

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.03.010

弥散张量成像技术在药物难治性癫痫 手术治疗中的应用价值

解义菊, 金楚月

(中国科学技术大学(安徽省立医院) 南区影像中心, 安徽合肥 230036)

【摘要】目的 探讨弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)在药物难治性癫痫(drug-resistant epilepsy, DRE)术前致痫灶定位、手术方案制订及术后脑白质微结构评估中的临床价值。**方法** 回顾性分析2022年1月至2024年12月安徽省立医院神经外科收治的80例DRE手术患者的临床资料。根据术前评估方式分为DTI指导组($n=40$)和常规影像组($n=40$)。DTI指导组在常规磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)及视频脑电图(video electroencephalography, VEEG)基础上,深度融合DTI参数与纤维束追踪结果,个体化规划最小安全切除范围;常规影像组仅依据常规MRI及VEEG制订手术方案。术后随访12个月,采用Engel分级评价疗效,比较两组各向异性分数(fractional anisotropy, FA)、平均弥散率(mean diffusivity, MD)及表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)的组间与组内变化,并采用Spearman秩相关分析FA恢复程度与癫痫控制效果的关系。**结果** DTI指导组术后12个月疗效优良率为95.0%(38/40),显著高于常规影像组[80.0%(32/40)]($\chi^2=4.111, P=0.043$)。DTI指导组术后1周FA值即较术前显著升高、MD及ADC值显著降低(均 $P<0.001$),至术后12个月改善持续;常规影像组各参数变化差异均无统计学意义(均 $P>0.05$);术后12个月,两组FA、MD、ADC值差异均有统计学意义(均 $P<0.01$)。DTI指导组致痫灶定位准确率为92.5%(37/40),显著高于常规影像组[75.0%(30/40)]($\chi^2=4.501, P=0.034$)。DTI指导组并发症总发生率为7.5%(3/40),无永久性神经功能缺损;常规组为15.0%(6/40),含1例永久性记忆障碍,但总发生率比较差异无统计学意义($P=0.288$)。Spearman相关性分析显示,DTI指导组术后12个月FA恢复程度与Engel分级呈显著正相关($r_s=0.62, P<0.01$)。**结论** DTI能够精准定位致痫灶、优化手术切除范围,显著提升手术疗效并有效保护神经功能。术后FA、MD及ADC参数的动态演变可客观反映脑白质纤维束重塑过程,对癫痫预后具有监测与预测价值。

【关键词】 弥散张量成像; 药物难治性癫痫; 手术治疗; 疗效评估**【中图分类号】** R445.2; R651.1**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2026) 03-0056-06

The application value of diffusion tensor imaging technology in the surgical treatment of drug-resistant epilepsy

XIE Yiju, JIN Chuyue

(South District Imaging Center, University of Science and Technology of China (Anhui Provincial Hospital), Hefei 230036, Anhui, China)

【Abstract】Objective To investigate the clinical value of diffusion tensor imaging (DTI) in preoperative epileptogenic focus localization, surgical planning, and postoperative cerebral white matter microstructural assessment in patients with drug-resistant epilepsy (DRE). **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical data of 80 patients with DRE who underwent surgical treatment in the Department of Neurosurgery, Anhui Provincial Hospital, from January 2022 to December 2024. Based on the preoperative evaluation method, patients were divided into the DTI-guided group ($n=40$) and the conventional imaging group ($n=40$). In addition to conventional magnetic resonance imaging (MRI) and video electroencephalography (VEEG), the DTI-guided group integrated DTI parameters and fiber tractography results to individualize the planning of the minimal safe resection margin. The conventional imaging group formulated the surgical plan solely based on conventional MRI and VEEG findings. All patients were followed up for 12 months. Engel classification was used to evaluate surgical outcomes. Fractional anisotropy (FA), mean diffusivity (MD), and apparent diffusion coefficient (ADC) values were compared between and within groups. Spearman rank correlation analysis was performed to assess the relationship between FA recovery and seizure control. **Results** The 12-month favorable outcome rate in the DTI-guided group was

收稿日期: 2025-04-16。

作者简介: 解义菊, 本科, 技师, 研究方向: 影像技术。E-mail: X1685977934@163.com。

95.0% (38/40), significantly higher than the 80.0% (32/40) in the conventional imaging group ($\chi^2=4.111$, $P=0.043$). One week after the DTI-guided group surgery, the FA value significantly increased compared to the preoperative value, while the MD and ADC values significantly decreased (all $P<0.001$), and the improvement persisted until 12 months after the surgery. There were no statistically significant differences in the changes of each parameter in the conventional imaging group (all $P>0.05$). At 12 months after the surgery, there were statistically significant differences in the FA, MD, and ADC values between the two groups (all $P<0.01$). The localization accuracy of the epileptogenic focus was 92.5% (37/40) in the DTI-guided group, significantly higher than 75.0% (30/40) in the conventional imaging group ($\chi^2=4.501$, $P=0.034$). The overall complication rate was 7.5% (3/40) in the DTI-guided group, with no permanent neurological deficits, compared with 15.0% (6/40, including one case of permanent memory impairment) in the conventional imaging group, though the difference was not statistically significant ($P=0.288$). Spearman correlation analysis revealed a significant positive correlation between FA recovery at 12 months and Engel class in the DTI-guided group ($r_s=0.62$, $P<0.01$). **Conclusion** DTI can precisely locate the epileptogenic focus, optimize the extent of surgical resection, significantly improve surgical outcomes, and effectively protect neurological function. The dynamic evolution of postoperative FA, MD, and ADC parameters can objectively reflect cerebral white matter fiber tract remodeling and hold value for monitoring and predicting epilepsy prognosis.

【Key words】 Diffusion tensor imaging; Drug-resistant epilepsy; Surgical treatment; Efficacy assessment

癫痫是常见的慢性神经系统疾病,全球患病率约 7%,我国现有患者超过 900 万例^[1]。其中 30%~40% 的患者经 2 种或以上规范抗癫痫药物治疗仍无法有效控制发作,发展为药物难治性癫痫 (drug-resistant epilepsy, DRE)^[2]。长期反复发作导致认知损害及生活质量下降,外科切除致痫灶是有效治疗手段,但 20%~30% 的患者常规磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 无法显示病灶,且术中保护白质纤维束仍是技术瓶颈^[3]。弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 通过检测水分子各向异性弥散,可无创显示白质纤维束走行及微结构改变,是目前唯一能在活体追踪脑白质通路的技术^[4]。近年研究证实, DRE 患者致痫灶及其周围脑白质纤维束存在微结构损伤,可通过各向异性分数 (fractional anisotropy, FA) 和平均弥散率 (mean diffusivity, MD) 等参数进行定量评估^[5]。FA 值反映水分子弥散各向异性程度,与脑白质纤维束的完整性呈正相关; MD 值反映水分子整体弥散水平,与细胞膜完整性呈负相关。基于此,本研究旨在通过 DTI 量化分析致痫灶及周围脑白质的微结构改变,指导 DRE 个体化手术方案制订,评估其对 DRE 患者术后癫痫控制及脑白质重塑的预测价值,为提升 DRE 手术疗效提供可靠的影像学依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性纳入 2022 年 1 月至 2024 年 12 月在安徽省立医院神经外科行手术治疗的 DRE 患者。纳入标准: ① 符合国际抗癫痫联盟 (International League Against Epilepsy, ILAE) 2010 年共识关于 DRE 的诊断

标准^[6]: 经 2 种及以上规范抗癫痫药物治疗无效; ② 年龄 12~60 岁; ③ 术前完成 DTI 及视频脑电图 (video electroencephalogram, VEEG) 检查; ④ 接受致痫灶切除术且术后 12 个月随访资料完整。排除标准: ① 合并颅内肿瘤、血管畸形等占位性病变; ② 既往颅脑手术史; ③ 严重心、肝、肾功能障碍; ④ 无法配合完成高质量影像学检查。120 例中依上述标准分别排除 8、9、13、10 例,共排除 40 例。经纳入与排除标准筛选,最终纳入 80 例,男 45 例,女 35 例;年龄 12~58 岁,平均 (32.5±10.8) 岁;平均病程 2~18 年,平均 (8.6±3.5) 年。

分组与偏倚控制: 根据术前是否深度融合 DTI 参数与纤维束追踪结果制订手术方案进行分组。为控制主刀医师主观偏倚,本研究采取以下措施: ① 按时间顺序连续纳入,研究早期纳入常规影像组,后期纳入 DTI 指导组,避免同期主观挑选; ② 由同一固定手术团队 (含 2 名从业 >20 年的主任医师) 共同阅判影像、集体讨论确定方案,统一病灶定位与切除标准; ③ 严格匹配两组基线资料,确保组间可比。本研究经安徽省立医院伦理委员会批准。

DTI 指导组 40 例,男 24 例,女 16 例;平均年龄 (30.5±9.8) 岁;平均病程 (10.4±4.8) 年;发作类型: 颞叶癫痫 (temporal lobe epilepsy, TLE) 26 例,额叶癫痫 (frontal lobe epilepsy, FLE) 9 例,顶枕叶癫痫 5 例。常规影像组 40 例,男 22 例,女 18 例;平均年龄 (27.1±7.2) 岁;平均病程 (13.4±5.6) 年;发作类型: TLE 28 例, FLE 8 例,顶枕叶癫痫 4 例。两组性别、年龄、平均病程及发作类型等基线资料比较差异均无统计学意义 (均 $P>0.05$),具有可比性。

1.2 研究方法

1.2.1 检查方法

采用 3.0T MRI (GE Discovery MR750) 及 24 通道头线圈。常规序列包括轴位 T_1 加权成像 (T_1 -weighted imaging, T_1 WI)、 T_2 加权成像 (T_2 -weighted imaging, T_2 WI)、液体衰减反转恢复序列 (fluid-attenuated inversion recovery, FLAIR) 及垂直于海马长轴的冠状位 T_2 WI、FLAIR (重点观察海马形态与信号)。DTI 采用平面回波成像 (echo planar imaging, EPI) 序列, 64 个非共线性方向, $b=0, 1\ 000\ \text{s/mm}^2$, 重复时间 (repetition time, TR) 8 000 ms, 回波时间 (echo time, TE) 85 ms, 矩阵 128×128 , 视野 (field of view, FOV) $256\ \text{mm} \times 256\ \text{mm}$, 层厚 2 mm, 无间隔。数据传至 Brainlab iPlan® 3.0 工作站, 以 FiberTracking 1.0 软件后处理, 自动生成 FA 图、MD 图、方向编码彩色 (directionally encoded color, DEC) 图及三维脑白质纤维束示踪成像。

1.2.2 图像分析

由 2 名 >10 年经验的放射科医师双盲独立阅片, 分歧时引入第 3 名 >15 年资医师联合判读, 以多数意见或协商一致为最终结果。采用感兴趣区 (region of interest, ROI) 法, 在致痫灶中心及对侧镜像解剖区勾画 ROI ($20 \sim 40\ \text{mm}^2$), 测量 FA 与表观扩散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC) 值, 勾画时避开血管、脑沟、脑室边缘及伪影, 每个解剖区测 3 次取平均值。致痫灶定位金标准: 以术后病理和/或术后 12 个月无癫痫发作的临床随访结果为金标准。影像学阳性判定分层如下。

(1) MRI 阳性: 常规 MRI 见明确结构性异常 (如海马硬化、皮质发育不良), 即以该异常区为定位致痫灶。

(2) MRI 阴性: 需满足以下至少 2 项, ① 扩散加权成像 (diffusion weighted imaging, DWI) 局部高信号且 ADC 值升高; ② FA 值减低且 DEC 图示脑白质纤维束走行紊乱或连续性中断; ③ 纤维束示踪显示累及或紧邻重要功能纤维束。

将影像学定位结果与“金标准”比对, 判定定位准确性。

1.2.3 手术方案制订

DTI 指导组在常规评估基础上, 融合 DTI 参数异常区与纤维束追踪结果, 明确致痫灶边界及其与弓

状束、上纵束、皮质脊髓束等关键纤维束的空间关系, 个体化规划最小安全切除范围。常规影像组仅依据常规 MRI 及 VEEG 结果制订方案。

1.2.4 手术方法

所有手术由固定团队在显微镜下完成。TLE 行标准前颞叶切除+海马杏仁核切除术; 额、顶枕叶癫痫行致痫灶切除+多处软脑膜下横切术 (multiple subpial transection, MST)。术中全程行皮层脑电图 (electrocorticography, ECoG) 监测, 使用 4×5 或 4×6 栅格及条状电极, 监测至异常放电消失后 $\geq 10\ \text{min}$, 消失标准为连续 5 min 无癫痫样放电。两组切除范围均以解剖-电生理边界为准, 未常规测量切除体积。

1.3 观察指标

(1) 临床疗效: 术后随访 12 个月, 采用 Engel 癫痫术后疗效分级进行评估, 其中 Engel I ~ II 级为疗效优良, Engel III ~ IV 级为疗效不佳。术后 6 个月内维持原抗癫痫药物 (antiepileptic drugs, AEDs) 方案, 若 Engel I 级, 6 个月后每 3 个月评估减量, 优先减停不良反应大及非主要作用机制的药物。

(2) DTI 参数: 比较两组术前、术后 1 周及 12 个月 FA、MD、ADC 值变化。

(3) 并发症: 记录颅内感染、脑出血、脑水肿、神经功能缺损等, 区分为暂时性 (< 6 个月恢复) 与永久性 (≥ 6 个月)。

(4) 亚组分析: 比较不同脑区 (颞叶、额叶、顶枕叶) 定位准确率及疗效优良率差异。

1.4 统计学方法

采用 SPSS 26.0 软件。计量资料行 Shapiro-Wilk 正态性及 Levene 方差齐性检验, 正态分布的资料以均数 $\pm$ 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 组间比较用独立样本 t 检验, 组内用配对 t 检验; 非正态者用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以例 (%) 表示, 用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。FA 恢复程度与 Engel 分级 (有序分类) 的相关性采用 Spearman 秩相关。均报告 t 、 χ^2 与自由度。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组临床疗效比较

术后 12 个月随访, DTI 指导组疗效优良率显著高于常规影像组 ($\chi^2 = 4.111, P = 0.043$), DTI 指导组疗效显著优于常规组 (表 1)。

表 1 两组患者术后 12 个月 Engel 分级比较

组别	Engel I 级 [例 (%)]	Engel II 级 [例 (%)]	Engel III 级 [例 (%)]	Engel IV 级 [例 (%)]	优良率 (%)
DTI 指导组 (n=40)	32 (80.0)	6 (15.0)	2 (5.0)	0 (0)	95.0
常规影像组 (n=40)	24 (60.0)	8 (20.0)	6 (15.0)	2 (5.0)	80.0
χ^2					4.111
P					0.043

注：DTI：弥散张量成像。

2.2 DTI 参数变化分析

术前两组 FA、MD 值差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)。术后 1 周,DTI 指导组 FA 值显著高于术前($P<0.001$),MD 值、ADC 值显著低于术前(均 $P<0.001$);常规影像组变化则不明显(均 $P>0.05$)。术

后 12 个月 DTI 指导组 FA 持续升高、MD 降低,提示脑白质微结构持续修复。同时,两组间及组内 ADC 值对比显示,术后 12 个月 DTI 指导组 ADC 值较术前降低,且低于常规影像组,差异均有统计学意义(均 $P<0.001$)(表 2)。

表 2 两组手术前后 DTI 参数比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数 (例)	时间	FA 值	MD 值 ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$)	ADC 值 ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$)
DTI 指导组	40	术前	0.38 $\pm$ 0.06	0.98 $\pm$ 0.12	0.92 $\pm$ 0.15
		术后 1 周	0.42 $\pm$ 0.05	0.89 $\pm$ 0.10	0.85 $\pm$ 0.13
		术后 12 个月	0.45 $\pm$ 0.04	0.85 $\pm$ 0.09	0.80 $\pm$ 0.11
常规影像组	40	术前	0.37 $\pm$ 0.05	0.99 $\pm$ 0.11	0.93 $\pm$ 0.14
		术后 1 周	0.38 $\pm$ 0.04	0.97 $\pm$ 0.10	0.91 $\pm$ 0.13
		术后 12 个月	0.39 $\pm$ 0.05	0.95 $\pm$ 0.11	0.89 $\pm$ 0.14

注：DTI：弥散张量成像；FA：各向异性分数；MD：平均弥散率；ADC：表观扩散系数。DTI 指导组：组内比较（术前 vs. 术后 12 个月），FA 值： $t=5.225$, $d_f=39$, $P<0.001$ ；MD 值： $t=4.668$, $d_f=39$, $P<0.001$ ；ADC 值： $t=4.149$, $d_f=39$, $P<0.001$ ；常规影像组：组内比较（术前 vs. 术后 12 个月），FA 值： $t=1.888$, $d_f=39$, $P=0.066$ ；MD 值： $t=1.539$, $d_f=39$, $P=0.131$ ；ADC 值： $t=1.270$, $d_f=39$, $P=0.212$ 。DTI 指导组与常规影像组：组间比较（术后 12 个月），FA 值： $t=5.918$, $d_f=78$, $P<0.001$ ；MD 值： $t=4.447$, $d_f=78$, $P<0.001$ ；ADC 值： $t=3.201$, $d_f=78$, $P=0.002$ 。

DTI 指导组典型病例如图 1 所示。图 1A 为术前 FA 图及纤维束追踪显示,右侧钩束、下纵束走行紊乱、稀疏、连续性中断(黄色箭头),相应区域 FA=0.35,ADC=0.95 $\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ 。图 1B:同 1 例患者术后 12 个月复查,原病灶区白质纤维束密度增加,走行趋于规则(蓝色箭头),FA 回升至 0.46,ADC 降至 0.81 $\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$,提示脑白质微结构重塑。方向编码:红色=左右,绿色=前后,蓝色=上下。

2.3 致病灶定位准确率比较

DTI 指导组通过纤维束追踪清晰显示致病灶与周围脑白质间的三维关系,定位准确率为 92.5%

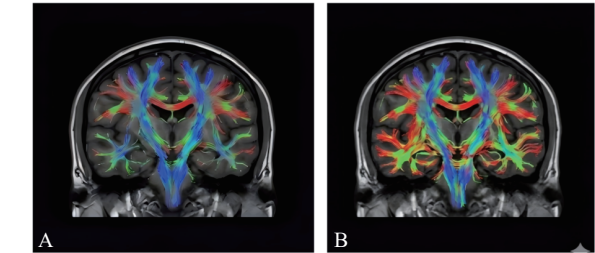


图 1 典型 TLE 病例术前及术后 12 个月 DTI 纤维束追踪显示对比图
注：TLE：颞叶癫痫；DTI：弥散张量成像。

(37/40);常规影像组定位准确率为 75.0%(30/40),其中 MRI 阴性 9 例(22.5%)。两组定位准确率比较差异有统计学意义($\chi^2=4.501$, $P=0.034$)(表 3)。

表 3 两组致病灶定位准确率比较

组别	定位准确例数 (例)	定位准确率 (%)	MRI 阴性例数 (例)	MRI 阴性定位准确例数 (例)	MRI 阴性定位准确率 (%)
DTI 指导组 (n=40)	37	92.5	9	7	77.8
常规影像组 (n=40)	30	75.0	11	3	27.3
χ^2		4.501			5.242
P		0.034			0.022

注：MRI：磁共振成像；DTI：弥散张量成像。

2.4 并发症

DTI 指导组并发症总发生率为 7.5% (3/40), 低于常规影像组的 15.0% (6/40), 但差异无统计学意义 ($P=0.288$)。分层分析显示, DTI 指导组仅发生暂时性并发症 (2 例言语障碍, 1 例颅内感染), 无永久性

神经损伤; 而常规影像组出现永久性记忆障碍 1 例及暂时性偏瘫 2 例等。DTI 指导组严重并发症 (永久性损伤) 的发生率 (0/40, 0) 低于常规影像组 (1/40, 2.5%), 提示 DTI 辅助规划有助于避免永久性功能损害的发生 (表 4)。

表 4 两组术后并发症比较 [例 (%)]

组别	总并发症	暂时性并发症	永久性损伤	具体并发症
DTI 指导组 ($n=40$)	3 (7.5)	3 (7.5)	0 (0)	颅内感染 1 例, 暂时性言语障碍 2 例
常规影像组 ($n=40$)	6 (15.0)	4 (10.0)	1 (2.5)	颅内感染 2 例, 脑出血 1 例, 暂时性偏瘫 2 例, 永久性记忆障碍 1 例
χ^2	1.130	—	—	
P	0.288	—	0.040*	

注: “—” 为未比较; 永久性损伤发生率比较采用 Fisher 确切概率法。

2.5 相关性分析

为验证 FA 参数恢复的临床意义, 将 DTI 指导组术后 12 个月的 FA 改善值 (术后 12 个月 FA-术前 FA) 与癫痫控制效果 (Engel 分级, I ~ IV 级赋值 1 ~ 4 分) 进行 Spearman 相关分析。结果显示, FA 恢复程度与癫痫控制效果呈显著正相关 ($r_s=0.62$, $P<0.01$), 即 FA 值恢复越好, Engel 分级越低, 癫痫控制效果越佳。

2.6 不同脑区亚组分析

本研究对不同发作类型的患者进行了亚组分析。TLE: DTI 指导组的定位准确率与疗效优良率均优于常规影像组, 但差异无统计学意义 (定位准确率: 92.3%: 82.1%, $P=0.226$; 优良率: 96.2%: 85.7%, $P=0.163$); FLE: DTI 指导组在定位准确率和疗效优良率上均显著优于常规影像组 (定位准确率: 88.9%: 50.0%, $P=0.049$; 优良率: 88.9%: 62.5%, $P=0.046$); 顶枕叶癫痫: 因样本量过小 (DTI 组 5 例, 常规组 4 例), 仅进行描述性分析。DTI 组 4 例定位准确、4 例预后良好; 常规组 2 例定位准确、2 例预后良好。

3 讨论

DRE 手术成功的关键在于术前致痫灶的精准定位, 但常规 MRI 对微小或影像学阴性病灶的诊断价值有限。DWI 通过捕捉水分子的弥散运动来反映组织微环境变化, 在癫痫发作期及发作后早期, 神经元兴奋性增高导致细胞毒性水肿、细胞外间隙缩小, 表现为 DWI 高信号及 ADC 值降低; 而在发作间期, 因神经元丢失和胶质增生, 细胞外间隙扩大, 表现为 ADC 值升高^[7]。DTI 作为 DWI 的进阶技术, 通过施加多方向的弥散敏感梯度, 量化水分子的各向异性弥散, 能够无创地显示脑白质纤维束的走行与微结构

完整性, 有效弥补了常规影像学的局限。本研究结果略高, 可能与单中心病例选择、手术团队经验集中等因素有关, 外推时需谨慎。DTI 指导组通过检测致痫灶区域 FA 值降低、MD 及 ADC 值升高, 成功识别出常规 MRI 阴性的隐匿病灶, 将定位准确率提升至 92.5%, 证实了 DTI 参数异常区可作为 MRI 阴性癫痫的重要定位标志。

DTI 对脑功能保护的核心价值尤为突出。本研究中 DTI 指导组通过纤维束追踪三维重建致痫灶与弓状束、上纵束、皮质脊髓束等关键功能纤维束的空间关系, 个体化设计最小安全切除范围, 术后暂时性言语障碍仅 2 例 (5.0%), 且无永久性神经功能缺损; 而常规影像组则出现了永久性记忆障碍及偏瘫病例。这提示 DTI 规划不仅保护了语言、运动功能, 还可能保护了海马-穹隆-乳头体等记忆相关环路^[8-10]。从机制上看, 致痫灶长期异常放电可导致局部轴突损伤、脱髓鞘改变及胶质细胞增生, 表现为 FA 值降低和 MD 值升高^[11]; 手术切除致痫灶后, 异常放电终止, 急性期水肿消退, 慢性期胶质增生减轻、残存轴突发生修复性芽生与髓鞘重塑, 使 FA 值逐步回升、MD 值下降。本研究 Spearman 相关分析证实, 术后 12 个月 FA 恢复程度与 Engel 分级呈显著正相关, 即脑白质微结构重塑越完善, 癫痫控制预后越佳, 支持将 DTI 参数作为疗效监测的客观影像学标志物。与之相比, 常规影像组因未依据纤维束信息规划切除范围, 可能导致功能性纤维束的误伤, FA 及 MD 参数恢复不明显。此外, 本研究通过统一术后 AEDs 阶梯式减量方案、双盲法阅片等措施, 有效控制了药物及评估偏倚对结果的干扰。

本研究存在以下局限性: 第一, 分组方式的选择

偏倚。本研究采取了历史分期纳入、统一手术团队集体决策等措施以减轻主刀医师主观倾向的影响,但回顾性设计本身无法完全消除该偏倚,可能使 DTI 指导组在术前评估强度、手术精细度等方面获得非对称优势,导致疗效差异被高估。改进方向是设计前瞻性随机对照试验,将患者随机分配至 DTI 辅助规划组与常规规划组。第二,单中心、80 例的样本量限制了结果的统计学效能与外部推广性,如顶枕叶癫痫亚组仅 9 例,无法进行有效统计推断。多中心、大样本的前瞻性验证是必要步骤。第三,术后 12 个月的随访时长仅能评估近中期疗效,无法捕捉远期复发风险。已有文献报道,癫痫术后 2~5 年复发率可达 10%~20%^[12],延长随访至 5 年对于验证 DTI 的长期预测价值至关重要。第四,DTI 技术本身存在固有局限,基于单张量模型,无法准确解析纤维交叉、分叉区域的复杂白质结构;ROI 勾画存在一定主观性;3.0 T 场强下对微小纤维束的分辨率有限。以上因素均可能影响纤维束追踪精度与参数测量的可重复性。

针对本研究的临床场景,未来可从以下方向展开。在技术层面,引入扩散峰度成像以量化非高斯扩散特性、神经突方向离散度与密度成像以特异性区分轴突损伤与脱髓鞘,有望更精细地表征致痫灶周围脑白质病理,提高 MRI 阴性癫痫的检出敏感度。在智能化层面,利用深度学习算法实现致痫灶自动分割与关键纤维束的自动识别,可减少人工勾画的主观性,提升流程标准化程度与可重复性。在临床应用层面,开发融合 DTI 纤维束约束的术中导航系统,实现影像-解剖-功能信息的实时对齐,帮助术者在镜下直观识别纤维束走行,将进一步推动癫痫外科向精准化、个体化方向发展。

综上,DTI 通过量化脑白质微结构变化并实现功能纤维束三维可视化,能够显著提升致痫灶的定位准确性,优化手术规划。DTI 指导的手术方案不仅可

改善癫痫控制效果,还可有效保护语言、记忆等关键神经功能,并通过术后 FA、MD 及 ADC 参数的演变监测脑白质重塑过程。尽管存在单中心回顾性设计带来的选择偏倚等局限,本研究仍为 DTI 作为 DRE 外科术前评估的有效工具提供了客观依据。未来亟需前瞻性、多中心随机对照研究加以验证。

参考文献

- [1] 何志荣, 许璐, 赵燕燕, 等. 2000—2020 年癫痫共病头痛患病率的 Meta 分析[J]. 黑龙江医学, 2023, 47 (5): 637-641.
- [2] 郭美华, 闫振宇, 郭畅, 等. 重症患者抗癫痫药物治疗药物监测分析[J]. 中国医院药学杂志, 2026, 46 (1): 52-57.
- [3] 王玉珍, 张静, 焦丽华, 等. MRI 检查癫痫发作为首要症状的可逆性胼胝体压部病变综合征的神经影像特征[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2022, 20 (10): 12-13.
- [4] 杨春兰, 张艺宁, 任洁制. 基于 DTI 的颞叶癫痫患者认知功能研究综述[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47 (1): 76-84.
- [5] 周明, 邓文超, 谢东波, 等. 基于弥散张量成像分析非病灶性颞叶癫痫患者脑白质网络结构变化与其执行功能障碍的关系[J]. 中国介入影像与治疗学, 2022, 19 (8): 492-496.
- [6] KWAN P, ARZIMANOGLOU A, BERG A T, *et al.* Definition of drug resistant epilepsy: consensus proposal by the ad hoc Task Force of the ILAE Commission on Therapeutic Strategies[J]. *Epilepsia*, 2010, 51(6):1069-1077.
- [7] 柯少峰, 李玲. 弥散张量成像在儿童脑性瘫痪早期诊断、合并症诊断、手术和康复疗效评价中的应用研究进展[J]. 山东医药, 2023, 63 (33): 97-100.
- [8] 周鹏园. 磁共振弥散张量成像在小儿颞叶癫痫中的应用价值[J]. 影像研究与医学应用, 2024, 8 (20): 28-30, 34.
- [9] 秦觅, 吉婷婷, 余成新. 弥散张量成像在颞叶癫痫中的研究进展[J]. 中风与神经疾病杂志, 2013, 30 (7): 670-672.
- [10] 黄雨达, 曹航, 王凝瑞, 等. 磁共振弥散成像技术在难治性癫痫手术治疗中的应用[J]. 中国临床神经外科杂志, 2024, 29 (9): 556-560.
- [11] LABATE A, GAMBARDELLA A, AGUGLIA U, *et al.* Diffusion tensor imaging and fiber tractography in the presurgical evaluation of drug-resistant epilepsy: a multicenter retrospective study[J]. *Seizure*, 2023, 108:42-49.
- [12] JEHI L, YARDI R, CHAGIN K, *et al.* Development and validation of nomograms to provide individualised predictions of seizure outcomes after epilepsy surgery: a retrospective analysis[J]. *Lancet Neurol*, 2021, 20(5):373-384.