

# 扩散张量成像(DTI)在难治性癫痫患者的手术前评估中的应用进展

徐伟竣, 石全红\*

重庆医科大学附属第一医院神经外科, 重庆

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月8日

## 摘要

药物难治性癫痫的手术效果在很大程度上依赖于术前评估的精确性。扩散张量成像(DTI)通过测量水分子扩散特性并重建白质纤维束, 为识别致痫网络、保护关键通路、设计手术路径以及预测手术结果提供了重要的支持。近年来, DTI在识别颞叶癫痫的白质微结构异常、辅助定位MRI阴性病例、保护视辐射和语言相关通路、预测术后发作及认知结果, 以及与SEEG和消融等微创技术的结合方面取得了显著进展。然而, DTI仍然受到单张量模型的局限、参数病理特异性不足、方法学的多样性以及术中脑移位等因素的影响。未来应推动数据采集与后处理的标准化、多模态的整合以及前瞻性多中心的验证, 以提高其在药物难治性癫痫术前评估中的临床可重复性和决策价值。

## 关键词

扩散张量成像技术, 难治性癫痫药物治疗, 手术前评估, 纤维束追踪分析, 预后预测

# Advances in the Application of Diffusion Tensor Imaging (DTI) in the Preoperative Evaluation of Drug-Resistant Epilepsy

Weijun Xu, Quanhong Shi\*

Department of Neurosurgery, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: March 8, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 8, 2026

## Abstract

The surgical outcome of drug-resistant epilepsy (DRE) depends heavily on the accuracy of preoperative

\*通讯作者。

文章引用: 徐伟竣, 石全红. 扩散张量成像(DTI)在难治性癫痫患者的手术前评估中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 1704-1716. DOI: 10.12677/acm.2026.1641409

evaluation. Diffusion tensor imaging (DTI) enables noninvasive assessment of white-matter microstructure and fiber tract architecture by quantifying the directional properties of water diffusion. As a result, it provides valuable information for epileptogenic network inference, protection of eloquent white-matter pathways, surgical trajectory planning, and prediction of postoperative outcomes. Recent studies have expanded the role of DTI from identifying microstructural abnormalities in temporal lobe epilepsy to assisting lesion detection in MRI-negative epilepsy, delineating the optic radiation and language-related pathways, predicting seizure and cognitive outcomes, and supporting stereo-electroencephalography and ablative strategies. Nevertheless, its clinical translation is still constrained by the limitations of the single-tensor model, the limited pathological specificity of DTI metrics, methodological heterogeneity across centers, and spatial mismatch caused by intraoperative brain shift. Future efforts should focus on standardized acquisition and post-processing, multimodal integration, and prospective multicenter validation to improve the reproducibility and decision-support value of DTI in the preoperative assessment of DRE.

## Keywords

Diffusion Tensor Imaging, Drug-Resistant Epilepsy, Preoperative Evaluation, Tractography, Outcome Prediction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

癫痫是一种普遍存在的慢性中枢神经系统疾病,其主要特征是脑神经元异常同步放电引起的反复短暂神经功能障碍[1]。根据流行病学研究,全球癫痫的发病率大约在 0.5%到 1.0%之间,其中约 70%的患者在接受规范的抗癫痫药物治疗后能够获得良好的控制,但仍有约 30%的患者发展为药物难治性癫痫(DRE) [2]。

对于 DRE 患者,外科手术被认为是实现长期控制发作的最有效治疗方法之一,约有 50%到 70%的患者能够达到无发作状态[3]。然而,手术的效果在很大程度上依赖于术前对致痫灶的准确定位,以及对其与周围重要脑区和白质纤维束的解剖关系的精确评估。术前评估的主要目标是明确致痫灶的位置、范围及其病理特征,并阐明其与语言区、运动区等关键功能区及重要白质通路之间的关系,从而为手术方案的制定、风险评估和预后判断提供依据。传统的结构影像学检查(如常规 MRI)主要反映脑组织的宏观形态变化,对轻度局灶性皮质发育不良和微小海马硬化等隐匿性致痫灶的检测敏感性有限,难以满足精确手术规划的需求[4]。

扩散张量成像(DTI)是一种基于扩散加权成像的磁共振成像技术,通过量化水分子扩散的各向异性,能够无创地反映脑白质的微观结构完整性及纤维束的走向。结合纤维束追踪技术,DTI 能够实现关键白质通路的三维可视化,为风险分层、手术入路设计及切除边界的优化提供重要依据,尤其适用于病灶邻近重要纤维束或需要在有限切除与功能保护之间进行精细权衡的病例[5]-[13]。同时,越来越多的研究表明,癫痫并非仅仅是“局灶性病灶”所致,而是具有显著的网络特性;结构连接组的异常与术后发作及认知结果密切相关,这也推动了“连接组学-机器学习-虚拟切除”等新策略的发展[12]-[20]。因此,DTI 为 DRE 术前的精准评估提供了重要的补充,对推动癫痫外科向精准化和个体化方向的发展具有重要的研究价值和临床意义。

## 2. DTI 技术基础与术前评估价值

### 2.1. 常用参数及其解释边界

DTI 技术可以定量分析组织内水分子的扩散特性, 从而识别脑组织的微观结构变化, 并以无创方式展示脑白质纤维束的微观及形态特征, 现已在神经影像学研究和临床应用中得到广泛使用。DTI 主要通过一系列量化指标来描述白质的微结构状态, 常见的指标包括各向异性分数(FA)、平均扩散率(MD)、径向扩散率(RD)和轴向扩散率(AD) [18]。

FA 是 DTI 中最常见且最具代表性的量化指标, 主要用于反映水分子扩散的方向性, 并与白质髓鞘的完整性、轴突的密度以及纤维的有序排列密切相关。在癫痫患者中, FA 的降低通常表明致痫灶及其周围区域可能存在轴突的变性、髓鞘的脱失或纤维密度的减少; 而 MD 则反映水分子在三维空间中的整体扩散程度及其所受的阻力, 其异常变化可能暗示神经组织结构的损伤[19]-[21]。RD 和 AD 分别描述水分子在垂直于神经纤维主轴方向和沿着神经纤维主轴方向的扩散特征。

在与癫痫相关的白质病变中, FA 值的降低和 MD 值的升高通常被解释为轴突密度的减少、髓鞘的损伤或纤维一致性的降低。然而, 这种解释并不够特异, 因为多种因素, 如炎症反应、胶质细胞增生、纤维交叉以及部分容积效应, 均可能对这些指标产生影响。因此, DTI 参数更应被视为“微观结构异常的敏感影像学指标”, 而不是某一特定组织学机制的直接定量反映。其结果需要与临床症状、病理结果及其他影像学检查(如定量 T1/T2、PET、fMRI)相结合进行综合分析[9] [10] [22]。

### 2.2. 纤维追踪方法及高阶扩散模型

DTI 纤维束追踪是推动 DTI 在临床应用中发展的重要步骤。该技术依赖于体素内主扩散方向的连贯性, 通过追踪相邻体素中水分子主扩散方向的一致性, 能够实现脑白质纤维束的三维可视化重建, 为脑网络解剖研究和术前风险评估提供了直观的影像学工具。

根据不同的算法, DTI 纤维束追踪大致可以分为两种类型: 确定性追踪和概率性追踪。确定性追踪将当前体素的主要扩散方向视为唯一的传播路径, 并在设定的阈值下持续追踪, 直到到达脑组织的边界或扩散方向发生显著变化; 这种方法直观且计算效率高, 更适合临床应用。相对而言, 概率性追踪则是通过估算体素内扩散方向的概率分布, 而不是依赖于单一的主方向, 反复生成多条可能的路径并进行统计汇总, 最终形成纤维走向的概率分布图。这种方法在处理低各向异性区域和方向不确定性方面表现更佳, 但对参数设置和先验信息的依赖性也更强。

必须强调的是, DTI 在纤维交叉区域存在固有的模型限制, 这可能导致纤维束重建出现假阳性或假阴性。因此, 在复杂的白质结构重建中, 使用“超越 DTI”的高阶扩散模型(例如 CSD、HARDI、DSI 等)能够显著提升视辐射、语言相关纤维等复杂通路的重建精度, 并且这些方法已逐渐被应用于癫痫微创消融和 SEEG 规划中[9] [23]。

## 3. DTI 在癫痫灶的定位及癫痫网络的评估中发挥的作用

### 3.1. 颞叶癫痫的白质微结构异常

DTI 技术能够有效识别与颞叶癫痫(temporal lobe epilepsy, TLE)相关的白质微结构损伤。研究表明, 伴随海马硬化的 TLE 患者(TLE-HS)在浅层和深层白质中均可观察到广泛的扩散异常, 主要表现为 FA 值降低和 MD 值升高[18]。通过对感兴趣区域(region of interest, ROI)的分析发现, 患者致痫灶同侧的 FA 值通常显著低于对侧, 而深部白质, 尤其是与海马相关的区域, 常常显示出双侧不对称的扩散异常[18]。与健康对照组相比, TLE 患者的双侧颞叶、额叶及边缘系统均显示出明显的微结构变化, 其中海马旁回、

穹窿和钩束等区域的异常尤为突出[18]。值得一提的是, 神经突方向离散度与密度成像(neurite orientation dispersion and density imaging, NODDI)在评估海马亚区(如 CA1 区)神经突密度变化方面可能更具优势, 而传统的 DTI 参数在微观损伤程度的评估上可能存在低估的情况[24] [25]。

### 3.2. 结构连接异常与网络拓扑重构

DTI 衍生的结构连接组学为探讨癫痫网络的拓扑重构提供了新的视角。基于 DTI 纤维追踪的研究显示, 反复发作会导致 TLE 患者的白质结构网络逐步退化, 表现为全脑网络的整体效率降低以及局部模块化的增强[26]。纵向研究进一步揭示, 随着病程的延长, 患者的网络节点聚类系数不断下降, 这一变化与神经认知功能的恶化密切相关[4]。

最新的连接组研究表明, 结构性连接的异常并不局限于某一特定通路, 而可能反映出更为广泛的网络重组现象。除了颞叶癫痫, 额叶癫痫同样可能表现出白质结构网络的异常及其拓扑变化[27]。对于术前评估, 这类发现的重要性在于: 当结构性 MRI 显示的病灶不典型、边界模糊或存在多个可疑病灶时, DTI 和结构连接组分析可以作为额外的证据, 帮助形成更符合网络机制的致病假设, 并为后续的电生理验证指明方向。

### 3.3. MRI 阴性癫痫的辅助定位价值

在 MRI 结果为阴性或病灶边界模糊的局灶性癫痫病例中, 扩散张量成像(DTI)能够通过揭示局部白质的微观结构及其连接异常, 提供超出传统结构对比的额外信息。已有研究尝试将 DTI 与常规 MRI 特征结合, 以实现局灶性皮质发育不良(FCD)的自动化检测, 从而为术前识别微小或隐匿性病灶开辟新的可能性[28]。

最近的研究深入分析了“通过切除扩散异常区域来缓解发作”的关联, 指出扩散 MRI 的异常可能与致病网络中的重要节点有更紧密的联系, 这为 MRI 阴性或复杂病例的治疗方案改进提供了新的视角[29]。然而, 需要注意的是, DTI 的异常并不直接等同于致病灶本身, 它更适合作为生成假设的工具, 并应与 SEEG、皮层电图及代谢成像等结果进行相互验证。

## 4. DTI 在手术规划与功能保护中的应用

### 4.1. 视觉通路的保护: 视辐射及 Meyer 环的定位分析

前颞叶切除术(anterior temporal lobe resection, ATR)是治疗顽固性颞叶癫痫的一种传统手术方法。然而, 若在手术中损伤 Meyer 环, 可能会导致对侧上象限的视野缺失, 从而影响患者的驾驶能力和生活质量。Winston 等人的研究表明, DTI 纤维束追踪技术能够在手术前较为准确地描绘视辐射与病灶之间的空间关系, 这对于术前的风险评估和手术路径的规划具有重要的意义。此外, 术后进行的配准分析也可以用来验证纤维束损伤程度与视野缺失之间的关系[5] [6]。

系统综述同样指出, DTI 在 ATR 手术前的规划中展现出潜在的应用价值, 但仍需更大规模的研究和标准化流程来支持这一点, 特别是在解读不同 tractography 方法所产生的结果差异时应保持谨慎[7]。针对 Meyer 环前伸长度的显著个体差异, 已有研究专门对其进行追踪, 以优化颞叶癫痫切除的规划, 旨在降低视野并发症的风险。近年来, 也有研究尝试将视辐射的追踪结果实时叠加到导航界面, 以验证其在实时应用中的可行性, 并为“功能保留”与“发作控制”之间的平衡提供新的解决方案[11]。

### 4.2. 语言通道的评估: 从核心保护到语言结果的预测

语言功能的损害不仅与皮层切除的范围有关, 深层白质纤维(例如弓状束、下额枕束和钩束等)的损伤

同样会导致命名能力的下降和语义流畅性的减弱。近年来, 许多研究更直接地探讨了纤维束损伤与语言结果之间的关系。Binding 等人在纵向研究中分析了白质纤维束损伤与语言变化之间的联系, 提出以“纤维束保留”为导向的个性化方案可能有助于降低语言并发症的发生[30]; 而 Trimmel 等则指出, 基于语言功能 fMRI 引导获得的语言相关白质束的体积或定量指标与术后命名能力的下降存在关联, 这些指标可用于术前的风险评估和医患沟通[31]。

与此同时, 已有研究将图论分析与机器学习相结合, 建立了一个预测框架, 以解释命名任务的变化, 并尝试将网络指标的变化纳入语言结果的评估中[32]。在微创消融手术中, 例如对优势侧岛叶进行激光消融, 已有个案证据表明, 利用 DTI 技术可以保护与语言相关的通路, 从而尽量保留语言功能[33]。总体来看, DTI 在语言评估中的作用正逐渐从单纯的“显示通路位置”转变为“提供可量化的指标, 以辅助手术策略的选择”。

### 4.3. 保护记忆及其他认知能力: 重视不同通路的特异性与手术方式的差异

在优势半球颞叶手术中, 术后记忆功能的下降是选择手术方式和进行风险评估时的一个重要考量。最近的研究将“切除”和“消融”等不同手术方法纳入了白质网络风险分析的框架中。Kaestner 等人对不同手术方式对术后记忆功能下降风险的影响进行了比较, 指出术前白质网络的特征及特定通路的非对称性有助于理解不同手术方式所带来的认知损失, 从而支持更为细致的个体化决策[34]。此外, 越来越多的连接组研究表明, 与单纯的切除体积相比, 手术引起的结构断连模式可能更能解释术后认知的变化[35][36]。因此, 在临床实践中, 应将 DTI 指标与神经心理学基线、侧化信息及其他功能影像结果相结合, 构建一个多因素的预测模型, 而不是仅依赖单一的阈值进行判断。

### 4.4. 结构 - 功能整合与安全边界界定

准确评估白质纤维束与功能性皮层之间的空间关系, 对于确定安全的切除边界至关重要。通过纤维束追踪技术, 可以直观地展示弓状束、皮质脊髓束等关键传导通路与语言区、运动区之间的三维解剖关系[37][38]。概率性纤维追踪的研究表明, 丘脑等深层核团与皮层功能区之间存在广泛的白质连接, 其结构的完整性与术后功能的保留有着密切的关系。术前的扩散成像不仅能够量化关键纤维束的微结构异常(例如 FA 值降低), 还可以结合功能磁共振成像(fMRI)的激活图谱, 更加准确地界定与功能相关的白质通路的保护范围[38]。结构与功能的耦合分析进一步增强了功能边界界定的可靠性, 有助于减少手术中对神经网络的意外损伤[39][40]。

## 5. 预后预测

### 5.1. 术后发作结局预测: 从沿束指标到网络级风险建模

DTI 相关的术后发作结局预测研究大致经历了三个递进阶段。第一阶段以沿束定量分析为主, 强调与致痫灶相连的关键纤维束是否存在可测量的微结构异常。Keller 等通过自动纤维定量分析显示, 穹窿/海马旁白质束等区域的术前扩散异常与术后发作持续相关, 提示“沿特定白质束的异常强度与分布”可能较单一 ROI 平均值更具判别力[41]。

第二阶段则转向结构连接组学。Bonilha 等提出, 若患者术前个体化连接组中存在更广泛的颞叶 - 颞外网络异常, 则术后达到持续无发作的概率下降; Taylor 等进一步把术后切除掩膜引入网络模型, 提出可在术前模拟不同切除方案对结构网络的影响, 从而把“网络改变幅度”作为发作结局预测的代理指标[12][13]。随后, Sinha 等利用“术前网络 - 预计保留网络”的节点异常负荷构建模型, 不仅可预测 1 年

结局, 还与 5 年内复发风险相关, 推动了从静态异常描述走向可量化个体风险估计[42]。

第三阶段则更多借助机器学习与多模态融合。Johnson 等将 FA 和全脑结构连接特征纳入监督学习框架, 对术后是否无发作进行分类, 在左右侧 TLE 亚组中均取得中等以上判别性能; Zhou 等进一步整合术前扩散 MRI 与功能 MRI, 以默认网络的结构—功能耦合特征建立模型, 显示默认网络的术前高耦合与术后复发密切相关[17] [39]。这类研究提示: 对于发作结局, 真正具有临床潜力的并非某一个“万能 DTI 指标”, 而是围绕致痫网络传播与术后残余网络构建的综合表型。

## 5.2. 术后认知结局预测: 通路特异性优于单纯切除体积

与发作结局相比, DTI 对认知结局的预测更容易体现明确的解剖—功能对应关系。现有证据表明, 术后语言记忆、命名和语义流畅性等变化, 并不能仅由“切除体积大小”解释, 术前白质网络的完整性与侧化模式往往更关键。Stasenko 等在前瞻性双中心队列中发现, 左侧 TLE 患者若术前表现出更明显的内嗅皮层浅层白质和钩束 FA 左侧化, 则在前颞叶切除后更易出现言语记忆下降; 其由海马体积与内嗅皮层白质不对称性构建的模型, 对逻辑记忆下降具有较高 AUC [43]。

进一步地, Kaestner 等把前颞叶切除(ATL)与立体定向激光杏仁核海马消融(SLAH)放在同一框架下比较, 发现海马体积不对称可同时提示两类术式的记忆下降风险, 而钩束完整性对 ATL 更为敏感, 因为该纤维在 ATL 中更容易被切断[34]。这一发现对临床决策的意义在于: DTI 不只是帮助回答“能不能手术”, 还可以帮助回答“切除还是消融更合适、哪条通路更值得保留、应如何与患者沟通具体认知风险”。此外, 不同的认知表型与特定白质损伤模式之间的关联, 为个体化风险分层提供了重要的依据[44]。

## 5.3. 证据质量评估与争议点辨析

仅从研究数量看, DTI 用于预后预测的文献正在快速增加; 但若从循证质量出发, 这一领域仍主要停留在“可行性与探索性证据”阶段。多数研究为单中心、回顾性设计, 样本量多在 35~70 例之间; 即便采用交叉验证或留一法, 也很难替代真正独立队列的外部验证。更重要的是, 不同研究使用的终点定义并不一致: 有的以 ILAE 1 为“良好结局”, 有的以 Engel 1A 为无发作; 认知结局则又涉及可靠变化指数、原始分数变化或特定量表下降, 导致模型之间难以直接横向比较, 见表 1。

**Table 1.** Key study and evidence quality overview of DTI in postoperative prognosis prediction for drug-resistant epilepsy  
**表 1.** DTI 用于药物难治性癫痫术后预后预测的关键研究及证据质量概览

研究	样本量/设计	结局领域	DTI/网络方法	主要效能	外部验证	主要局限与批判性评论
Bonilha 2015 [13]	n = 35; 回顾性单中心	发作结局	术前扩散 MRI 结构连接组; 颞叶—颞外侧子网络异常评分, 并与临床变量联合	网络模型约 83% 准确率; 联合临床后约 88% 准确率, 特异度 94%	无	较早证明“个体化连接组”可用于预后推断, 但样本偏小, 阈值与特征均由同队列导出, 乐观偏倚风险较高。
Keller 2017 [41]	n = 43; 回顾性单中心	发作结局	自动纤维定量(AFQ), 沿束分析钩束、穹窿/海马旁白质束等 MD 异常	结局相关 AUC 约 0.81; 联合阈值后敏感度 84%, 特异度 89%	无	可解释性强、通路特异性好, 但阈值带有事后选择色彩, 且缺乏独立验证。
Taylor 2018 [12]	n = 53; 回顾性单中心	发作结局	术前 dMRI 结构网络 + 术后切除掩膜; ChaCo-like 网络改变与图论指标	准确率 79.2%, 特异度 65%	无	提出“虚拟切除/网络改变”框架, 概念创新; 但以术后切除掩膜反推模型, 距离真正术前决策支持仍有一步。

续表

Sinha 2021 [42]	n = 51; 回顾性 单中心	术前网络与预计保留 发作结局 网络的节点异常负荷 + 临床变量	AUC $0.84 \pm 0.06$ ; 特异度 $0.89 \pm 0.09$	无	较好连接了短期结局与长期 复发风险, 但仍属内部建模 验证, 泛化能力未知。	
Johnson 2022 [39]	62 例 TLE + 89 例对照; 回顾性	DWI 衍生 FA 与结构 连接特征; joint-ICA + 监督学习	左右侧术后无发作分类 AUC 分别约 0.80 和 0.775	无	提升了模型可解释性, 但手术 亚组进一步分层后有效样本 有限, 真实临床稳健性仍待 检验。	
Zhou 2024 [17]	71 例 TLE + 48 例对照; 回顾性	扩散 MRI + rs-fMRI; 默认网络结构 - 功能 耦合(SFC)模块特征	AUC 0.893; 准确率 0.887	无	性能较高, 但已超出“DTI 单模态”范畴; 若不严格外部 验证, 易受多模态高维特征 过拟合影响。	
Stasenko 2022 [43]	n = 42; 前瞻性 双中心	认知结局 (记忆)	海马体积与内嗅皮层 浅层白质/钩束 FA 不 对称性	逻辑记忆模型 AUC 0.89; 联想记忆 AUC 0.79	无	属当前认知预测中方法学较强 证据之一, 但主要适用于 ATL 及左侧 TLE 的言语 记忆风险。

表 1 汇总扩散张量成像(DTI)及基于 DTI 的脑结构网络分析用于药物难治性癫痫术后发作、认知结局预测的关键研究, 系统展示各研究的样本设计、分析方法、预测效能、外部验证情况, 并剖析其方法学局限与证据质量短板, 为该领域研究的临床转化与后续优化提供参考。

此外, 方法学异质性也是争议核心。研究所用 DTI 特征既包括沿束 FA/MD, 也包括节点异常负荷、全脑结构连接组、虚拟切除指标, 甚至扩展到结构 - 功能耦合。模型性能看似可观, 但部分研究存在高维特征与小样本不匹配、特征筛选与建模在同一数据集中完成、校准信息缺失以及临床增益(incremental value)报告不足等问题。因此, 当前更合理的临床定位应是: 把 DTI 视为辅助风险分层工具, 而非独立决定术式选择或手术适应证的“单一裁决者”。

综合来看, 当前证据可概括为“机制可信、信号稳定, 但证据级别仍不足以支持单独临床决策”。其积极面在于: 无论采用沿束分析还是连接组学, 不良结局患者往往表现出更广泛的白质异常或更高的残余网络负荷, 这一方向在不同研究中具有相当一致性。其争议面则在于: 尚缺少一个经多中心标准化验证、可直接嵌入临床流程、并能稳定优于既有临床模型的 DTI 预测器。因此, 在当前阶段, DTI 更适合与临床、电生理、PET/fMRI 及神经心理学资料共同用于综合判断, 而不宜替代传统术前评估框架。

## 6. 术中融合与微创路径规划: DTI 与 SEEG/消融方法的整合

### 6.1. SEEG 电极设计: 从“避血管”扩展到“兼顾白质网络约束”

随着 SEEG 成为复杂局灶性癫痫评估的重要工具, 电极设计的核心目标已不再只是“能否到达灰质靶点”, 还包括“在到达靶点的过程中尽量不破坏关键白质通路”。传统轨迹规划强调避开血管、脑室和静脉窦, 而在优势半球语言区、视觉通路邻近病灶或岛叶/深部病灶中, DTI 提供了额外的白质风险维度: 术前可将弓状束、IFOF、皮质脊髓束、视辐射等作为轨迹规划中的禁入或高风险走廊, 从而在保证取样覆盖的同时降低由穿刺本身造成的网络干扰。

更进一步, SEEG 本身并非只记录灰质。最新研究显示, 大量 SEEG 接触点实际上位于白质或灰白质交界区, 且多数电极会穿越重要白质束, 这意味着 SEEG 未来不仅可用于灰质致病区定位, 还可能承担“白质刺激 - 因果功能验证”的角色[45]。从这一角度看, DTI 在 SEEG 中的价值不应局限于术前避让, 更应延伸到“预判哪些白质束将被取样、哪些刺激效应可被解释、哪些通路值得被纳入网络假设”。

## 6.2. SEEG-RFTC: 基于纤维束保护的消融接触点筛选

在 SEEG 引导的射频热凝(RFTC)中,真正需要回答的问题不是“哪个接触点最像起始区”,而是“哪个接触点在可治疗的同时最安全”。Song 等针对邻近视觉功能区的病例采用 DSI/DTI 追踪视辐射,并以前瞻性队列提出:拟热凝接触点与视辐射之间至少保留约 3.5 mm 距离,可显著降低视野缺损风险[23]。这提示微创消融的安全边界完全可以从经验判断转化为可量化的白质约束。

不过,这种“距离阈值”并不应被机械复制。其有效性受到扩散模型、束追踪算法、配准误差、电极金属伪影以及个体解剖差异等多因素影响。也就是说,DTI 在 SEEG-RFTC 中的真实贡献,并不只是给出一个数字,而是把“白质损伤风险”显性化,使治疗团队能在疗效与并发症之间做更透明的权衡。

## 6.3. 激光间质热疗(LITT): 从通路显示到热安全边界管理

LITT 将“毫米级轨迹偏差”直接转化为“毫米级热损伤差异”,因此比开放切除更依赖术前白质映射的准确性。在优势侧岛叶癫痫个案中,DTI 追踪成功帮助规划后岛叶激光消融边界,在完整消融 SEEG 确定的发作起始区域同时,保留了弓状束/上纵束及 IFOF 等语言相关通路,术后未出现新的语言缺损[33]。这一经验说明,DTI 在 LITT 中最重要的价值并非证明某条纤维“存在”,而是为热消融边界提供“何处必须停下”的解剖学依据。

另一方面,LITT 的风险并不限于语言通路。多中心回顾性分析显示,LITT 后具有临床意义的视功能缺损多定位于消融后段,尤其与海马体/尾部附近更大的热能释放、较外侧的轨迹以及早期视觉通路受热有关[46]。因此,激光轨迹设计不应只依赖目标命中率,还应综合考虑视辐射、丘脑外侧膝状体、脑干及脑神经通路与预期热场之间的关系。

此外,通过将 DTI 与电生理或代谢信息进行多模态影像融合,可以进一步提升致病灶的定位精度[47]。总体来看,微创时代的核心问题不再是“是否能够追踪纤维束”,而是“如何量化追踪结果的不确定性并将其纳入手术决策”,这需要更严格的质量控制、更高的研究透明度以及跨中心的可重复性验证。

## 7. 局限性与挑战

传统的 DTI 模型仅依赖于单一的主纤维方向,因此在处理纤维交叉、分叉或复杂走行区域的扩散特征时存在固有的局限性[20]。在研究颞叶癫痫时,海马及其周围的白质结构(例如穹窿-海马通路)具有复杂的解剖关系,模型的简化可能导致相关结果的误解[48]。高角度分辨率扩散成像(HARDI)和多壳层采样技术(如 NODDI)通过增加梯度方向和构建模型复杂性来增强交叉纤维的分辨能力[49] [50],但这也对梯度场强度、采集方案和后处理算法提出了更高的要求,因此在常规临床应用中仍然受到限制[49] [51]。此外,术中对白质束的可视化在很大程度上依赖于术前的重建结果,如果在复杂区域的纤维追踪中出现错误,可能会直接影响手术的判断[52]。

方法学的多样性显著影响了不同中心之间 DTI 结果的可比性和推广性。各个研究团队在 b 值、扩散方向数量、终止阈值(如 FA、曲率和角度)、ROI 策略(包括解剖 ROI、功能 ROI 及自动分割)以及追踪算法(无论是确定性还是概率性)等方面存在差异,这些都可能导致同一患者的通路形态和量化结果出现不同[7] [9]。这种情况不仅会削弱临床医生对 DTI 证据的信任,还可能影响患者对风险沟通的理解和接受程度,从而限制其在实际决策中的应用。因此,DTI 在临床转化中的关键不在于“追踪结果的美观程度”,而在于“结果的可重复性、可审查性和可解释性”。

此外,DTI 参数(例如 FA 和 MD)在病理学解释方面缺乏特异性。FA 的降低可能与轴突损伤、髓鞘丧失或纤维结构的完整性下降有关,而 MD 的升高则可能指示水肿、胶质细胞增生或神经元数量的减少[19] [20] [21]。在对阿尔茨海默病与颞叶癫痫的比较研究中,同一脑区的 DTI 参数甚至可能表现出相反的

变化趋势,这使得其与特定病理机制的对应变得复杂[48][49]。新兴技术如扩散峰度成像(DKI)和 NODDI 通过多室模型来区分细胞内外的扩散成分,某种程度上提高了生物学解释的能力[43][49]-[51],但在不同中心之间的一致性和临床应用的有效性仍需进一步验证。

尽管术前的影像学结果可能是可靠的,但在手术过程中,脑部位移和导航配准的误差仍然可能导致显著的时空不一致。脑脊液的释放、组织的牵拉、脑部肿胀以及重力的影响都可能改变脑组织的形态,从而使得术前的纤维束在导航系统中的叠加位置与手术中实际的解剖结构出现偏差;当手术接近关键的白质通路边缘时,这种偏差可能显著提高功能损伤的风险[6][52]。因此,如果希望在手术中使用扩散张量成像(DTI)进行导航或微创路径规划,就必须充分考虑脑部位移的影响,并尽量引入术中更新或形变校正的方法,以防止“表面精准”成为新的误差来源。

## 8. 未来展望

在未来,DTI 在癫痫手术前评估的重点将逐渐从“更精确地描绘纤维束”转向“更有效地利用纤维束信息来辅助临床决策”。这一变化表明,DTI 不仅要提升关键通路保护的可靠性,还需增强对致病网络结构的可解释性,以便在术前对不同手术方案进行更具临床实用性的比较。

首先,标准化与多中心一致性将是决定该领域能否真正进入临床指南的关键。围绕采集参数、预处理、束追踪流程、特征提取、结局定义和报告方式建立最低共识,应当优先于继续堆叠“更复杂的黑箱模型”。对于预测研究,除了 AUC,更应常规报告校准、决策曲线和相对于临床基线模型的增益,以避免“统计学显著但临床无增益”的情况。

其次,在技术方面,近年来高空间分辨率的 HARDI 技术已经能够实现较高的各向同性分辨率,并在一定程度上减少了数据采集所需的时间。新型的混合扩散成像(HYDI)方法通过结合多层壳体采样,能够同时获取 DTI 和 HARDI 的信息,从而在高角分辨率与临床应用效率之间取得平衡[53]。未来仍需进一步改进采集序列,采用径向采样策略以降低运动伪影的影响[54],并利用深度学习技术提升低角度采样数据的重建效果[55]。

微创技术的发展将进一步凸显 DTI 在毫米级安全边界管理中的价值。SEEG-RFTC 和 LITT 等技术旨在通过最小化治疗体积来实现最大的临床效果,因此,保护关键的白质通路应当从“可选项”转变为路径规划中的“硬性约束”。未来的可能发展方向包括:将视辐射、语言相关纤维等纳入安全约束条件,以优化轨迹规划;建立围术期及术中快速畸变校正和影像更新机制,以减少因脑移位引起的时空偏差;在高风险通路评估中优先使用高阶扩散追踪,并建立可重复的安全距离阈值体系,从而推动“手术方式-白质通路-安全边界”形成更为标准化的临床决策框架[23][56]。

最后,一个值得关注的新方向是“白质因果测绘”和“数字化虚拟手术”。SEEG 研究已提示,白质接触点并非无意义的过路区域,而可能成为刺激、传播与功能测绘的重要窗口[45]。若将这类信息与结构连接组、颅内电生理和虚拟切除模型整合,未来有望形成面向个体患者的数字化手术沙盘:在真正手术之前,先比较不同切除/消融方案对白质网络、发作控制和认知风险的综合影响。

## 9. 结论

DTI 及其纤维束追踪技术已经从单纯“显示重要通路”的辅助工具,逐渐演变为兼具风险分层、术式比较、路径设计和结局预测功能的综合性术前评估手段。在癫痫外科中,其价值不仅体现在视辐射、语言通路和记忆相关白质束的保护,更体现在对致病网络及术后残余网络的结构化表征。

不过,现阶段 DTI 用于预后预测和微创决策的证据总体仍属低到中等水平:研究多为单中心、样本量有限、方法差异较大,外部验证明显不足。因此,DTI 最合适的临床定位仍是“增强术前评估的附加

证据”，而不是脱离电生理、结构 MRI、PET/fMRI 和神经心理学的独立裁决工具。

未来，随着高阶扩散成像、标准化流程、多中心前瞻性验证以及与 SEEG、MR 热成像和机器人规划系统的深度融合，DTI 有望进一步推动癫痫外科从经验驱动走向网络驱动、从解剖保留走向量化安全边界管理，并最终成为精准化和个体化手术决策的重要组成部分。

## 参考文献

- [1] Fisher, R.S., Cross, J.H., French, J.A., Higurashi, N., Hirsch, E., Jansen, F.E., *et al.* (2017) Operational Classification of Seizure Types by the International League against Epilepsy: Position Paper of the ILAE Commission for Classification and Terminology. *Epilepsia*, **58**, 522-530. <https://doi.org/10.1111/epi.13670>
- [2] Kwan, P., Arzimanoglou, A., Berg, A.T., Brodie, M.J., Allen Hauser, W., Mathern, G., *et al.* (2010) Definition of Drug Resistant Epilepsy: Consensus Proposal by the Ad Hoc Task Force of the ILAE Commission on Therapeutic Strategies. *Epilepsia*, **51**, 1069-1077. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2009.02397.x>
- [3] Engel, J. (1996) Surgery for Seizures. *New England Journal of Medicine*, **334**, 647-653. <https://doi.org/10.1056/nejm199603073341008>
- [4] Salmenpera, T.M., Simister, R.J., Bartlett, P., Symms, M.R., Boulby, P.A., Free, S.L., *et al.* (2006) High-Resolution Diffusion Tensor Imaging of the Hippocampus in Temporal Lobe Epilepsy. *Epilepsy Research*, **71**, 102-106. <https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2006.05.020>
- [5] Winston, G.P., Yogarajah, M., Symms, M.R., McEvoy, A.W., Micallef, C. and Duncan, J.S. (2011) Diffusion Tensor Imaging Tractography to Visualize the Relationship of the Optic Radiation to Epileptogenic Lesions Prior to Neurosurgery. *Epilepsia*, **52**, 1430-1438. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2011.03088.x>
- [6] Winston, G.P., Daga, P., Stretton, J., Modat, M., Symms, M.R., McEvoy, A.W., *et al.* (2012) Optic Radiation Tractography and Vision in Anterior Temporal Lobe Resection. *Annals of Neurology*, **71**, 334-341. <https://doi.org/10.1002/ana.22619>
- [7] Piper, R.J., Yoong, M.M., Kandasamy, J. and Chin, R.F. (2014) Application of Diffusion Tensor Imaging and Tractography of the Optic Radiation in Anterior Temporal Lobe Resection for Epilepsy: A Systematic Review. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, **124**, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2014.06.013>
- [8] James, J.S., Radhakrishnan, A., Thomas, B., Madhusoodanan, M., Kesavadas, C., Abraham, M., *et al.* (2015) Diffusion Tensor Imaging Tractography of Meyer's Loop in Planning Resective Surgery for Drug-Resistant Temporal Lobe Epilepsy. *Epilepsy Research*, **110**, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2014.11.020>
- [9] Farquharson, S., Tournier, J.D., Calamante, F., Fabin, G., Schneider-Kolsky, M., Jackson, G.D., *et al.* (2013) White Matter Fiber Tractography: Why We Need to Move beyond DTI. *Journal of Neurosurgery*, **118**, 1367-1377. <https://doi.org/10.3171/2013.2.jns121294>
- [10] Costabile, J.D., Alaswad, E., D'Souza, S., Thompson, J.A. and Ormond, D.R. (2019) Current Applications of Diffusion Tensor Imaging and Tractography in Intracranial Tumor Resection. *Frontiers in Oncology*, **9**, Article No. 426. <https://doi.org/10.3389/fonc.2019.00426>
- [11] Vakharia, V.N., Vos, S.B., Winston, G.P., Gutman, M.J., Wykes, V., McEvoy, A.W., *et al.* (2022) Intraoperative Overlay of Optic Radiation Tractography during Anteromesial Temporal Resection: A Prospective Validation Study. *Journal of Neurosurgery*, **136**, 543-552. <https://doi.org/10.3171/2020.12.jns203437>
- [12] Taylor, P.N., Sinha, N., Wang, Y., Vos, S.B., de Tisi, J., Miserocchi, A., *et al.* (2018) The Impact of Epilepsy Surgery on the Structural Connectome and Its Relation to Outcome. *NeuroImage: Clinical*, **18**, 202-214. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.01.028>
- [13] Bonilha, L., Jensen, J.H., Baker, N., Breedlove, J., Nesland, T., Lin, J.J., *et al.* (2015) The Brain Connectome as a Personalized Biomarker of Seizure Outcomes after Temporal Lobectomy. *Neurology*, **84**, 1846-1853. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000001548>
- [14] Shah, P., Ashourvan, A., Mikhail, F., Pines, A., Kini, L., Oechsel, K., *et al.* (2019) Characterizing the Role of the Structural Connectome in Seizure Dynamics. *Brain*, **142**, 1955-1972. <https://doi.org/10.1093/brain/awz125>
- [15] Kini, L.G., Bernabei, J.M., Mikhail, F., Hadar, P., Shah, P., Khambhati, A.N., *et al.* (2019) Virtual Resection Predicts Surgical Outcome for Drug-Resistant Epilepsy. *Brain*, **142**, 3892-3905. <https://doi.org/10.1093/brain/awz303>
- [16] Bernasconi, A., Gill, R.S. and Bernasconi, N. (2025) The Use of Automated and AI-Driven Algorithms for the Detection of Hippocampal Sclerosis and Focal Cortical Dysplasia. *Epilepsia*, **66**, 64-71. <https://doi.org/10.1111/epi.17989>
- [17] Zhou, C., Xie, F., Wang, D., Huang, X., Guo, D., Du, Y., *et al.* (2024) Preoperative Structural-Functional Coupling at the Default Mode Network Predicts Surgical Outcomes of Temporal Lobe Epilepsy. *Epilepsia*, **65**, 1115-1127. <https://doi.org/10.1111/epi.17921>

- [18] Hall, G.R., Gascoigne, S.J., Horsley, J.J., Wang, Y., Kozma, C., de Tisi, J., *et al.* (2025) Superficial and Deep White Matter Abnormalities in Temporal Lobe Epilepsy. *Brain Communications*, **7**, fcfa305. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcaf305>
- [19] Nitzan, N. and Buzsáki, G. (2024) Physiological Characteristics of Neurons in the Mammillary Bodies Align with Topographical Organization of Subicular Inputs. *Cell Reports*, **43**, Article ID: 114539. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.114539>
- [20] Freelin, A., Wolfe, C. and Lega, B. (2025) Models of Human Hippocampal Specialization: A Look at the Electrophysiological Evidence. *Trends in Cognitive Sciences*, **29**, 556-569. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2024.11.009>
- [21] Morcillo-Nieto, A.O., Rozalem-Aranha, M., Maure-Blesa, L., Rodríguez-Baz, Í., Arriola-Infante, J.E., Franquesa-Mullerat, M., *et al.* (2026) Temporal Dynamics of White Matter Hyperintensities Related to Alzheimer's Disease in Adults with down Syndrome. *Alzheimer's & Dementia*, **22**, e71157. <https://doi.org/10.1002/alz.71157>
- [22] Lenga, P., Scherer, M., Neher, P., Jesser, J., Pflüger, I., Maier-Hein, K., *et al.* (2023) Tensor- and High-Resolution Fiber Tractography for the Delineation of the Optic Radiation and Corticospinal Tract in the Proximity of Intracerebral Lesions: A Reproducibility and Repeatability Study. *Acta Neurochirurgica*, **165**, 1041-1051. <https://doi.org/10.1007/s00701-023-05540-7>
- [23] Song, S., Jean, S., Deng, D., Dai, Y., Fang, X., Wei, X., *et al.* (2024) Diffusion Spectrum Imaging Based Semi-Automatic Optic Radiation Tractography for Vision Preservation in SEEG-Guided Radiofrequency Thermocoagulation. *Seizure: European Journal of Epilepsy*, **114**, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2023.11.014>
- [24] Giachetti, I., Padelli, F., Aquino, D., Garbelli, R., De Santis, D., Rossini, L., *et al.* (2022) Role of NODDI in the MRI Characterization of Hippocampal Abnormalities in Temporal Lobe Epilepsy: Clinico-Histopathologic Correlations. *Neurology*, **98**, e1771-e1782. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000200140>
- [25] Kung, G., Chiu, A., Davey, Z., Mouchawar, N., Carlson, M., Moein Taghavi, H., *et al.* (2022) High-Resolution Hippocampal Diffusion Tensor Imaging of Mesial Temporal Sclerosis in Refractory Epilepsy. *Epilepsia*, **63**, 2301-2311. <https://doi.org/10.1111/epi.17330>
- [26] Chen, X., Zhang, X., Su, S., Zhou, Q., Qin, B., Fan, L., *et al.* (2025) Potential Molecular Mechanisms Explaining Progressive Alterations of the Structural Network in Temporal Lobe Epilepsy. *Neurobiology of Disease*, **215**, Article ID: 107092. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2025.107092>
- [27] Lin, H., Leng, X., Qin, C., Wang, W., Zhang, C. and Qiu, S. (2020) Altered White Matter Structural Network in Frontal and Temporal Lobe Epilepsy: A Graph-Theoretical Study. *Frontiers in Neurology*, **11**, Article No. 561. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00561>
- [28] Wang, Y., Zhou, Y., Wang, H., Cui, J., Nguchu, B.A., Zhang, X., *et al.* (2018) Voxel-Based Automated Detection of Focal Cortical Dysplasia Lesions Using Diffusion Tensor Imaging and T2-Weighted MRI Data. *Epilepsy & Behavior*, **84**, 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2018.04.005>
- [29] Horsley, J., Hall, G., Simpson, C., Kozma, C., Thomas, R., Wang, Y., *et al.* (2025) Seizure Freedom after Surgical Resection of Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging Abnormalities. *Epilepsia*, **66**, 3480-3490. <https://doi.org/10.1111/epi.18490>
- [30] Binding, L.P., Dasgupta, D., Taylor, P.N., Thompson, P.J., O'Keefe, A.G., de Tisi, J., *et al.* (2023) Contribution of White Matter Fiber Bundle Damage to Language Change after Surgery for Temporal Lobe Epilepsy. *Neurology*, **100**, E1621-E1633. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000206862>
- [31] Trimmel, K., Vos, S.B., Binding, L., Caciagli, L., Xiao, F., van Graan, L.A., *et al.* (2024) Naming fMRI-Guided White Matter Language Tract Volumes Influence Naming Decline after Temporal Lobe Resection. *Journal of Neurology*, **271**, 4158-4167. <https://doi.org/10.1007/s00415-024-12315-2>
- [32] Peter Binding, L., Neal Taylor, P., O'Keefe, A.G., Giampiccolo, D., Fleury, M., Xiao, F., *et al.* (2023) The Impact of Temporal Lobe Epilepsy Surgery on Picture Naming and Its Relationship to Network Metric Change. *NeuroImage: Clinical*, **38**, Article ID: 103444. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2023.103444>
- [33] Kaufmann, T.J., Lehman, V.T., Wong-Kisiel, L.C., Kerezoudis, P. and Miller, K.J. (2021) The Utility of Diffusion Tractography for Speech Preservation in Laser Ablation of the Dominant Insula: Illustrative Case. *Journal of Neurosurgery: Case Lessons*, **1**, CASE21113. <https://doi.org/10.3171/case21113>
- [34] Kaestner, E., Stasenko, A., Schadler, A., Roth, R., Hewitt, K., Reyes, A., *et al.* (2024) Impact of White Matter Networks on Risk for Memory Decline Following Resection versus Ablation in Temporal Lobe Epilepsy. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, **95**, 663-670. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2023-332682>
- [35] Larivière, S., Park, B., Royer, J., DeKraker, J., Ngo, A., Sahlas, E., *et al.* (2024) Connectome Reorganization Associated with Temporal Lobe Pathology and Its Surgical Resection. *Brain*, **147**, 2483-2495. <https://doi.org/10.1093/brain/awae141>
- [36] Foit, N.A., Gau, K., Rau, A., Urbach, H., Beck, J. and Schulze-Bonhage, A. (2025) Linking Memory Impairment to

- Structural Connectivity in Extrahippocampal Temporal Lobe Epilepsy Surgery. *Neurology International*, **17**, Article No. 52. <https://doi.org/10.3390/neurolint17040052>
- [37] Chao, C., Tseng, M., Lin, Y., Hsieh, P., Lin, C., Huang, S., *et al.* (2021) Brain Imaging Signature of Neuropathic Pain Phenotypes in Small-Fiber Neuropathy: Altered Thalamic Connectome and Its Associations with Skin Nerve Degeneration. *Pain*, **162**, 1387-1399. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000002155>
- [38] Bearden, D.J., Stassenko, A., Prentice, F., Benjamin, C., Hamberger, M., Reppert, L., *et al.* (2024) Mapping Cognition in Epilepsy: From the Lab to the Clinic. *Epilepsy Currents*. <https://doi.org/10.1177/15357597241280485>
- [39] Johnson, G.W., Cai, L.Y., Narasimhan, S., González, H.F.J., Wills, K.E., Morgan, V.L., *et al.* (2022) Temporal Lobe Epilepsy Lateralisation and Surgical Outcome Prediction Using Diffusion Imaging. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, **93**, 599-608. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2021-328185>
- [40] Chen, J., Wang, Y., Chen, C., Zhang, Q., Wang, S., Wang, Y., *et al.* (2023) Activation of Medial Septum Cholinergic Neurons Restores Cognitive Function in Temporal Lobe Epilepsy. *Neural Regeneration Research*, **18**, 2459-2465. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.371369>
- [41] Keller, S.S., Glenn, G.R., Weber, B., Kreilkamp, B.A.K., Jensen, J.H., Helpert, J.A., *et al.* (2017) Preoperative Automated Fibre Quantification Predicts Postoperative Seizure Outcome in Temporal Lobe Epilepsy. *Brain*, **140**, 68-82. <https://doi.org/10.1093/brain/aww280>
- [42] Sinha, N., Wang, Y., Moreira da Silva, N., Miserocchi, A., McEvoy, A.W., de Tisi, J., *et al.* (2021) Structural Brain Network Abnormalities and the Probability of Seizure Recurrence after Epilepsy Surgery. *Neurology*, **96**, e758-e771. <https://doi.org/10.1212/wnl.00000000000011315>
- [43] Stassenko, A., Kaestner, E., Reyes, A., Lalani, S.J., Paul, B., Hegde, M., *et al.* (2022) Association between Microstructural Asymmetry of Temporal Lobe White Matter and Memory Decline after Anterior Temporal Lobectomy. *Neurology*, **98**, E1151-E1162. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000200047>
- [44] Chen, Y., Tozer, D., Li, R., Li, H., Tuladhar, A., De Leeuw, F.E., *et al.* (2024) Improved Dementia Prediction in Cerebral Small Vessel Disease Using Deep Learning-Derived Diffusion Scalar Maps from T1. *Stroke*, **55**, 2254-2263. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.124.047449>
- [45] Giampiccolo, D., van Dijk, J., Granados, A., Xiao, F., Fiore, G., Rodionov, R., *et al.* (2026) Mapping White Matter Tracts with SEEG Electrodes. *Epilepsia*, **67**, 1090-1101. <https://doi.org/10.1111/epi.70038>
- [46] Jermakowicz, W.J., Wu, C., Neal, E., Cajigas, I., D'Haese, P., Donahue, D.J., *et al.* (2019) Clinically Significant Visual Deficits after Laser Interstitial Thermal Therapy for Mesiotemporal Epilepsy. *Stereotactic and Functional Neurosurgery*, **97**, 347-355. <https://doi.org/10.1159/000504856>
- [47] Xiao, L., Zheng, Q., Li, S., Wei, Y., Si, W. and Pan, Y. (2025) Integration of Spatiotemporal Dynamics and Structural Connectivity for Automated Epileptogenic Zone Localization in Temporal Lobe Epilepsy. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **33**, 3065-3075. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2025.3595906>
- [48] Wurst, Z., Birčák Kuchtová, B., Křemen, J., Lahutsina, A., Ibrahim, I., Tintěra, J., *et al.* (2023) Basal Ganglia Compensatory White Matter Changes on DTI in Alzheimer's Disease. *Cells*, **12**, Article No. 1220. <https://doi.org/10.3390/cells12091220>
- [49] Cardenas-Iniguez, C., Moore, T.M., Kaczurkin, A.N., Meyer, F.A.C., Satterthwaite, T.D., Fair, D.A., *et al.* (2022) Direct and Indirect Associations of Widespread Individual Differences in Brain White Matter Microstructure with Executive Functioning and General and Specific Dimensions of Psychopathology in Children. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, **7**, 362-375. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2020.11.007>
- [50] Huang, S., Zhou, Z., Yang, D., Zhao, W., Zeng, M., Xie, X., *et al.* (2022) Persistent White Matter Changes in Recovered COVID-19 Patients at the 1-Year Follow-Up. *Brain*, **145**, 1830-1838. <https://doi.org/10.1093/brain/awab435>
- [51] Sadikov, A., Choi, H.L., Xiao, J., Cai, L.T. and Mukherjee, P. (2025) Mapping the Microstructure of Human Cerebral Cortex *in Vivo* with Diffusion MRI. *Communications Biology*, **8**, Article No. 1088. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-08523-9>
- [52] Feinberg, D.A., Beckett, A.J.S., Vu, A.T., Stockmann, J., Huber, L., Ma, S., *et al.* (2023) Next-Generation MRI Scanner Designed for Ultra-High-Resolution Human Brain Imaging at 7 Tesla. *Nature Methods*, **20**, 2048-2057. <https://doi.org/10.1038/s41592-023-02068-7>
- [53] Streng, M.L. and Krook-Magnuson, E. (2021) The Cerebellum and Epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, **121**, Article ID: 106909. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2020.106909>
- [54] Luckett, P.H., Maccotta, L., Lee, J.J., Park, K.Y., U. F. Dosenbach, N., Ances, B.M., *et al.* (2022) Deep Learning Resting State Functional Magnetic Resonance Imaging Lateralization of Temporal Lobe Epilepsy. *Epilepsia*, **63**, 1542-1552. <https://doi.org/10.1111/epi.17233>
- [55] Kebiri, H., Gholipour, A., Lin, R., Vasung, L., Calixto, C., Krsnik, Ž., *et al.* (2024) Deep Learning Microstructure Estimation of Developing Brains from Diffusion MRI: A Newborn and Fetal Study. *Medical Image Analysis*, **95**, Article ID:

103186. <https://doi.org/10.1016/j.media.2024.103186>

- [56] Yang, J.Y., Chen, J., Alexander, B., Schilling, K., Kean, M., Wray, A., *et al.* (2022) Assessment of Intraoperative Diffusion EPI Distortion and Its Impact on Estimation of Supratentorial White Matter Tract Positions in Pediatric Epilepsy Surgery. *NeuroImage: Clinical*, **35**, Article ID: 103097. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2022.103097>