

◁ 中枢神经影像学 ▷

7.0T 及 3.0T T₂ 加权成像在脑胶质瘤患者中的对比研究李晨曦¹, 段曹辉², 马笑笑², 曲建勋³, 边祥兵², 娄昕²(1. 解放军医学院, 北京 100853; 2. 解放军总医院第一医学中心放射诊断科, 北京 100853;
3. 西门子医疗磁共振协作组, 北京 100000)

[摘要] 目的: 探讨脑胶质瘤患者中 7.0T 超高场强 T₂WI 的图像质量及对肿瘤细节显示的价值。方法: 2022 年 1—6 月我院前瞻性招募 23 例胶质瘤的受试者, 所有受试者于同一天内行 7.0T 及 3.0T T₂WI 扫描。在图像质量方面, 针对图像伪影及灰质边界、尾状核、豆状核和幕下区域清晰度进行评估。在肿瘤细节显示方面, 对肿瘤流空血管、内部结构及肿瘤边界进行评估。主观评价由两名放射科医生分别进行评估。测量白质、灰质及病灶实质的信噪比(SNR), 灰/白质及白质/病灶实质的对比度噪声比(CNR)。采用 Wilcoxon 符号秩和检验比较主观评分之间的差异性, 采用配对样本 *t* 检验比较客观指标之间的差异。结果: 7.0T T₂WI 对灰质边界、尾状核及豆状核的显示优于 3.0T ($P<0.05$), 对肿瘤流空血管、内部结构的显示优于 3.0T ($P<0.001$)。对于伪影及肿瘤边界的显示两者无显著差别 ($P>0.05$), 7.0T 图像幕下区域的清晰度较 3.0T 差 ($P<0.001$)。7.0T T₂WI 中白质、灰质及病灶实质的 SNR 均高于 3.0T ($P<0.001$); 7.0T T₂WI 中灰/白质 CNR 与 3.0T 相近 ($P=0.440$), 白质/病灶实质的 CNR 低于 3.0T ($P=0.028$)。结论: 7.0T T₂WI 显著提升了图像 SNR, 能够更加清晰识别大脑正常解剖结构, 可以观察到更多的肿瘤内部细节, 但 7.0T 对幕下区域的成像效果较差。

[关键词] 神经胶质瘤; 磁共振成像**[中图分类号]** R739.41; R445.2**[文献标识码]** A**[文章编号]** 1008-1062(2024)05-0305-05

DOI:10.12117/jccmi.2024.05.001

A comparison study of 7.0T and 3.0T T₂WI in glioma patientsLI Chen-xi¹, DUAN Cao-hui², MA Xiao-xiao², QU Jian-xun³, BIAN Xiang-bing², LOU Xin²

(1. Medical School of Chinese PLA, Beijing 100853, China;

2. Department of Radiology, the First Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China;

3. MR Collaboration, Siemens Healthineers Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: Objective: To investigate the image quality and the value of tumor detail display of 7.0T ultra-high field strength T₂WI in patients with glioma. **Methods:** Twenty-three subjects with gliomas were recruited in our hospital from January 2022 to June 2022. All of them received 7.0T and 3.0T T₂WI on the same day. In terms of image quality, image artifacts and gray matter boundary, caudate nucleus, lenticular nucleus and infratentorial regions were evaluated. In terms of tumor details, flow empty vessels, internal structures and tumor boundary were assessed. Subjective evaluation was performed by two radiologists. SNR of white matter, gray matter, and lesion parenchyma, CNR of gray/white matter and white matter/lesion parenchyma were measured. Wilcoxon signed-rank test was used to evaluate the subjective scores. Pared-samples *t* test was used to compare the differences between the objective indicators. **Results:** The display of gray matter boundary, caudate nucleus and lenticular nucleus on 7.0T T₂WI was better than that on 3.0T ($P<0.05$), and the display of flow empty vessels and internal structure of tumor was better than that on 3.0T ($P<0.001$). There was no significant difference in the display of artifacts and tumor boundary between the two ($P>0.05$). The clarity of infratentorial region of the 7.0T image was worse than that of the 3.0T image ($P<0.001$). The SNR of white matter, gray matter and lesion parenchyma on 7.0T T₂WI was higher than that on 3.0T ($P<0.001$). CNR of gray/white matter on 7.0T T₂WI was similar to that on 3.0T ($P=0.440$), and CNR of white matter/lesion parenchyma was lower than 3.0T ($P=0.028$). **Conclusion:** Compared with 3.0T, 7.0T T₂WI significantly improves image SNR, allowing for clearer identification of normal brain anatomy and more internal tumor details. But the images quality of the infratentorial region is poor on 7.0T.

Key words: Glioma; Magnetic Resonance Imaging

脑胶质瘤是中枢神经系统最常见的恶性肿瘤, 具有高度侵袭性、异质性和致命性的特点^[1-2]。MRI 是一种非侵入性医学成像技术, 其中 T₂WI 是显示组织特征的基础序列, 可以识别肿瘤内囊变、坏死及出血等成分, 从而协助胶质瘤的诊断及预后评估。2017

年全球首台临床 7.0T MR 扫描仪获得 CE 认证, 人体 7.0T MR 也逐步由科学研究向临床应用转化。与传统的 3.0T MR 相比, 7.0T MR 可以显著提升图像信噪比(SNR)和组织对比度, 从而实现更高的空间分辨率^[3]。目前, 7.0T MRI 在脑肿瘤、血管病、多发性

[收稿日期] 2023-11-17; [修回日期] 2023-12-02

[作者简介] 李晨曦(1998-), 女, 河北石家庄人, 在读硕士研究生。E-mail: lcx19981111@163.com

[通信作者] 娄昕, 解放军总医院第一医学中心放射诊断科, 100853。E-mail: louxin@301hospital.com.cn

[基金项目] 国家自然科学基金(81825012, 82151309)。

硬化中的应用中已得到初步验证^[4-6]。然而,7.0T MR 也存在随场强提升而带来的挑战,如射频频场的不均匀性、特定吸收率的提升以及 T₂ 弛豫时间的缩短,这些均会影响成像效率和图像质量^[7]。因此,7.0T 与 3.0T MRI 的图像对比研究具有重要意义。

本研究通过比较 7.0T 及 3.0T T₂WI 序列中脑胶质瘤患者的白质、灰质及病灶的 SNR 及对比噪声比(CNR),并分析不同场强下 T₂WI 图像质量以及肿瘤细节显示的差异,从而为 7.0T 在脑胶质瘤患者中临床应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 一般资料

本研究为前瞻性研究。连续性收集 2022 年 1—6 月我院第一医学中心同意参加本研究的疑似幕上脑胶质瘤患者。纳入标准:①年龄≥18 岁;②既往影像诊断报告提示具有脑部占位性病变,疑似为脑胶质瘤患者;③计划进行手术治疗或活检能取得病理结果;④在一天内分别行 7.0T 及 3.0T T₂WI 扫描。排除标准:①先前治疗过的患者(如手术、放化疗或不明药物治疗后);②经病理诊断为其它类型的中枢神经系统肿瘤;③幕下胶质瘤患者;④有 MRI 检查禁忌症或无法配合完成扫描的患者,妊娠或 3 月内有妊娠计划,哺乳期女性。本研究在临床试验中心注册(编号:NCT05287750)并获得我院伦理委员会审批(S2021-542-01)。所有受检者均已签署知情同意书。

1.2 仪器与方法

使用西门子 7.0T MR 扫描仪(Siemens Healthcare, Magnetom Terra)及 32 通道头部线圈和西门子 3.0T MR 扫描仪(Siemens Healthcare, Magnetom Skyra)及 20 通道头部线圈对所有受试者进行 T₂WI 扫描。7.0T T₂WI 扫描参数:TR 7 000 ms,TE 58 ms,视野(FOV) 210 mm×210 mm,层厚 2 mm,体素大小 0.2 mm×0.2 mm×2.0 mm,重新聚焦反转角 120°,层数 52。3.0T T₂WI:TR 6 000 ms,TE 125 ms,FOV 240 mm×240 mm,层厚 6 mm,体素大小 0.6 mm×0.6 mm×6.0 mm,重新聚焦反转角 90°,层数 20。

1.3 图像分析

主观评价:由两名放射科医师(分别具有 3 年和 6 年经验)分别对 3.0T 及 7.0T T₂WI 进行评估。对于图像质量,从伪影、灰质边界、尾状核、豆状核以及幕下区域清晰度五个方面进行评估。伪影的评分标准 1~5 分:所有层面都有严重伪影、所有层面都有中等度伪影、大部分层面都有少量伪影、一些层面有少量伪影、所有层面都无伪影。灰质边界、尾状核、豆状核头及幕下区域的清晰度的评分标准 1~5 分:所有层

面都显示不清、所有层面都显示欠清、一些层面显示可、大部分层面显示可、所有层面都显示清晰。

对于肿瘤细节,从肿瘤流空血管、内部结构异质性及边界 3 个方面进行评估。评分标准 1~5 分:1 分,绝对不显示,严重影响诊断;2 分,很可能没显示,影响诊断;3 分,显示部分较少,部分诊断不清;4 分,显示大部分,不影响诊断;5 分,显示清楚,能够很好诊断。对肿瘤边界的评分标准与灰质边界的评分标准相同。

客观评价:在不同场强下选择相同位置和面积的感兴趣区(ROI),分别测量白质、灰质及病灶的信号强度(SI)及标准偏差(SD),在没有磁共振信号的区域测量背景噪声的标准偏差(SD_{background})。计算白质、灰质及病灶的 SNR,白质/灰质及白质/病灶的 CNR。白质的 ROI 选择病灶对侧的半卵圆中心,面积约 100 mm²;灰质的 ROI 选择前扣带皮层,面积约 10~20 mm²;肿瘤的 ROI 选择病灶实性较均质成分,注意避开肿瘤的坏死、囊变和出血区域,根据病灶大小调整 ROI 大小。SNR 及 CNR 的计算公式^[8]:

$$SNR = \frac{SI}{SD_{background}}$$

$$CNR = \frac{SI_1 - SI_2}{\sqrt{(SD_1)^2 + (SD_2)^2}}$$

1.4 统计学分析

所有数据采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析,使用 Shapiro Wilk 检验进行正态分布及方差齐性检验,符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用配对样本 *t* 检验进行组间比较。有序分类变量以中位数(四分位数间距)表示,采用 Wilcoxon 符号秩和检验进行组间比较。采用 Kappa 检验评估 2 名放射科医生评价图像质量及肿瘤细节评分的一致性:≤0.40,一致性差;>0.40~0.60,一致性中等;>0.60~0.80,一致性很好;>0.80~1,一致性极佳。结果以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料

本研究收集符合纳入标准的受试者 28 例,排除 2 例先前有过脑外伤及头颅手术病史的患者、2 例经术后病理诊断为其他类型中枢神经系统肿瘤的患者及 1 例延髓病变患者,最终共纳入 23 例进行分析。其中男 13 例,女 10 例,年龄 21~64 岁,平均(45.2±11.9)岁。

2.2 主观评价

两名放射科医生对于 T₂WI 图像质量及肿瘤细节评分一致性很好或极佳,Kappa 值 0.7~1。

从灰质边界显示的清晰度来看,7.0T 组评为 3 分、4 分及 5 分的病例数分别是 1 例 (4.3%)、2 例 (8.7%) 及 20 例 (87.0%),3.0T 组评为 3 分、4 分的病例数分别是 13 例 (56.5%)、10 例 (43.5%), 差异具有统计学意义 ($P<0.001$)。从尾状核显示的清晰度来看,7.0T 组评为 4 分及 5 分的病例数分别是 2 例 (8.7%) 及 21 例 (91.3%),3.0T 组评为 3 分、4 分及 5 分的病例数分别是 1 例 (4.3%)、9 例 (39.1%) 及 13 例 (56.5%), 差异具有统计学意义 ($P=0.020$)。从豆状核显示的清晰度来看,7.0T 组评为 4 分及 5 分的病例数分别是 1 例 (4.3%) 及 22 例 (95.7%),3.0T 组评为 3 分、4 分及 5 分的病例数分别是 1 例 (4.3%)、13 例 (56.5%) 及 9 例 (39.1%), 差异具有统计学意义 ($P<0.001$) (图 1)。

在对肿瘤细节的评估方面,从肿瘤内部流空血管的显示来看,有效病例 18 例,7.0T 组评为 4 分及 5 分的病例数分别是 6 例 (33.3%) 及 12 例 (66.7%),3.0T 组评为 1 分、2 分及 3 分的病例数分别是 2 例 (11.1%)、10 例 (55.6%) 及 6 例 (33.3%), 差异具有统计学意义 ($P<0.001$) (图 2)。从内部结构的显示来看,有效病例 19 例,7.0T 组评为 4 分及 5 分的病例数分别是 4 例 (21.1%) 及 15 例 (78.9%),3.0T 组评为 2 分、3 分、4 分及 5 分的病例数分别是 1 例 (5.3%)、3 例 (15.8%)、13 例 (68.4%) 及 2 例 (10.5%), 差异具有统计学意义 ($P<0.001$) (图 3)。从肿瘤边界的清晰度来看,7.0T 组评为 3 分、4 分及 5 分的病例数分别是 2 例 (8.7%)、11 例 (47.8%) 及 10 例 (43.5%),3.0T 组评为 2 分、3 分、4 分及 5 分的病例数分别是 1 例 (4.3%)、1 例 (4.3%)、12 例 (52.2%) 及 9 例 (39.1%), 差异不具有统计学意义 ($P=0.776$) (表 1)。

在对图像质量评估方面,从伪影显示来看,7.0T 组评为 3 分、4 分及 5 分的病例数分别是 1 例 (4.3%)、3 例 (13.0%) 及 19 例 (82.6%),3.0T 组评为 5 分的病例数是 23 例 (100%), 差异不具有统计学意义 ($P=0.059$) (图 4)。从幕下区域的均匀度来看,7.0T 组评为 1 分、2 分、3 分、4 分及 5 分的病例数分别是 1 例 (4.2%)、5 例 (20.8%)、8 例 (33.3%)、8 例 (33.3%)、2 例 (8.4%),3.0T 组评为 5 分的病例数是 24 例 (100%), 差异具有统计学意义 ($P<0.001$) (图 5) (表 1)。

2.3 客观评价

在客观评价方面,7.0T T₂WI 中病灶对侧半卵圆中心白质的 SNR 显著高于 3.0T ($P<0.001$),前扣带皮层灰质的 SNR 显著高于 3.0T ($P<0.001$),肿瘤病灶实质的 SNR 显著高于 3.0T ($P=0.004$)。7.0T

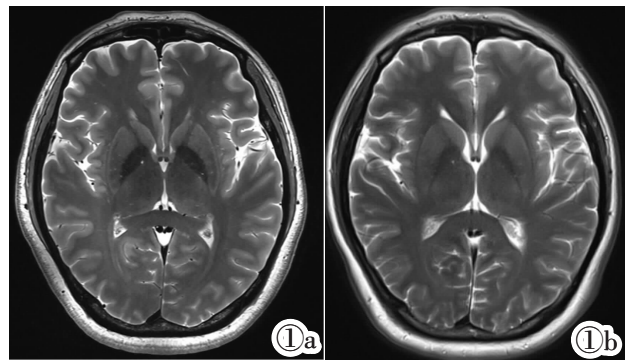


图 1a 在 7.0T MRI 中,双侧尾状核、豆状核及灰质边界显示清晰。图 1b 各个结构在 3.0T MRI 中显示尚可。

Figure 1a. Bilateral caudate nucleus, lentiform nucleus, and gray matter boundaries are clearly displayed on 7.0T MRI. Figure 1b. The display of each structure is still acceptable on 3.0T MRI.

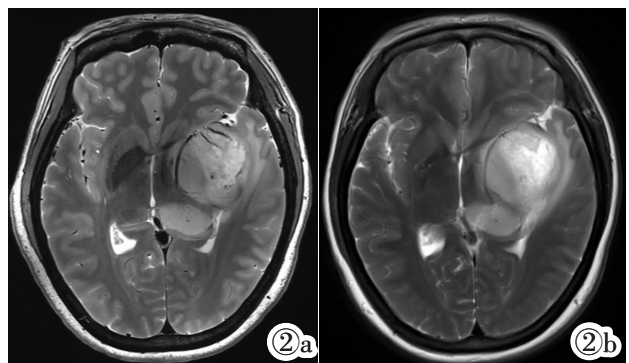


图 2 女,49 岁,左侧额颞叶胶质母细胞瘤。在 7.0T MRI 中可以看到明显的肿瘤内部流空血管影(图 2a),但在 3.0T MRI 中显示不清,影响诊断(图 2b)。

Figure 2. Female, 49 years old, glioblastoma in the left frontotemporal lobe. Flow empty vessels within the tumor are clearly shown on 7.0T MRI (Figure 2a), but not clearly shown on 3.0T MRI, affecting the diagnosis (Figure 2b).

表 1 不同场强下 T₂WI 主观评分比较

	7.0T T ₂ WI	3.0T T ₂ WI	Z 值	P
图像质量评估				
伪影	5(5,5)	5(5,5)	-1.890	0.059
灰质边界	5(5,5)	3(3,4)	-4.122	<0.001
尾状核	5(5,5)	3(3,4)	-2.324	0.020
豆状核	5(5,5)	5(4,5)	-4.234	<0.001
幕下区域	3(2,4)	5(5,5)	-4.064	<0.001
肿瘤特征				
流空血管	5(4,5)	2(2,3)	-3.808	<0.001
内部结构	5(5,5)	4(4,4)	-3.491	<0.001
边界	4(4,5)	4(4,5)	-0.284	0.776

T₂WI 灰质与白质的 CNR 高于 3.0T, 但差异不具有统计学意义 ($P=0.568$), 白质与病灶实质的 CNR 低于 3.0T ($P=0.001$) (表 2)。

3 讨论

本研究比较了 7.0T 及 3.0T 两种场强下 T₂WI 的图像质量和胶质瘤细节的显示情况以及 SNR 和 CNR, 结果表明相比于 3.0T MRI,7.0T 能够更加清

表 2 不同场强下 T₂WI 客观评价指标的比较

	7.0T T ₂ WI	3.0T T ₂ WI	t 值	P
SNR				
白质	149.9±49.4	73.6±21.7	7.275	<0.001
灰质	207.2±52.3	113.6±30.6	7.256	<0.001
病灶	253.9±73.7	198.5±57.5	3.252	0.004
CNR				
灰质/白质	5.7±2.4	5.4±1.7	0.580	0.568
白质/病灶	7.8±4.9	10.9±4.0	-3.751	0.001

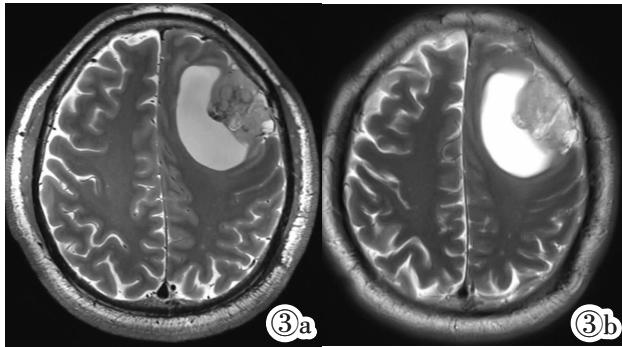


图 3 男,64 岁,左侧额叶 WHO 3 级胶质瘤。病灶实质在 7.0T MRI 中呈明显不均匀信号(图 3a),在 3.0T MRI 中信号尚均匀(图 3b)。

Figure 3. Male, 64 years old, WHO grade 3 glioma in the left temporal lobe. The lesion parenchyma shows significantly heterogeneous signals on 7.0T MRI(Figure 3a) and homogeneous signals on 3.0T MRI(Figure 3b).

清晰的显示灰质边界、尾状核及豆状核。7.0T T₂WI 对肿瘤流空血管和内部结构的显示明显优于 3.0T。对于伪影及肿瘤边界的显示两者无显著差别,但 7.0T 对幕下区域的显示较差。7.0T MR 图像的 SNR 明显高于 3.0T,而 CNR 与 3.0T 相近或劣于 3.0T。

T₂WI 是一种基础的 MRI 序列,可以帮助诊断涉及灰质和白质损伤的神经系统疾病,如卒中、肿瘤和多发性硬化^[9-11]。既往研究表明,增强后的 7.0T MPRAGE 序列对脑肿瘤细小结构显示更好,可以获得更高的肿瘤细节诊断可信度^[12]。T₂WI 同样受益于超高场强下增加的信噪比和空间分辨率,能够更好

地显示大脑的精细结构^[13]。

本研究结果显示 7.0T MRI 的 SNR 相比于 3.0T 提升了 1.3~2 倍。但对于 CNR,7.0T 的灰/白质的 CNR 与 3.0T 相当,甚至白质/病灶的 CNR 劣于 3.0T,这与既往的部分研究结果一致^[14-15]。这可能与 7.0T 射频场与接受线圈不均匀有关,此外,组织自身弛豫特性也会随着场强提升而发生变化,这些因素均会导致实际结果与理论不相符。在图像质量评估中,有 3 例患者的 7.0T 图像中产生了少许运动伪影,可能与 7.0T 超高分辨率对运动伪影更加敏感有关。而超高分辨率同时更有利于精细结构的可视化,7.0T MR 对于灰质边界的清晰显示对于识别发生在皮质的微小转移瘤病灶或多发性硬化中的局灶皮质病变是有利的。7.0T 对于尾状核及豆状核清晰显示有利于内部亚区的可视化,从而实现精准分割,有利于术中精准靶向定位^[15]。超高场强 MR 也存在固有弊端,射频场 B1 不均匀性的增加会产生强烈的信号空洞,尤其在小脑及颞叶最为明显,导致难以进行幕下病灶的识别及诊断。目前,改善射频场 B1 不均匀性的主要措施有并行传输技术,有研究比较了不同匀场模式对幕下病灶的显示情况^[16]。

低级别胶质瘤通常会在几年内恶性进展为高级别胶质瘤,其中通过生成病理性微血管是关键步骤之一^[17]。我们的研究表明,7.0T T₂WI 对脑胶质瘤病灶内流空血管的显示优于 3.0T。这是因为随着超高场自身信噪比升高,更适合高分辨率成像,而分辨率的提升将有益于流动血液失相位,同时高分辨本身也更容易显示出微小血管。同时随着胶质瘤级别的提升,内部坏死及微出血增多^[18-19]。我们的结果显示 7.0T T₂WI 能够更清晰地显示肿瘤内部结构,从宏观的角度讲,这有助于神经外科医生在活检定位及病理取材过程中有更大的把握识别肿瘤实质组织,从而提高穿刺的准确性。从微观的角度讲,7.0T

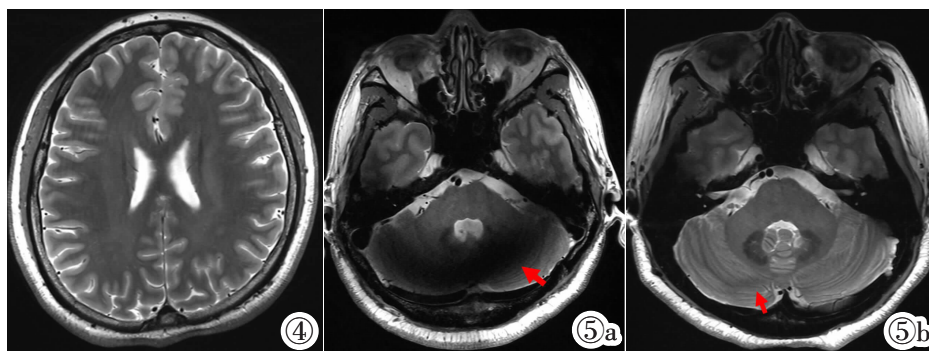


图 4 在 7.0T MRI 中可见弧形伪影。图 5a 7.0T MRI 小脑区域所有层面都显示欠清。图 5b 7.0T MRI 右侧小脑半球区域大部分层面可显示。

Figure 4. Arcuate artifact is seen on 7.0T MRI. Figure 5a. The cerebellar region is not clearly shown at all aspects on the 7.0T MRI. Figure 5b. Most aspects of the cerebellar region are shown on the 7.0T MRI.

对肿瘤内部结构的高分辨率成像势必带来更多的放射组学信息,这对于识别不同分子分型胶质瘤十分重要。因此,识别肿瘤血管及内部结构的异质性对于监控肿瘤进展、对胶质瘤患者进行早期分层和风险评估有重要意义。

脑胶质瘤以弥漫性生长著称,在成像上边界不清。肿瘤边界是神经外科的一个重要成像指标,因为它决定了肿瘤切除的程度和保留患者功能的最大安全切除范围^[20]。然而,在我们的研究中,在描绘肿瘤边界方面 7.0T 似乎没有比 3.0T 显示更好的影像线索。未来,随着功能和代谢成像的发展,结合 7.0T 的高分辨率特点,7.0T MRI 的高级序列在评估胶质瘤边界方面会显示出更好的潜力^[21]。

本研究仍存在一些不足。首先,本研究仅纳入了幕上胶质瘤患者,并未对幕下胶质瘤及其他类型的中枢神经系统肿瘤进行探讨,对于转移瘤、中枢神经系统淋巴瘤的诊断价值还有待进一步研究;其次,虽然已保持不同场强下 T₂WI 扫描参数基本一致,但图像质量、病灶显示清晰度等还受到一些硬件(如线圈)以及个体差异等因素的影响。

综上所述,7.0T MR 具有高分辨率、高信噪比的特点,显著提升了图像质量,能够清晰可视化大脑正常解剖结构,能够识别低场强下无法检测的细微异常。超高场 MR 为脑胶质瘤带来了诸多新的信息,在探索疾病的发病机制,早期诊断,监测疗效和疗效评估方面具有巨大的潜力。未来还需要不断克服物理限制,改进技术方法,以实现更加快速、清晰的超高场成像。

[参考文献]

- [1]Weller M, van den Bent M, Preusser M, et al. EANO guidelines on the diagnosis and treatment of diffuse gliomas of adulthood[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2021, 18(3): 170–186.
- [2]黄栌有,高先聪,王延花. 基于 MR 图像纹理特征建立机器学习模型在脑胶质瘤分级中的应用[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2020, 31(12): 858–861.
- [3]Tratnig S, Springer E, Bogner W, et al. Key clinical benefits of neuroimaging at 7T[J]. *Neuroimage*, 2018, 168: 477–489.
- [4]Zhang Z, Kong Q, Zhang Y, et al. Improved characterization of lenticulostriate arteries using compressed sensing time-of-flight at 7T[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(10): 6939–6947.
- [5]Sinnecker T, Drr J, Pfueller CF, et al. Distinct lesion morphology at 7-T MRI differentiates neuromyelitis optica from multiple sclerosis[J]. *Neurology*, 2012, 79(7): 708–714.
- [6]Heo HY, Jones CK, Hua J, et al. Whole-brain amide proton transfer(APT) and nuclear overhauser enhancement(NOE) imaging in glioma patients using low-power steady-state pulsed chemical exchange saturation transfer (CEST) imaging at 7T [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2016, 44(1): 41–50.
- [7]Kraff O, Quick HH. 7T: Physics, safety, and potential clinical applications[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 46(6): 1573–1589.
- [8]Oliveira AF, Roos T, Dumoulin SO, et al. Can 7T MPRAGE match MP2RAGE for gray–white matter contrast?[J]. *Neuroimage*, 2021, 240: 118384.
- [9]Hosseinpour Z, Jonkman L, Oladosu O, et al. Texture analysis in brain T₂ and diffusion MRI differentiates histology–verified grey and white matter pathology types in multiple sclerosis [J]. *J Neurosci Methods*, 2022, 379: 109671.
- [10]Wang X, Lyu J, Meng Z, et al. Small vessel disease burden predicts functional outcomes in patients with acute ischemic stroke using machine learning [J]. *CNS Neurosci Ther*, 2023, 29(4): 1024–1033.
- [11]Cheng D, Zhuo Z, Du J, et al. A fully automated deep-learning model for predicting the molecular subtypes of posterior fossa ependymomas using T₂-weighted images [J]. *Clin Cancer Res*, 2024, 30(1): 150–158.
- [12]Cheng K, Duan Q, Hu J, et al. Evaluation of postcontrast images of intracranial tumors at 7T and 3T MRI: An intra-individual comparison study[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2023, 29(2): 559–565.
- [13]Jacqmot O, Van Thielen B, Hespel AM, et al. T₂-weighted turbo spin-echo magnetic resonance imaging of canine brain anatomy at 1.5T, 3T, and 7T field strengths [J]. *Anat Rec (Hoboken)*, 2022, 305(1): 222–233.
- [14]Zwanenburg JJ, Hendrikse J, Visser F, et al. Fluid attenuated inversion recovery (FLAIR) MRI at 7.0 Tesla: comparison with 1.5 and 3.0 Tesla[J]. *Eur Radiol*, 2010, 20(4): 915–922.
- [15]Maruyama S, Fukunaga M, Fautz HP, et al. Comparison of 3T and 7T MRI for the visualization of globus pallidus sub-segments[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 18357.
- [16]王晓玉,王松,段曹辉,等. 7.0T MR 不同匀场模式在二维及三维 T₂ 加权成像中的临床应用 [J]. *中华放射学杂志*, 2023, 57(11): 1187–1192.
- [17]Plate KH, Risau W. Angiogenesis in malignant gliomas [J]. *Glia*, 1995, 15(3): 339–347.
- [18]Yee PP, Wei Y, Kim SY, et al. Neutrophil-induced ferroptosis promotes tumor necrosis in glioblastoma progression [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 5424.
- [19]Grabner G, Kiesel B, Whrer A, et al. Local image variance of 7 Tesla SWI is a new technique for preoperative characterization of diffusely infiltrating gliomas: correlation with tumour grade and IDH1 mutational status [J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(4): 1556–1567.
- [20]Shah AS, Yahanda AT, Sylvester PT, et al. Using histopathology to assess the reliability of intraoperative magnetic resonance imaging in guiding additional brain tumor resection: A multicenter study[J]. *Neurosurgery*, 2020, 88(1): e49–e59.
- [21]Yuan Y, Yu Y, Guo Y, et al. Noninvasive delineation of glioma infiltration with combined 7T chemical exchange saturation transfer imaging and MR spectroscopy: A diagnostic accuracy study[J]. *Metabolites*, 2022, 12(10): 901.