术经验,且对 MRE 结果保持单盲的神经外科医生回



A: Reference image in NIH mode, used to identify the anatomical levels corresponding to the maximum and minimum tumor stiffness. B and C: The red areas indicate the precise locations and sizes of the placed ROIs. D-G: ROIs are placed in the white matter (yellow and green) and grey matter (blue and pink), respectively. ROI: regions of interest.

图1 硬度的判断及ROI的放置

Fig. 1 Assessment of stiffness and placement of ROIs

顾手术录像,根据肿瘤在切除过程中所呈现的物理特性,参照Murphy等<sup>[17]</sup>提出的5分制标准进行硬度分级。具体分级标准如下:①柔软(可以100%通过普通吸引器抽吸移除);②大部分柔软(大部分可以通过普通吸引器抽吸移除,但有纤维束区域);③中等硬度(大约50%的肿瘤是可通过普通吸引器抽吸移除,其余的肿瘤是坚硬的);④大部分坚硬(至少75%~80%的肿瘤坚硬,需要在高设置下进行超声抽吸);⑤坚硬(均匀坚硬,基本上都需要超声抽吸)。

### 1.5 统计分析

采用SPSS 26.0软件进行统计分析。采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)评估两名医师在勾画ROI后所得影像学参数的一致性。ICC判定标准为:ICC<0.40,一致性差;0.40≤ICC<0.75,一致性较好;ICC≥0.75,一致性好。所有假设检验均采用双侧检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。连续变量首先通过Kolmogorov-Smirnov检验和Levene检验分别进行正态性和方差齐性评估。符合正态分布的定量资料以均值±标准差(mean±SD)表示,不符合者则以中位数和四分位数间距 $M(P_{25}\sim P_{75})$ 表示。

利用单因素方差分析(ANOVA)及Bonferroni校正进行多重比较,分析脑膜瘤、前庭神经鞘瘤和胶质瘤在最大、最小、平均、脑白质、脑灰质弹性值以及年龄之间的差异。采用卡方检验,比较3组在性别比例上的差异。在肿瘤组内分析中,采用Kruskal-Wallis  $H$ 检验比较3种肿瘤的最大、最小及平均弹性值与对应脑白质和脑灰质弹性值的关系,采用Bonferroni校正进行两两比较。采用独立样本  $t$  检验比较所有患者脑白质与脑灰质弹性值的差异。采用Spearman秩相关检验分析总体肿瘤弹性值与术中硬度分级、WHO分级及Ki-67指数之间的相关性。另外,绘制受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)并计算曲线下面积(area under the curve, AUC)评价最大、最小以及平均弹性值区分脑膜瘤和胶质瘤的诊断效能。

## 2 结果

### 2.1 临床资料

本研究共纳入47例脑肿瘤患者,其中男性14例、女性33例,年龄范围为34~74岁,平均年龄为

(51±14)岁。按病理类型分为3组:胶质瘤10例(男性4例、女性6例),脑膜瘤25例(男性5例、女性20例),前庭神经鞘瘤12例(男性5例、女性7例)。经方差分析,3组间年龄差异无统计学意义( $F=0.377$ ,  $P=0.688$ );经卡方检验分析,3组间性别比例差异无统计学意义( $\chi^2=2.607$ ,  $P=0.307$ )。

各组肿瘤的弹性测量值以均值±标准差表示(单位:m/s;表1)。脑膜瘤的最大硬度、最小硬度和平均硬度值分别为 $1.91\pm 0.28$ 、 $1.66\pm 0.25$ 和 $1.78\pm 0.26$ ;胶质瘤分别为 $1.59\pm 0.23$ 、 $1.42\pm 0.23$ 和 $1.50\pm 0.22$ ;前庭神经鞘瘤分别为 $1.70\pm 0.30$ 、 $1.51\pm 0.23$ 和 $1.61\pm 0.26$ 。脑白质和脑灰质的弹性参考值分别为 $1.63\pm 0.08$ 和 $1.39\pm 0.12$ 。经 $t$ 检验分析,脑白质硬度显著高于脑灰质,差异具有统计学意义( $t=10.959$ ,  $P<0.05$ )。脑膜瘤的Ki-67和WHO分别为:0.030(0.020~0.055)、1(1~1);胶质瘤分别为:0.275(0.065~0.325)、3(2~4),前庭神经鞘瘤的Ki-67为0.015(0.010~0.0875)。

## 2.2 一致性分析

对随机选取的23例脑肿瘤患者进行一致性分析,结果显示,两名医师在肿瘤最硬区域和最软区域所测弹性值ICC分别为0.868和0.831(均 $P<0.01$ ;表2),表明测量结果具有良好的一致性。

## 2.3 脑肿瘤组间比较

3组肿瘤的最大、最小、平均弹性值比较,经方差分析,3组弹性值差异均具有统计学意义[最大( $F=5.741$ ,  $P=0.006$ )、最小( $F=4.099$ ,  $P=0.023$ )、平均( $F=5.195$ ,  $P=0.009$ )]。

2.3.1 胶质瘤 vs. 脑膜瘤 采用 bonferroni 法作两两比较,发现同胶质瘤相比,脑膜瘤的最大弹性值、最小弹性值及平均弹性值均显著增高(均 $P<0.05$ ,表1)。在3组弹性值的比较中,最大弹性值对脑膜瘤和胶质瘤的区分诊断效能最佳[AUC(95%CI)=0.832(0.69,0.97);表2,图2]。

脑膜瘤中各弹性值与脑白质、脑灰质比较,经 Kruskal Wallis  $H$  检验分析,5组间差异有统计学意义( $H=53.366$ ,  $P<0.001$ )。采用 bonferroni 法作两两比较发现:与脑灰质相比,脑膜瘤最大( $cMap_{\text{脑膜瘤}}:1.91\pm 0.28$  vs.  $cMap_{\text{脑灰质}}:1.39\pm 0.12$ ,  $P=0.001$ )、最小( $cMap_{\text{脑膜瘤}}:1.66\pm 0.25$  vs.  $cMap_{\text{脑灰质}}:1.39\pm 0.12$ ,  $P=0.001$ )和平均弹性值( $cMap_{\text{脑膜瘤}}:1.78\pm$

$0.26$  vs.  $cMap_{\text{脑灰质}}:1.39\pm 0.12$ ,  $P=0.001$ )均显著更高;而与脑白质相比,仅其最硬区域的弹性值( $cMap_{\text{脑膜瘤}}:1.91\pm 0.28$  vs.  $cMap_{\text{脑白质}}:1.63\pm 0.08$ ,  $P=0.014$ )显著高于脑白质。胶质瘤各区域的弹性值与脑白质及脑灰质相比,差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ )。

2.3.2 前庭神经鞘瘤 vs. 胶质瘤和脑膜瘤 采用 bonferroni 法作两两比较,发现同脑膜瘤相比,前庭神经鞘瘤的最大弹性值、最小弹性值及平均弹性值均低于脑膜瘤,但所有差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ ,表1);此外,同胶质瘤相比,前庭神经鞘瘤的最大弹性值、最小弹性值及平均弹性值均高于胶质瘤,但所有差异也均无统计学意义(均 $P>0.05$ ;表1)。

前庭神经鞘瘤中各弹性值与脑白质、脑灰质比较,经 Kruskal Wallis  $H$  检验分析,5组间差异有统计学意义( $H=15.870$ ,  $P<0.001$ )。采用 bonferroni 法作两两比较发现:前庭神经鞘瘤只有最硬区域弹性值高于脑灰质( $cMap_{\text{神经鞘瘤}}:1.70\pm 0.30$  vs.  $cMap_{\text{脑灰质}}:1.39\pm 0.12$ ,  $P=0.015$ ),差异具有统计学意义,其余区域弹性值与脑白质和脑灰质相比,差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ )。

3组肿瘤的不同弹性值对比结果如图3所示,代表性病例如图4所示。

## 2.4 相关分析

在整体肿瘤样本中,最大弹性值( $r_s=0.591$ ,  $P<0.001$ )、最小弹性值( $r_s=0.541$ ,  $P<0.001$ )及平均弹性值( $r_s=0.571$ ,  $P<0.001$ )均与术中硬度分级呈显著正相关(图5)。进一步,在各类肿瘤的组内分析中,前庭神经鞘瘤最大弹性值( $r_s=0.759$ ,  $P=0.004$ )、最小弹性值( $r_s=0.808$ ,  $P=0.001$ )及平均弹性值( $r_s=0.808$ ,  $P=0.001$ )均与术中分级显著相关;脑膜瘤中仅最小弹性值与术中硬度分级相关( $r_s=0.591$ ,  $P<0.05$ );而胶质瘤各区域弹性值与术中硬度分级均无显著相关性(均 $P>0.05$ );

在弹性值与 Ki-67 的相关性分析中,无论是整体肿瘤分析还是各亚组内部,均未发现显著相关性(均 $P>0.05$ )。整体肿瘤的最大( $r_s=-0.458$ ,  $P=0.006$ )、最小( $r_s=-0.458$ ,  $P=0.004$ )及平均弹性值( $r_s=-0.480$ ,  $P=0.004$ )均与 WHO 分级呈显著负相关。但在各肿瘤类型内部(胶质瘤和脑膜瘤)的分析中,弹性值与 WHO 分级均无显著相关性(均 $P>0.05$ )。

表1 临床资料及3种肿瘤弹性值比较

Table 1 Clinical data and comparison of shear stiffness of three types of tumors

Item	Glioma (n=10)	MNM (n=25)	VS (n=12)	$F/\chi^2$	P	[( $\bar{x} \pm s$ ), $M(P_{25}-P_{75})$ ]		
						$P_{\text{Glioma vs. MNM}}$	$P_{\text{Glioma vs. VS}}$	$P_{\text{MNM vs. VS}}$
Age/year	48.3±15.3	49.0±14.9	52.3±12.8	0.377	0.688	1	1	1
Gender				2.607	0.307			
Male	4	5	5					
Female	6	20	7					
Max stiffness/(m/s)	1.59±0.23	1.91±0.28	1.70±0.30	5.741	0.006	0.009	0.958	0.115
Min stiffness/(m/s)	1.42±0.23	1.66±0.25	1.51±0.23	4.009	0.023	0.031	1	0.250
Mean stiffness/(m/s)	1.50±0.22	1.78±0.26	1.61±0.26	5.195	0.009	0.013	1	0.150
Ki-67	0.275 (0.065-0.325)	0.030 (0.020-0.055)	0.015 (0.010-0.088)					
WHO	3(2-4)	1(1-1)	/					

MNM: meningiomas; VS: vestibular schwannomas.

表2 不同弹性值区分脑膜瘤与胶质瘤的诊断效能

Table 2 Diagnostic performance of shear stiffness values in differentiating meningioma from glioma (n=25)

Shear stiffness	AUC(95%CI)	Cutoff	Sensitivity	Specificity	P
Maximum	0.832(0.690,0.974)	0.580	0.680	0.900	0.002
Minimum	0.752(0.575,0.929)	0.500	0.600	0.900	0.021
Mean	0.800(0.642,0.958)	0.520	0.720	0.800	0.006

AUC:area under the curve; CI:confidence interval.

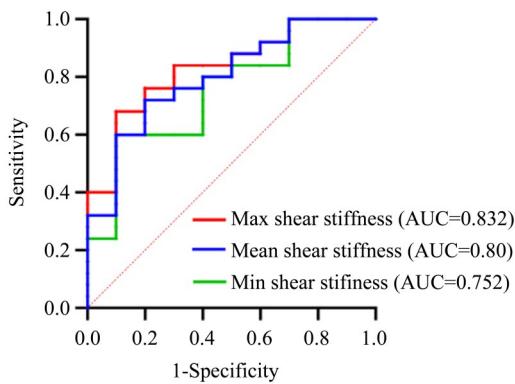
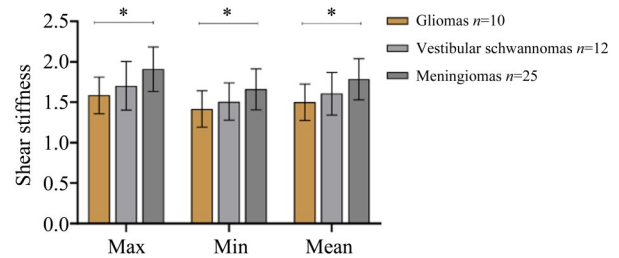


图2 不同弹性值预测脑膜瘤的ROC曲线

Fig. 2 The ROC curve of different shear stiffness values for predicting meningioma



Max: maximum shear stiffness; Min: minimum shear stiffness; Mean: minimum shear stiffness. Compared with gliomas and vestibular schwannomas, meningiomas have the highest stiffness. Max ( $F=5.741$ ,  $P=0.006$ ), Min ( $F=4.099$ ,  $P=0.023$ ), Mean ( $F=5.195$ ,  $P=0.009$ ). \*  $P < 0.05$ , compared with Gliomas.

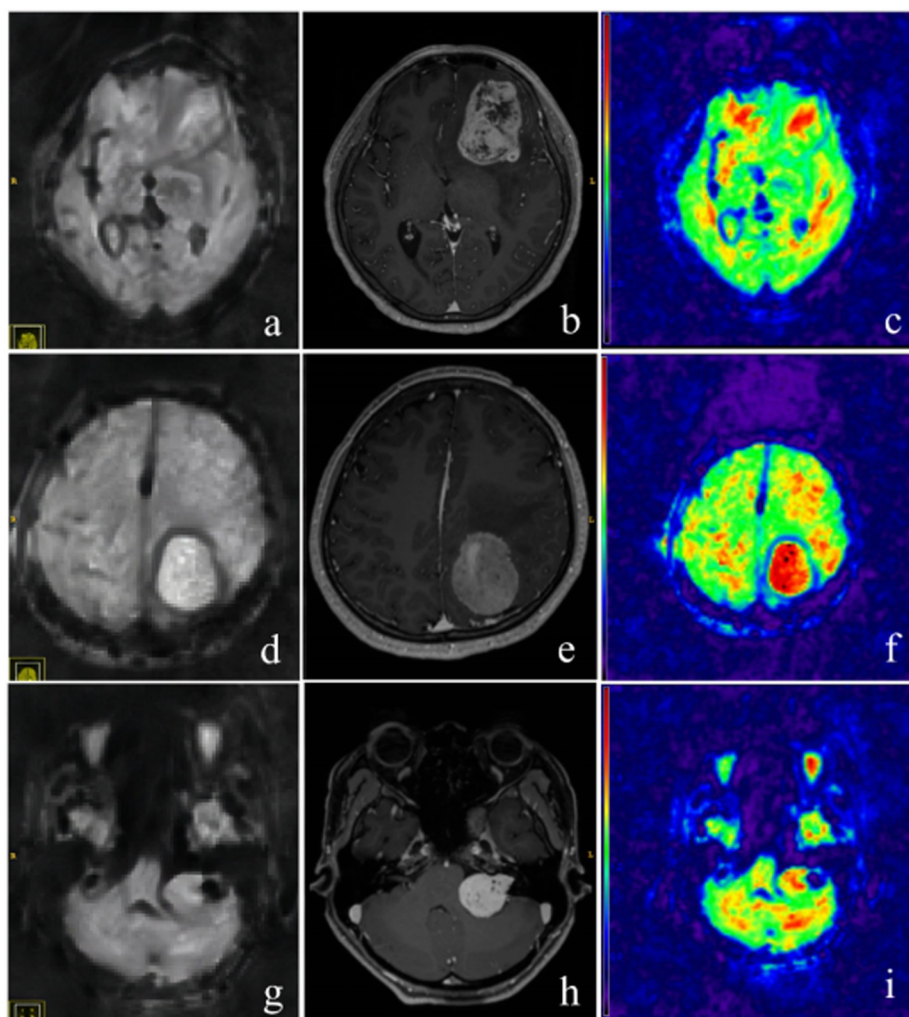
图3 3种肿瘤硬度对比结果

Fig. 3 Comparison results of the hardness of three types of tumors

### 3 讨论

本研究主要结果表明:①MRE测量颅内常见肿瘤弹性值具有良好的一致性;②不同肿瘤类型间

的弹性值存在显著差异,脑膜瘤的最大弹性值、最小弹性值和平均弹性值均显著高于胶质瘤;③整体肿瘤弹性值与术中硬度分级呈正相关且与WHO分



a, c, d, f, g, i: cMap images; (b/e/h): Contrast-enhanced T1-weighted image. Case 1 (58-year-old female): Glioblastoma in the left frontal lobe (WHO grade IV), mean tumor shear stiffness 1.498 6 m/s (a, b, c), the intraoperative assessment demonstrated a hardness grade of 2. Case 2 (33-year-old female): Fibrous meningioma in the left parietal lobe (WHO grade I), mean tumor shear stiffness 1.999 4 m/s (d, e, f), the intraoperative assessment demonstrated a hardness grade of 5. Case 3 (25-year-old female): Schwannoma in the left cerebellopontine angle, mean tumor shear stiffness 1.750 6 m/s (g, h, i), the intraoperative assessment demonstrated a hardness grade of 4.

图4 3种肿瘤的病例展示

Fig. 4 Representative cases of the three tumor types

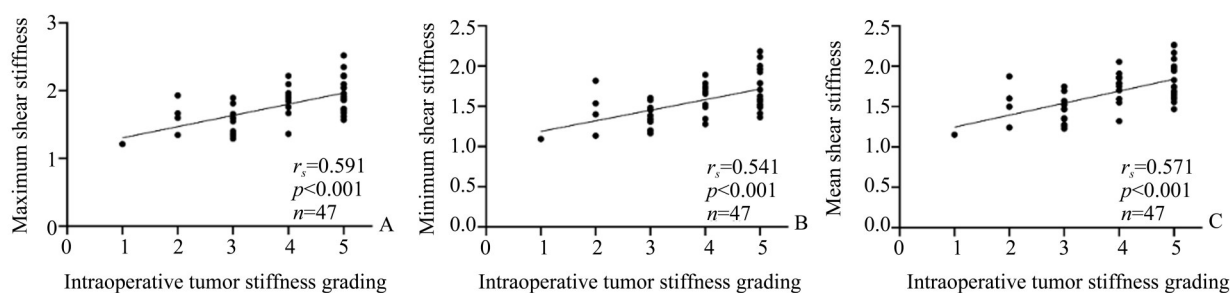


图5 肿瘤最大(A)、最小(B)及平均弹性值(C)与术中硬度分级相关性

Fig. 5 Correlation between the maximum (A), minimum (B) and the mean (C) shear stiffness of tumors and subjective intraoperative hardness grading

级呈负相关,但与Ki-67无显著相关。此外,组内相关性分析的结果存在不一致性,提示MRE所测弹性值与临床病理参数之间的关系可能因肿瘤类型而异,尚需更大样本进一步验证。

本次研究表明脑白质比灰质更硬,与早期在健康大脑MRE的研究一致<sup>[18]</sup>。Reiss-Zimmermann等<sup>[19]</sup>研究结果显示,与正常脑组织相比,原发性脑肿瘤主要较软,而且似乎随着恶性程度的增加变得更软,而脑膜瘤平均硬度比对侧正常脑组织稍硬,但他们的结果并未针对脑白质和脑灰质进行单独分析。在我们的研究中,脑膜瘤和神经鞘瘤的最大硬度均显著高于脑灰质;与脑白质相比,只有脑膜瘤最大硬度显著高于脑白质。胶质瘤和前庭神经鞘瘤所有硬度与脑白质相比,差异均无统计学意义。此外,既往的研究<sup>[14]</sup>表明,脑膜瘤的最大区域弹性值高于胶质瘤及前庭神经鞘瘤,而前庭神经鞘瘤的平均弹性值高于脑膜瘤和胶质瘤;本研究在最大弹性值比较方面结果与之一致,但在平均弹性值比较中与之相反。我们猜测是先前的样本数量(脑膜瘤13例,前庭神经鞘瘤6例)太少所致,而本次的研究数量为它的两倍还多。其次可能与测量的方法有关,本次测量没有选择全瘤,这在结果上可能会导致一些偏倚。

已有研究表明胶质母细胞瘤通常软于正常脑组织<sup>[20]</sup>,且胶质瘤的硬度会随着肿瘤分级的升高而降低<sup>[19]</sup>。然而在本研究胶质瘤组内分析中,未发现类似趋势,弹性值与术中硬度分级也无显著相关性。我们猜测首先是胶质瘤的样本量太小( $n=10$ ,其中2例少突胶质瘤(含1例idh突变型)、5例弥漫性胶质瘤(含3例idh突变型)、3例胶质母细胞瘤(含1例idh野生型),肿瘤整体硬度数据被较低级别且硬度较大的胶质瘤平均,使得统计有误差。且Pepin等<sup>[21]</sup>发现IDH突变的胶质瘤比IDH野生型肿瘤更坚硬;其次,胶质母细胞瘤具有高度异质性,可包含囊性、实性、坏死成分及弥漫浸润区域,各组分机械特性不同可能影响MRE弹性值的测量一致

性;最后,正常脑实质测量位置、大小与先前的研究不一致,导致结果可能存在差异。在前庭神经鞘瘤组内,研究表明前庭神经鞘瘤的肿瘤硬度与头部CT观察到的内听道增宽相关而与T2信号无关,且较软肿瘤患者术后面神经功能恢复更佳<sup>[22]</sup>,表明术前硬度评估具有重要意义,本研究也表明神经鞘瘤硬度与术中分级相关性最强,提示MRE可作为术前评估其一致性的潜在工具。

在整体相关性方面,所有肿瘤的弹性值与术中硬度分级相关性良好,与既往结果一致<sup>[23]</sup>;但弹性值与Ki-67无显著相关,可能因为肿瘤硬度是宏观力学表现,而Ki-67仅反映细胞增殖活性,二者可能不存在简单线性关系,尚需更大样本深入探讨。值得注意的是,肿瘤最大、最小及平均硬度均与WHO分级呈负相关。既往研究显示,IV级胶质瘤软于II级<sup>[21]</sup>;在脑膜瘤中,1级与2级间硬度存在显著差异,2级高于1级,但1级与3级、2级与3级之间无显著差异<sup>[24]</sup>。本研究出现负相关,可能与样本中脑膜瘤占比高且多为1级,而胶质瘤占比小且均为2级以上有关。弹性值与WHO分级的关系仍需更大样本进一步研究。

本研究存在若干局限性:首先,样本量较小,特别是胶质瘤仅10例,限制了统计效能,可能导致某些组间差异或组内相关性未被检出;其次,样本存在选择偏倚,脑膜瘤数量明显多于其他类型,可能影响整体分析结果;第三,术中硬度评级虽由经验丰富的医师执行,但仍属主观半定量评估,缺乏客观量化标准;第四,MRE空间分辨率有限,对高度异质性肿瘤的微观结构表征能力不足。未来研究应进一步探讨MRE硬度与脑膜瘤及胶质瘤分子亚型的相关性。

综上所述,磁共振弹性成像(MRE)可通过量化肿瘤剪切刚度,为术前无创评估颅内肿瘤力学特性提供新方法,在辅助鉴别诊断、评价肿瘤生物学行为及指导个体化手术策略方面具有重要价值,有望为改善患者预后提供依据。

## 参考文献

- [1] Price M, Ballard C, Benedetti J, et al. CBTRUS statistical report: primary brain and other central nervous system tumors diagnosed in the United States in 2017–2021 [J]. *Neuro Oncol*, 2024, 26(Supplement\_6): vi1–vi85.
- [2] Hajikarimloo B, Habibi MA, Sabbagh Alvani M, et al. Repeat stereotactic radiosurgery in vestibular schwannoma patients: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Clin Neurosci*, 2024, 130: 110905.
- [3] 阴鲁鑫, 徐义强, 肖维汉, 等. 成人胶质母细胞瘤TERT启动子和 ATRX 突变预后价值[J]. *中国神经精神疾病杂志*, 2023, 49(8): 449–455.
- Yin LX, Xu YQ, Xiao WH, et al. Prognostic value of TERT promoter and ATRX mutations in adult glioblastoma [J]. *Chin J Nerv Ment Dis*, 2023, 49(8): 449–455.
- [4] Itamura K, Chang KE, Lucas J, et al. Prospective clinical validation of a meningioma consistency grading scheme: association with surgical outcomes and extent of tumor resection [J]. *J Neurosurg*, 2019, 131(5): 1356–1360.
- [5] Song XZ, Huang PS, Liu XY, et al. Advanced imaging and localization techniques in brain tumor resection: a review for precision tumor removal [J]. *Brain Res Bull*, 2025, 230: 111533.
- [6] Duhon BH, Thompson K, Fisher M, et al. Tumor biomechanical stiffness by magnetic resonance elastography predicts surgical outcomes and identifies biomarkers in vestibular schwannoma and meningioma [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 14561.
- [7] Hoover JM, Morris JM, Meyer FB. Use of preoperative magnetic resonance imaging T1 and T2 sequences to determine intraoperative meningioma consistency [J]. *Surg Neurol Int*, 2011, 2: 142.
- [8] Romani R, Tang WJ, Mao Y, et al. Diffusion tensor magnetic resonance imaging for predicting the consistency of intracranial meningiomas [J]. *Acta Neurochirurgica*, 2014, 156(10): 1837–1845.
- [9] Lu YP, Xiong J, Geng DY, et al. Prediction of the consistency of pituitary adenoma: a comparative study on diffusion-weighted imaging and pathological results [J]. *J Neuroradiol*, 2016, 43(3): 186–194.
- [10] Snellings J, Keshi E, Tang P, et al. Solid fraction determines stiffness and viscosity in decellularized pancreatic tissues [J]. *Biomater Adv*, 2022, 139: 212999.
- [11] Pepin KM, Welle CL, Guglielmo FF, et al. Magnetic resonance elastography of the liver: everything you need to know to get started [J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2022, 47(1): 94–114.
- [12] Duarte-Rojo A, Taouli B, Leung DH, et al. Imaging-based noninvasive liver disease assessment for staging liver fibrosis in chronic liver disease: a systematic review supporting the AASLD Practice Guideline [J]. *Hepatology*, 2025, 81(2): 725–748.
- [13] Xu L, Lin Y, Han JC, et al. Magnetic resonance elastography of brain tumors: preliminary results [J]. *Acta Radiologica*, 2007, 48(3): 327–330.
- [14] Sakai N, Takehara Y, Yamashita S, et al. Shear stiffness of 4 common intracranial tumors measured using MR elastography: comparison with intraoperative consistency grading [J]. *Am J Neuroradiol*, 2016, 37(10): 1851–1859.
- [15] Meyer T, Marticorena Garcia S, Tzschatsch H, et al. Comparison of inversion methods in MR elastography: an open-access pipeline for processing multifrequency shear-wave data and demonstration in a phantom, human kidneys, and brain [J]. *Magn Reson Med*, 2022, 88(4): 1840–1850.
- [16] Page G, Julea F, Paradis V, et al. Comparative analysis of a locally resampling MR elastography reconstruction algorithm in liver fibrosis [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2023, 58(2): 403–414.
- [17] Murphy MC, Huston Iii J, Glaser KJ, et al. Preoperative assessment of meningioma stiffness using magnetic resonance elastography [J]. *J Neurosurg*, 2013, 118(3): 643–648.
- [18] Hiscox LV, Johnson CL, Barnhill E, et al. Magnetic resonance elastography (MRE) of the human brain: technique, findings and clinical applications [J]. *Phys Med Biol*, 2016, 61(24): R401–R437.
- [19] Reiss-Zimmermann M, Streitberger KJ, Sack I, et al. High resolution imaging of viscoelastic properties of intracranial tumours by multi-frequency magnetic resonance elastography [J]. *Clin Neuroradiol*, 2014, 25(4): 371–378.
- [20] Svensson SF, Halldorsson S, Latysheva A, et al. MR elastography identifies regions of extracellular matrix reorganization associated with shorter survival in glioblastoma patients [J]. *Neurooncol Adv*, 2023, 5(1): 1–13.
- [21] Pepin KM, Mcgee KP, Arani A, et al. MR elastography analysis of glioma stiffness and IDH1-mutation status [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2018, 39(1): 31–36.
- [22] Rizk AR, Adam A, Gugel I, et al. Implications of vestibular schwannoma consistency: analysis of 140 cases regarding radiologic and clinical features [J]. *World Neurosurg*, 2017, 99: 159–163.
- [23] Takamura T, Motosugi U, Ogiwara M, et al. Relationship between shear stiffness measured by MR elastography and perfusion metrics measured by perfusion CT of meningiomas [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2021, 42(7): 1216–1222.
- [24] Shi Y, Huo YL, Pan C, et al. Use of magnetic resonance elastography to gauge meningioma intratumoral consistency and histotype [J]. *Neuroimage Clin*, 2022, 36: 103173.