

弥散磁共振成像在中医诊疗中的机遇与挑战

吴 烨¹, 和岚翔², 张鑫媛³, 伏云鹤⁴, 刘小明⁵, 何建忠⁶

(1. 南京理工大学计算机科学与工程学院, 南京 210094; 2. 南京理工大学钱学森学院, 南京 210094; 3. 南方医科大学生物医学工程学院, 广州 510515; 4. 南京中医药大学附属南京市中西医结合医院, 南京 210000; 5. 华中科技大学同济医学院附属协和医院, 武汉 432200; 6. 浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 弥散磁共振成像 (Diffusion magnetic resonance imaging, dMRI) 是一种通过测量水分子在不同方向上的弥散情况来获取微观结构信息的先进医学影像技术, 在临床辅助诊疗中的应用日益广泛。在中医诊疗领域, dMRI 技术同样展现了其独特的潜力和价值, 为中医“辨证施治”提供了更为客观的依据。在中医诊疗中, dMRI 不仅能够帮助医生更准确地诊断疾病, 还能监测疾病的发展过程以及治疗效果, 为中医“治未病”和“个体化治疗”提供了有力的支持。然而, dMRI 技术在中医诊疗领域的应用也面临着诸多挑战。本文集中回顾了近几年 dMRI 技术在中医诊疗中的应用, 并探讨了高级 dMRI 技术在中医诊疗领域的广阔前景和潜力, 同时也讨论了当前 dMRI 应用的局限性以及 dMRI 在中医诊疗应用中的挑战。本研究将促进医工交叉, 尤其是中医-智能影像技术领域的交流与合作, 并推动 dMRI 技术在中医诊疗中的深入应用和发展。

关键词: 弥散磁共振成像; 中医诊疗; 中医理论; 中医证候; 医工交叉

中图分类号: TP183 **文献标志码:** A

Opportunities and Challenges of Diffusion MRI in Traditional Chinese Medicine

WU Ye¹, HE Lanxiang², ZHANG Xinyuan³, FU Yunhe⁴, LIU Xiaoming⁵, HE Jianzhong⁶

(1. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Qian Xuesen College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 4. Nanjing Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Hospital Affiliated to Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210000, China; 5. Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 432200, China; 6. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Diffusion magnetic resonance imaging (dMRI) represents an advanced medical imaging modality that yields intricate insights into tissue microstructure by assessing the diffusion of water molecules within biological tissues, which is progressively integrated into clinical practices for diagnosis and treatment. Notably, within traditional Chinese medicine (TCM), dMRI has demonstrated unique potential and significance, providing an empirical foundation for TCM's "differentiation and treatment". Its utility extends beyond precise disease diagnosis to encompass disease progression monitoring and treatment efficacy evaluation, aligning with TCM's principles of "preventive treatment" and "individualized treatment". Nonetheless, the assimilation of dMRI into TCM encounters notable

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFE0118600, 2023YFF1204800); 国家自然科学基金 (62201265, 62303413, 61971214); 广东省自然科学基金 (2023A1515012093)。

收稿日期: 2024-06-05; **修订日期:** 2024-07-08

challenges. This review article delves into the recent applications of dMRI within TCM, scrutinizing its prospects and constraints. By fostering interdisciplinary partnerships between medical and engineering disciplines, particularly in the realm of TCM-intelligent imaging technology, this study aims to propel the application and evolution of dMRI within TCM's diagnostic and therapeutic domains.

Key words: diffusion magnetic resonance imaging (dMRI); traditional Chinese medicine (TCM) diagnosis and treatment; TCM theory; TCM syndrome; medicine-engineering interdisciplinary

引 言

随着“脑科学”技术的发展,基于弥散磁共振成像(Diffusion magnetic resonance imaging, dMRI)技术的医工交叉研究取得了显著的成果,尤其在对大脑的发育、衰老和异常方面的研究^[1-3]。磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)技术的出现推动了神经研究领域的革新。非侵入性扩散磁共振成像技术能够在活体下重建大脑纤维束并构建神经连接图谱,使探索神经连接模式成为可能。dMRI是研究人类大脑动态发育规律的重要手段,也是目前唯一能够活体无创测量大脑微观组织结构和宏观连接结构的成像技术。在人脑组织中,水分子的无规律布朗运动受到组织细胞本身特征的限制,以及细胞内部结构的影响在dMRI图像中呈现不同的信号强度。在具有固定排列顺序的组织结构中(如神经纤维束)^[4-5],水分子在各个方向的弥散是不同的。通常情况下,水分子更倾向于沿着神经纤维束轴突的方向进行弥散,这种方向依赖性即称为弥散的各向异性^[6]。dMRI即通过检测发生在细胞层次的水分子微观弥散行为,从而测量微观组织结构以及白质神经纤维束。dMRI在脑科学的基础研究中扮演着重要角色,是各国“脑计划”中重要研究内容之一^[7-8]。

dMRI是一种非侵入性的医学影像技术,通过无创、无辐射且无需注射对比剂就能监测体内组织水分子的弥散运动,从而揭示组织的微观结构形态。dMRI在神经学、肿瘤学、心血管学、骨科、妇科和产科等多个领域都有着广泛的应用。近几年来,以高角度分辨率弥散成像技术为基础的脑神经科学研究取得了一系列显著的成果^[9]。其中,微结构成像技术利用磁场梯度变化、弛豫时间变化以及髓鞘内水分子运动评估等物理手段,为洞悉细胞的生物结构、皮层纤维结构、神经元密度以及白质连接提供了方法支撑。但由于dMRI成像序列固有的局限性,包括扫描时间长、信噪比低及空间分辨率低等,这些技术在临床中的应用面临着众多挑战^[10-11]。随着机器学习技术的发展,人工智能热潮迭起,脑影像分析技术有了极大的改善^[12]。这些技术发展显著提高了基于dMRI的脑影像分析的精确性和鲁棒性,为研究大脑的动态发育提供了良好的技术支持。

在中医诊疗领域,dMRI技术同样展现了其独特的潜力和价值,为中医“辨证施治”提供了更为客观的依据。中医治疗,作为一种源远流长的医学体系,深深植根于中国传统文化之中,它强调“治未病”和“辨证施治”的核心理念。所谓“治未病”,即指在疾病尚未发生或尚未完全发作之前,通过调整人体的阴阳平衡和气血流通,来预防疾病的发生或阻止其进一步恶化。而“辨证施治”则是中医的核心诊疗方法,医生依据患者的病情及体质等多方面因素,进行综合评估,从而制定个性化的诊疗方案。在中医诊疗中,dMRI不仅能够帮助医生更准确地诊断疾病,还能监测疾病的发展过程以及治疗效果,为中医“治未病”和“个体化治疗”提供了有力的支持。dMRI在中医诊疗应用中具有巨大的机遇和潜力,但也面临着一些挑战和问题。如何将dMRI技术与中医诊疗理论相结合,形成具有中医特色的诊断体系,是一个需要深入研究的问题。同时,中医和西医在疾病的诊断和治疗上存在差异,如何正确解读dMRI图像并将其与中医的“证”相结合,是一个需要解决的问题。本文集中回顾了近几年dMRI技术在中医诊疗中的应用,并探讨了高级dMRI技术在中医诊疗领域的广阔前景和潜力,同时也讨论了当前dMRI应用的

局限性以及dMRI在中医诊疗应用中的挑战。本文旨在加强dMRI技术与中医诊疗理论的融合研究,推动dMRI在中医诊疗中的广泛应用和发展。

1 dMRI在中医诊疗中的应用

1.1 辅助中医诊断

中医诊断主要基于望、闻、问、切四诊,但这些诊断方法往往受到中医医生个人经验和主观判断的影响。dMRI作为一种客观、量化的检查手段,可以提供关于组织结构和功能状态的详细信息,有助于中医医生更准确地判断疾病的性质、部位和程度。dMRI作为一种客观、量化的检查方法,在中医诊断领域展现出了巨大的潜力。

刘明等^[13]通过对肝气郁结证患者脑深部核团及扣带回的弥散张量成像(Diffusion tensor imaging, DTI)研究,发现肝气郁结证患者脑深部神经核团及扣带回损伤存在于特定的脑区,其中右中扣带回各向异性分数(Fractional anisotropy, FA)值在鉴别诊断中具有重要的价值,可作为肝气郁结证诊断的潜在敏感影像学指标;李丽娟等^[14]探讨了乳腺癌MRI及弥散加权成像(Diffusion weighted imaging, DWI)表现与中医辨证分型的相关性,发现乳腺癌的MRI形态学、生成时间-信号强度曲线(Time-signal intensity curve, TIC)类型及病灶的表观弥散系数(Apparent diffusion coefficient, ADC)与中医辨证分型存在一定关系,其研究结果可以为中医辨证分型提供依据;刘海峰等^[15]探究了磁共振形态学、DWI及弥散峰度成像(Diffusion kurtosis imaging, DKI)在乙肝后肝硬化(Post-hepatitis B cirrhosis, PHBC)中医证候分型中的价值,发现了核磁共振形态学、DWI和DKI成像与PHBC证候分型进展有一定的相关性,能为PHBC中医证候分型提供可靠的诊断依据;Zhai等^[16]探讨了穴位注射治疗糖尿病周围神经病变(Diabetic peripheral neuropathy, DPN)的疗效,根据DPN患者大脑的FA值和ADC值在治疗前后的变化证明穴位注射甲钴胺方法能够修复受损神经,研究为中医疗法的应用及dMRI方法客观评价DPN提供了临床依据;刘晓辉等^[17]分析了3种不同糖尿病足中医证型患者的MRI和DWI对糖尿病足的诊断价值,并探讨其与中医证型的相关性,发现了DWI表现能够辅助糖尿病足中医证型辨证。

当前,dMRI技术通过测量组织内水分子的弥散速度,能够反映组织结构和功能状态的详细信息。这些信息不仅具有高度的客观性和准确性,而且能够量化表达,为中医医生提供更为全面、深入的病情了解。同时,dMRI能够解释疾病的性质,通过计算病变组织的弥散特征指标,可以判断疾病的性质,如炎症、肿瘤等。

1.2 评估治疗效果

中医治疗强调整体观念,认为人体是一个有机的整体,内外环境相互影响。同时,中医强调“治未病”和“辨证施治”的核心理念,治疗和评价个性化程度高。dMRI技术可以提供更多客观指标,帮助中医医生及时的判断治疗效果,进而调整治疗方案。

杨烁慧等^[18]通过DTI的各向异性指数评价了针刺改善脑白质缺血损伤的有效性,其研究证实了针刺对急性脑缺血患者脑白质损伤的改善作用;杨洋等^[19]通过DTI的各向异性指数证实了化痰通络汤能促进痰瘀阻络型卒中后认知障碍(Post-stroke cognitive impairment, PSCI)患者白质纤维修复,增强视空间执行能力、注意力、延迟回忆、命名及定向力,改善认知功能障碍,提高总体认知功能水平;杨福霞等^[20]通过DTI的各向异性指数和纤维束重建的方法研究调任通督针法对脑梗死皮质脊髓束(Corticospinal tract, CST)损伤及肢体功能的影响,证实了调任通督针法可促进脑梗死患者CST损伤的恢复,从而促进运功能恢复;在另一研究中,杨福霞等^[21]还证实了调任通督针法可明显改善脑梗死后上肢活动功能,且内囊后肢相对各向异性(Relative fractional anisotropy, rFA)结合Fugl-Meyer评定量表上肢部分

(Fugl-Meyer assessment for upper extremity, UE-FMA)可用作评价针刺对脑梗死后上肢活动的疗效;赵钧等^[22]通过DTI的各向异性指数观察四针八穴透刺法治疗面神经麻痹的临床疗效,证实了四针八穴透刺法治疗面神经炎疗效显著,能够有效缓解面神经麻痹症候,提高面神经功能,dMRI可显示口轮匝肌在治疗前后改变;Han等^[23]通过dMRI和fMRI进行多模态磁共振成像分析,研究针灸治疗中风的机制,发现了右侧上纵束(Superior longitudinal fasciculus, SLF)的完整性是中风后下肢运动功能障碍的潜在神经影像学生物标志物,针刺可增加受损白质纤维束连接的皮质之间的通讯,其研究结果揭示了针刺干预的神经机制;Shen等^[24]通过dMRI和液体衰减反转恢复(Fluid-attenuated inversion recovery, FLAIR)进行了多模态磁共振成像分析,探讨针灸对急性脑梗死患者脑功能的影响,并评估针灸治疗与中风患者运动恢复之间的关系,证明了针灸治疗在缺血性病变和结构重组中的有效性,研究表明针灸治疗对保护神经元和促进康复有积极作用,其研究结果可帮助医生确定中风早期治疗和康复的最佳策略;Zhao等^[25]通过分析患者白质束的分数各向异性和左上纵束平均弥散值变化,探讨头针加低频重复经颅磁刺激(Repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)治疗偏瘫脑卒中的临床效果,证明了在常规康复治疗的基础上,头针联合低频rTMS比单独头针更能促进白质束修复,且偏瘫上肢运动功能的改善可能与小脑康复密切相关,得出头针结合低频rTMS有望为中风偏瘫患者提供更优化的康复方案;代海洋等^[26]通过DTI的各向异性指数探讨调肝化纤丸联合恩替卡韦对肝气郁脾虚血瘀型慢性乙型肝炎肝纤维化的防治作用,证明了调肝化纤丸联合恩替卡韦治疗慢性乙型肝炎肝纤维化临床疗效显著,可降低肝脏炎症活动度,延缓肝纤维化进展,降低中医症状评分;Wang等^[27]以DTI的各向异性指数为观测指标,比较了推拿与中频电疗治疗Ⅱ期肩周炎(Frozen shoulder, FS)的临床疗效,证明了推拿对于改善FS患者症状较中频电疗更有效,且推拿能快速缓解疼痛并恢复患肩关节功能,减轻肩关节囊水肿,恢复肩袖肌功能,缩短FS的自然病程;Zhou等^[28]通过比较抑郁症患者治疗前后脑白质完整性的变化,研究了交泰丸(Jiaotai pill, JTP)对脑代谢物的影响,并观察脑代谢物的磁共振波谱变化,为JTP治疗抑郁症提供了关键证据;Fan等^[29]研究了针刺肺经穴位治疗颈型颈椎病的疗效,采用多模型神经影像技术来确定其影响的中枢机制要素,证实了肺经的特异性和颈型颈椎病的通路,其研究结果不仅证明了在该经络上选择穴位来治疗这种颈部疼痛的合理性,而且为针灸治疗其他疾病提供了优化指导;Yin等^[30]借助静息态fMRI和DTI,研究腹泻型肠易激综合征(Diarrhea-predominant irritable bowel syndrome, IBS-D)患者疼痛抑制和传导通路以及情绪调节通路,为针灸治疗IBS-D的有效性和安全性提供了高质量的证据。

dMRI作为一种先进的医学影像技术,为中医的“辨证施治”提供了有力的辅助工具。在中医治疗中,dMRI可以用于观察治疗过程中患者体内脏腑器官以及气血流通等方面的变化,为医生提供更加客观和准确的评估依据。具体来说,dMRI可以帮助中医医生了解患者体内是否存在气血瘀滞、经络阻塞等病理状态,以及这些状态在治疗过程中的改善情况。同时,dMRI还可以监测治疗过程中组织结构的修复和再生情况,从而评估治疗效果。这些信息对于中医医生来说至关重要,它们不仅可以帮助医生判断治疗方案的有效性,还可以为医生调整治疗方案提供科学依据。因此,dMRI在中医治疗效果评估中发挥着重要作用。它使得中医的“辨证施治”更加精准、科学,为中医的现代化和国际化发展提供了有力支持。

1.3 研究中医理论

中医,拥有几千年的深厚底蕴和丰富的理论系统。中医理论并非简单的医疗知识体系,而是融合了哲学、自然科学以及生命科学的复杂理论体系,其中,气血、阴阳、脏腑等概念,是中医理论的核心要素,它们共同构成了中医对人体生命活动及其病理变化的独特理解。然而,这些深邃而复杂的中医概念在现代医学的框架下往往显得难以捉摸,因为现代医学更加依赖于解剖、生理和病理等直观、可量化

的指标来研究和治疗疾病。气血、阴阳和脏腑等概念,在现代医学中难以直接观察和验证,成了中医与现代医学对话和交流的障碍。dMRI为人们提供了一个新的视角。对于中医理论的研究而言,dMRI技术具有独特的优势。例如,在中医理论中,气血被看作是构成和维持人体生命活动的基本物质,其运行状态直接关系到人体的健康。而dMRI技术能够通过测量组织中水分子的扩散运动情况来反映气血的运行状态,从而提供一个直观的、可量化的观察手段。同样地,中医理论中的脏腑概念,也可以通过dMRI技术进行研究。脏腑作为中医理论中的另一个核心概念,是指人体内部的一系列功能系统,包括心、肝、脾、肺和肾等。这些脏腑系统各自承担着不同的生理功能,并相互协调,共同维持人体的生命活动。dMRI技术可以通过观察不同脏腑系统的结构和功能状态来验证和丰富中医理论中关于脏腑功能的描述。

孙阳^[31]在中医学整体观念和治病求本理念指导下,运用DTI研究抑郁高危进展演化趋势,并探究中医针刺治疗抑郁症的理论优势和疗效特点,其研究拓展了贴近临床真实的针刺抗抑郁的新视角、新手段和新途径。天人相关/形神一体是中医学情志病的理论发端和拓展基石;情志病病因病机万变归宗可以概括为:由心神不宁而生、因气血不畅而起、累及五脏六腑。中医情志病诊疗体系辨识防治情志病的核心智慧是阴阳藏象,阳为主导;中医学防治情志病的独到境界为调神调气,气畅神宁;中医学“治病求本”“病治异同”原则对抑郁障碍及精神疾病临床防治极具启迪。王焜^[32]探讨了合并脑白质高信号(White matter hyperintensity, WMH)的 α 突触核蛋白病的临床特点,证明了突触核蛋白病与WMH均具有虚气留滞的病机,证明了温肾益髓通络是有效的治疗方案。同时,温肾健脑方可以延缓突触核蛋白病的进展,有效改善患者部分非运动症状,其原因可能在于中药治疗有助于前额叶-纹状体-丘脑环路结构的保留。张旭冉^[33]基于dMRI和图论理论研究了珍龙醒脑胶囊治疗缺血性中风肢体运动障碍患者的中枢效应机制,证明了其可以改善中医证候和肢体运动障碍,改善神经功能缺损程度和病残程度,提高日常生活活动能力,具有较好的疗效和安全性。珍龙醒脑胶囊可提高与认知、运动及感觉等相关的功能区在脑网络的重要性和信息传递效率,从而促进脑网络的代偿和重组,这可能是其作用机制。朱巍明等^[34]运用DTI技术,从评估皮质脊髓束损伤程度的角度,探讨了肾虚髓亏证与急性缺血性脑卒中运动功能缺损程度相关性,丰富了中风病病机及证候诊断,拓宽了缺血性脑卒中的中医药防治思路,为急性缺血性脑卒中肾虚髓亏证患者运动功能损伤程度的判定提供了临床依据,并强调了肾虚髓亏证在急性缺血性脑卒中运动功能损伤中的重要意义。Cao等^[35]通过整合荟萃分析患者静息态功能连接和DTI数据,从而确定了头皮针灸治疗痴呆症的潜在位置,开发了基于神经影像的头皮针灸方案,有助于完善痴呆症的治疗;黄克诚^[36]以急性发作的缺血性中风病患者作为研究对象,通过dMRI技术比较中经络各证型皮质-脑桥-小脑束的不同损伤情况,并探究两者的关系,其研究丰富了中经络辨证分型,为缺血性中风病的辨证分型提供了更多的预测性信息;尹岭等^[37]探讨了针刺足三里穴对脑功能成像的影响和针灸治疗的中枢机制,证明了针刺足三里穴可引起植物神经中枢和颞叶功能变化,这种变化与足三里穴在治疗胃肠疾病和改善精神及睡眠状态上的疗效密切相关;Guo等^[38]通过检测推拿治疗引起的大脑灰质(Gray matter, GM)结构、白质(White matter, WM)结构和大脑功能连接(Functional connectivity, FC)的变化来评估疼痛,其研究揭示了推拿治疗对脑皮质和皮质下结构潜在形态变化、白质完整性以及脑区功能活动和连接的影响,为推拿治疗膝骨关节炎(Knee osteoarthritis, KOA)的临床应用提供了科学依据;Hong等^[39]结合功能性MRI、结构性MRI和dMRI来探索针灸治疗无先兆偏头痛(Migraine without aura, MWoA)的潜在神经机制,证明了针灸疗法可以通过恢复大脑活动的神经病理改变来治疗MWoA,为针灸的疗效提供了有价值的科学证据,并证明了针灸在治疗MWoA中的有效性。

dMRI技术为中医理论的研究开辟了新的道路,通过dMRI这一前沿技术,可以更加深入地理解中医理论中的气血、阴阳和脏腑等概念,进一步验证和丰富中医理论的内容,也为中医与现代医学的交流

和融合提供了新的可能和机遇。

1.4 辅助中医康复

在中医康复学的深厚领域中,康复过程被赋予了独特的视角和方法。中医康复强调的不仅仅是对病症的治疗,更在于通过调和人体的阴阳气血,促进患者整体健康状态的恢复。在这个过程中,针灸、推拿和气功等传统手段发挥着举足轻重的作用。针灸是传统中医的经典治疗手段,它通过对人体特定穴位的刺激,来调理经络气血,从而达到康复的目的。它能够在不侵入人体内部的情况下,直接激发人体的气血流动,对于促进患者的血液循环、缓解疼痛及增强免疫力等方面有着显著的效果。推拿则是以手法作用于人体的经络穴位。中医治疗通过推拿、揉捏和按摩等方式,达到调和人体的气血、疏通经络、缓解肌肉疲劳和促进身体自我修复的目的。推拿疗法在中医康复中占据着重要的地位,特别是对于那些因长期卧床、缺乏运动而导致的肌肉萎缩、关节僵硬等问题,推拿能够起到很好的康复效果。作为中医康复中的一项独特疗法,气功强调的是通过调整呼吸、意念和身体姿势来调和人体的气血,增强身体的自我修复能力。气功练习不仅可以改善人体的气血循环,还可以提高人体的免疫力,促进身体的整体健康。

潘细根等^[40]通过探讨MRI在中医康复治疗神经根型颈椎病中的应用价值,证明了中医康复治疗能有效提高神经根型颈椎病的疗效,得出结论采用MRI检查,并使用DTI技术准确地评价治疗效,为临床提供依据;张力平等^[41]探究了神经根型颈椎病采取中医康复治疗的效果,并应用dMRI技术进行分析,证明了神经根型颈椎病患者采取中医康复治疗可获得较为理想的效果,证明DTI技术可以准确评估临床治疗效果,能够为后续治疗方案的制定奠定良好的基础;徐华丽^[42]基于DTI检测缺血性卒中患者运动纤维束损伤类型,探究不同中医辨证分型缺血性卒中后患者皮质脊髓束重构的影像学特征,以及不同中医辨证分型缺血性卒中后患者运动功能临床评分改善情况,证明了缺血性卒中急性期中经络不同证型皮质脊髓束内囊后肢/大脑脚的损伤程度基本相同,且病情较轻、预后较好;Kang等^[43]基于静息态DTI功能成像方法,探讨头针促进运动功能恢复的中枢作用机制,为优化脑卒中后康复治疗提供思路,证明了行动观察疗法可以减轻脑卒中患者神经功能缺损,促进神经功能恢复,且头针治疗可以提高运动功能评分,减少脑卒中患者关键肌肉的紧张度,促进患者运动功能的恢复;Bai等^[44]研究中风患者针灸后每隔两周运动相关的大脑组织与白质微结构变化之间的关系,发现中风后的时间和基线缺陷的严重程度可能部分导致运动相关大脑网络诱导针灸功能连接的个体间差异,研究结果显示,不同的治疗干预可能会导致整个运动系统的神经网络架构向更生理的状态进行重塑,为中风患者大脑对针灸的反应与微结构损伤之间的联系提供了线索;刘钰等^[45]研究了神经根型颈椎病(Cervical spondylotic radiculopathy, CSR)与慢性疼痛相关脑白质微观结构的改变,并探讨中医推拿对其脑白质微观结构的影响,证明了颈椎病慢性疼痛患者双侧扣带束、胼胝体小脑脑白质结构受损,而左侧扣带海马束脑白质结构连接增强,这些变化可能与负性记忆及情绪的产生有关,治疗后该区域部分位点FA值逆转,推测中医推拿对改善疼痛及相关的不良记忆与情绪有一定效果。

在中医康复中,dMRI可以用于评估患者康复过程中大脑或其他组织结构和功能状态的变化,从而为中医康复师制定更加精准的康复计划提供依据。例如,在针灸治疗中,dMRI可以用于观察针灸刺激后穴位附近脑区的激活情况,从而评估针灸治疗的效果;在推拿治疗中,dMRI可以用于观察推拿后肌肉纤维束的排列和变化情况,从而评估推拿治疗对肌肉康复的促进作用;在气功练习中,dMRI可以用于观察练习者大脑白质纤维束的变化情况,从而评估气功练习对大脑功能和身体健康的改善作用。因此,dMRI技术的应用不仅为中医康复提供了更加科学、客观的评估手段,也为中医康复师制定更加精准、有效的康复计划提供了有力支持。在未来的中医康复研究中,有理由相信,随着技术的不断进步和应用的不断扩展,dMRI将会在中医康复领域发挥更加重要的作用。

2 dMRI在中医诊疗中的机遇

近年来,随着各国“脑计划”研究的推进、核磁共振成像设备的进步,以及人工智能技术的推动,活体重构白质微观组织和神经纤维连接技术取得了重要进展,尤其是高角度分辨率弥散成像(High-angular resolution diffusion imaging, HARDI)技术的发展改善了传统DTI的缺陷,极大地推动了dMRI在临床上的应用,在神经外科手术规划、脑网络分析、神经退行性疾病分析及脑发育研究等方面取得了重要进展,是当前国际上的前沿研究方向。

2.1 微观组织结构分析

弥散磁共振成像可以描述水分析在成像体素内的优先扩散方式,并对微米级的细胞结构敏感。研究者们通过数学建模实现了微米级组织的微结构特性与毫米级的扩散信号之间的联系。目前开发的多种数学模型能够帮助研究者们从dMRI信号中提取细胞微观成分的特异性标记物,例如轴突的直径、神经突密度、轴突内外弥散系数及方向散度等^[46]。这类信息以前只能通过尸检或侵入性活检才能获取。不同的模型通过不同的假设来建立微观组织结构与弥散信号之间的关联,例如弥散信号基于高斯弥散假说的DTI模型,提供了有关白质纤维局部方向的信息以及反应水分子运动情况的弥散指标如FA值、ADC以及平均弥散率(Mean diffusivity, MD)等^[47]。然而,高斯分布扩散需要水分子在均质环境中进行自由、不受限制的扩散,考虑到神经组织的结构复杂性,这种假设只能是近似值,并且不同元素内(如轴突、树突和胶质细胞)或是不同组织区室(例如细胞内和细胞外)水分子的扩散率会存在明显差异,因此高斯近似通常无法准确地表征组织的异质性^[48]。为了克服DTI的局限性,一些生物模型直接将扩散特性与特定的微观结构特征联系起来。DKI是DTI的一种成功扩展,它可直接估计水扩散偏离单个高斯分量的程度^[49]。DKI模型可通过平均峰度、轴向弥散峰度和径向弥散峰来分别表示脑组织正常结构、轴突完整性和髓鞘完整性的损伤程度^[50]。然而,无论是DTI还是DKI,其指标仅代表从信号特征推断的组织特性,没有明确的生理意义,缺乏与组织学结果建立对应关系^[48,51]。为此,研究者们尝试将体素内的信号分为不同组织成分,并利用水分子在不同成分中的弥散特性得到期望的微观组织测量指标^[48,52-54]。例如,复合阻滞受限弥散模型(Composite hindered and restricted model of diffusion, CHARMED)利用不可渗透的圆柱来估计水分子在轴突内的主要运动方向,用弥散张量来估计水分子在细胞外的自由弥散^[55]。因此,CHARMED需要指定一个固定的轴突直径来定义圆柱和张量结构。为了解决这个限制,AxCaliber从dMRI数据中估计轴突直径特征的伽马分布,从而替代CHARMED中人为指定的轴突直径,同时获得白质内水分子的主弥散最小模型,得以区别白质体素内信号的轴突内、轴突外、脑脊液和胶质细胞这4个组织结构^[56]。考虑到大脑体素中纤维分布的复杂性、多样性和不均匀性,NODDI(Neurite orientation dispersion and density imaging)模型将AxCaliber模型中的主弥散最小模型泛化至Watson分布的分散纤维方向,从而近似估计纤维方向分散下的轴突直径、零轴突直径假设的神经突分散度和密度,同时描述了白质内轴突和灰质内树突的组织结构^[57]。这些指标被广泛应用于反映精神疾病以及跨越整个生命周期的大脑微结构变化。基于NODDI模型可以估计神经突内体积分数、神经突方向离散度和脑脊液体积分数,能够分别表示神经轴突密度、神经突方向的离散状况以及脑脊液占比。NODDI可以定量评估中药对神经纤维密度和取向的影响,为中药的神经保护和修复机制研究提供科学依据。同时,利用NODDI衍生的神经突内分数比例结合髓磷脂敏感性可以估算用于大脑发育过程中髓鞘的动态变化。然而,拟合这些非线性模型的计算量非常大,难以应用到实际临床研究中。为了加快计算效率,AMICO(Accelerated microstructure imaging via convex optimization)框架利用凸优化的多功能性将微结构成像技术重新表述为等效但方便的线性系统,实现了快速的计算^[58]。但无论是传统的NODDI非线性拟合模型,还是线性优化的AMICO计算框架,都是使用弥散张量估计获

得纤维取向,在使用复杂生物物理模型扩展和处理多种纤维取向能力方面存在局限性。为了可靠地识别每个体素的多个纤维取向以及相关的微观结构特征,AMICOx模型方法被提出来估计两个纤维取向的轴突直径指数^[59]。MIX方法被提出进一步拓展了复杂的生物物理模型估算轴突直径和密度在交叉轴突区域的准确度^[60]。另外一种解决方式是引入了“球面平均技术”^[61],该技术通过平均每个“壳”的信号值排除了纤维交叉的影响,从而估计“每个轴突”的平行和垂直有效弥散系数。弥散信号还能通过建立体素内非相干运动模型(Intravoxel incoherent motion, IVIM)评估组织中的弥散和灌注变化^[62]。IVIM模型的原理是将弥散加权信号建模为两个指数曲线的总和,从而解释生物组织中水运动的两个组成部分,即较慢的水分子弥散和较快的微毛细血管灌注。基于IVIM模型可以估计弥散系数和伪弥散系数,能够分别表示大脑内水分子弥散系数和宏观水平上血管中血液的位移,这些指标对于中医在治疗血瘀和气滞等症候时有重要意义。

许多dMRI的研究表明,在临床上,许多人群在各种特定的脑区中表现出白质组织的敏感性改变,而这些研究能够评估白质异常的关键因素在于复杂的建模技术。在中医研究中,基于DTI模型的指标变化可以用来评估疾病的进展、治疗效果以及组织的病理变化。然而,DTI模型的测量可能受到多种因素的影响,例如FA值的减少可能是由于神经突密度降低、方向分散增加以及其他几个因素造成的。而新的微结构技术还未在中医研究中进行过尝试。许多研究已将这些新的微结构模型应用于精神疾病中,这也给中医研究提供新的更有效的分析工具^[14,63-65]。例如,在中医对出血中风下各个证型的研究中,通过FA值仅能作为阴虚风动这一证型的临床客观观察指标^[63]。这可能是研究中关注的感兴趣区域在皮质脊髓束附近受到了交叉神经的影响使得FA值指标出现异常,而通过MIX方法估计NODDI模型下的表达神经元密度指数、纤维方向分散程度和脑脊液的体积分数可能更精确地发现各个证型的差异。另外,通过IVIM模型能将毛细血管的微循环与水分子弥散信号区分开,这能更加准确捕获到由于出血导致中风的患者神经微结构的变化信息。这些新的模型可以用于分析脑白质纤维束的方向和密度等DTI模型无法精确量化的特征,将来能够更进一步了解中医理论中的“经络”和“气血”等概念。

2.2 宏观连接结构分析

dMRI可以使用纤维跟踪算法来重建和可视化脑白质神经传导束的路径。在中医研究中,基于神经传导束重建的分析(后面简称为纤维束分析)可以用于研究特定经络或脏腑区域的神经连接情况,进一步揭示中医理论中“脏腑经络”之间的关系。目前,许多纤维束分析方法可用于研究健康和疾病状态下的大脑结构连接,并可以大致分为两大类:基于连接组的分析和纤维束特异性分析。

基于连接组的分析旨在了解全脑解剖连接的模式,通常采用纤维数量作为“连通性”量化指标,构建所有灰质区域之间的全脑结构连接。在此基础上,研究者们结合图论和网络科学学科方法来量化大脑结构的连接特性。网络结构是现实世界中复杂系统的数学表示,定义为节点和节点之间连接的集合。这里的大脑网络中的节点通常代表大脑区域,而连接代表解剖连接^[66],即大脑区域对之间的白质纤维束。目前已经提出了大量图论方法来研究大脑连接组的网络特性^[67-68],这些方法能为探索结构-功能连接关系提供有用框架,通过对不同受试者群体之间进行比较,可以揭示神经和精神疾病中假定的连接异常。图论方法可以根据其分辨率或范围进行分类,从量化单个节点属性的局部测量,到描述互连节点集群的中观测量,再到描述全脑连接特性的全局测量,而选择哪类方法来进行分析取决于当前的研究问题和假设。例如局部测量指标中,节点中心性度量可以有效表征各个大脑区域的整合重要性^[69],度和强度能够分别量化各个区域的连接数和连接权重。这些量化指标能够识别在大脑功能中发挥核心作用的枢纽区域^[70]。中观测量通常是通过“模块”来反映大脑线路中变化,属于同一模块的脑区密集且紧密互连,而模块之间的连接则稀疏,反映了大脑内的“小世界网络”属性^[67]。从全局测量角度,图论和网络方法可用于描述大脑的结构线路如何支持远距离脑区和认知系统之间的信息通信^[71]。结

构连接的区域可以直接通信,但不连接的脑区之间的信号传播需要一个或多个中间连接序列才能实现通信,而信息传递的两个主要图论模型包括最短路径和扩散,通过模型可以得到特征路径长度^[72]、全局效率^[73]等量化指标衡量全脑通信效率。一些中医研究已经结合了网络方法进行尝试,例如通过脑网络分析发现岛叶连通性可以作为基于中医的抑郁症分类的生物标志物^[74]。

纤维束特异性分析专注于特定功能的白质纤维发生的变化,方法一般需要在已重建的全脑纤维束基础上筛选出特定的解剖纤维束,并根据每个参与者的具体解剖结构进行受试者间统计分析。传统的解剖束识别方法依赖于手动选择纤维束,解剖学专家通过手动绘制感兴趣区域(Region of interest, ROI)的方式选择纤维束成像流线^[75-76]。然而,这种方法效率不高,分割一个大脑的纤维束会花费专家大量的时间^[77]。因此,更多的研究利用脑图谱,例如Freesurfer^[78-79]、MNI-ICBM152^[80]、JHU-DTI^[81],来自动得到每个个体的ROI,并执行流线选择过程。另一种方式是直接生成特定纤维束,而不是基于全脑纤维束的分割,例如,TRACULA^[82]、TractSeg^[83]和特定纤维束成像(Bundle-specific tractography, BST)^[84]等方法。在获取到特定大脑功能的纤维束后,大多数研究使用“纤维束平均”方法进行分析,即对纤维束解剖中许多流线点的标量值进行平均,得到每个纤维束的单个点微结构特征值^[85]。然而,这种方法忽略了纤维束沿线弥散成像指标可能存在的丰富解剖变化。因此,很多研究开发出将纤维束细分为片段的方法来分析疾病是否均匀影响整个纤维束,还是纤维束内存在空间变化。例如,AFQ方法量化了白质束沿轨迹的多个位置的微结构指标^[86]、BUAN方法通过端到端计算框架精确提取纤维束、跨组执行统计分析并比较不同束的形状^[87]、RadTract方法将纤维束从简单的纤维束轮廓扩展到捕捉丰富纤维束沿线图像信息的描述性特征集^[88]。另一种方式是通过纤维形状的变化来分析疾病,通过纤维束形状分析的框架来分析白质纤维束的形状变异性。主要方式是通过纤维束形状的简洁表示实现了精细的形状分析以及束变形的评估^[89],或者基于聚类的方法也能从更加细分的纤维束中观察疾病对白质的影响,从而分析纤维束内局部区域的白质异常^[90]。目前,在中医研究中,最常使用的方法是通过神经传导束成像定义采样测量微结构的位置,从而分析白质发生的变化。基于纤维束空间统计分析(Tract-based spatial statistics, TBSS)作为其中一种沿束分析方法目前广泛被应用于中医研究中^[91-92]。这种分析方法使每个患者的纤维束测量都在自然空间中进行,可以避免图像配准误差而导致结果不准确。然而,TBSS分析仅能了解到特殊白质区域的异常,特异的区域往往包含着多个功能不同的纤维束,从而无法判断具体发生异常的纤维束。在中医研究中,可以对疾病或证型进行初始的假设,分析中医症状可能是由于哪个功能的纤维束变化引起的。接着,通过纤维束分割的方法筛选出对应的纤维束并结合统计结果进行分析。也可以通过分析全脑中所有已知具体功能的纤维束,进而在功能束方面找到造成这些中医症状的具体原因。

2.3 中医证候与dMRI特征的相关性分析

在中医的深厚理论体系中,证候是疾病发生和发展过程中在某一阶段病理变化的本质反映,它包含了疾病的病因、病位、病性以及邪正关系,是中医诊断疾病和辨证施治的重要依据。现代医学技术的不断进步,特别是医学影像技术的飞速发展,为研究者们从更微观的层面探索中医证候提供了新的可能性。其中,dMRI技术因其独特的优势,在中医证候研究中展现出巨大的潜力。dMRI技术通过测量水分子在微观组织中的扩散特性,能够反映组织内部微观结构的变化。

孟祥东^[93]通过观察中枢性眩晕患者的脑实质影像学特点及相关颅内血管血流的形态学变化,探讨了磁共振成像检查在中枢性眩晕疾病中的诊断价值,其研究结果提高了中枢性眩晕疾病的确诊率,为今后临床的诊断和治疗提供了客观依据。他还运用相关统计方法,通过观察病例的既往史分析出中枢性眩晕的相关危险因素,总结出中枢性眩晕与中医证型的相关性,为中医辨证分析提供了客观依据。尹燕^[94]在DTI检查指导下进行了经络辨证取穴治疗腰椎间盘突出症(Lumbar disc herniation,LDH)研

究,探讨了经络辨经取穴精准针刺治疗腰椎间盘突出症的临床疗效,证明了经络辨证针刺和常规针刺可以改善LDH引起的腰腿痛、腰腿功能障碍,且经络辨证针刺治疗LDH的有效率优于常规针刺,经络辨证针刺缓解疼痛和改善神经根受损情况优于常规针刺,得出DTI检查结合经络辨证的精准针刺取穴少,疗效显著。李伟^[95]采用dMRI技术研究了颈椎失稳人群在接受韦氏调衡手法治疗前后颈部肌肉水分子各向异性的差别,证明了DTI技术在判定韦氏调衡手法治疗颈椎失稳疗效方面有显著效果,为评价韦氏调衡手法治疗颈椎失稳的疗效提供了新的科学依据和方法。Ma等^[65]研究了针刺对白质灌注和白质结构完整性的影响,证明了针灸治疗通过增加皮质下白质灌注和改善白质病变来保护双侧颈总动脉闭塞(Bilateral common carotid arteries occlusion, BCCAO)大鼠的认知障碍。

在中医证候的研究中,可以将dMRI特征与中医证候进行相关性分析,以深入探讨它们之间的关联性及其潜在的生理和病理机制。首先,通过对患者进行dMRI扫描,可以获取一系列反映脑组织微观结构变化的特征。这些特征的变化能够敏感地反映出脑组织的生理状态及病理改变。接着,结合中医证候的诊断标准,可以将患者的dMRI特征与其相应的中医证候进行匹配。例如,对于诊断为“气虚血瘀”的患者,可以观察其dMRI特征是否表现出与气虚血瘀证候相关的特定变化模式。然后,利用统计学方法,可以对dMRI特征与中医证候进行关联分析。通过计算相关系数、构建回归模型等手段,可以量化地评估dMRI特征与中医证候之间的关联程度,并探讨其潜在的生理和病理机制。这种相关性分析不仅有助于研究者们更深入地理解中医证候的微观机制,还可以为中医证候的客观化、标准化诊断提供新的思路和方法。例如,通过结合dMRI技术和其他生物标志物,可以建立更为准确、全面的中医证候诊断模型,为中医的临床应用提供更为科学和客观的支撑。此外,这种相关性分析还可以为中医证候的治疗提供新的思路和方法。通过了解dMRI特征与中医证候之间的关联性,可以更加精确地判断病情的变化趋势,为患者设计更符合个人需求的治疗方案。同时,还可以根据dMRI特征的变化情况及时调整治疗方案,以更好地适应患者的个体差异和病情变化。将dMRI特征与中医证候进行相关性分析,不仅有助于更深入地理解中医证候的微观机制,还可以为中医的临床应用提供新的思路和方法。

2.4 中医治疗与dMRI特征变化的动态监测

在深入探索中医治疗的奥秘与效果时,动态监测技术的应用显得尤为关键。其中,dMRI技术以其独特的优势,为中医诊疗研究带来了全新的视角。在中医的诊疗实践中,不仅可以依赖传统的望、闻、问、切四诊合参的方法,更可以借助dMRI技术,动态监测患者治疗过程中脑组织微观结构的变化情况。通过比较治疗前后dMRI特征的变化情况,可以评估中医治疗方案的疗效。例如,如果治疗后患者脑组织的FA值升高,MD值降低,这可能意味着脑组织微观结构的改善,进而说明治疗方案有效。此外,还可以通过观察不同治疗阶段dMRI特征的变化趋势,来预测治疗效果的持久性和稳定性。

王佩蓉等^[96]从脑白质纤维束微观结构的改变出发,探讨了针刺联合盐酸文拉法辛治疗抑郁症的有效性和安全性,证明了针刺能从一定程度上修复某些脑区的脑白质纤维束微观结构,辅助盐酸文拉法辛治疗抑郁症有利于增强疗效;蔡淑英等^[97]探讨通督醒神针刺法在早产儿脑白质损伤研究中的修复作用,证明了通督醒神针刺法可促进早产儿受损脑白质功能的修复,进而促进其智力水平的改善;Li等^[98]研究了接受8周中药舒肝解郁胶囊(SG)治疗的轻中度抑郁症(Mild-to-moderate depression, MMD)患者的大脑结构可塑性,并与年龄和性别匹配的健康对照者进行比较,评估了这些大脑结构变化与MMD临床症状之间的关系,表明SG是治疗MMD患者的有效方法。此外,SG治疗8周后灰质体积的变化表明MMD患者的背外侧前额叶皮质内的大脑结构可塑性存在潜在的调节机制;Zeng等^[99]比较了妇科癌症患者与健康对照者的认知结果,并探究针灸对患者认知结果的可能影响,以及针灸减轻癌症患者认知障碍的潜在神经生物学机制,得出针灸是预防接受化疗的妇科癌症患者发生癌症相关认知障碍(Cancer-related cognitive impairment, CRCI)的一种有前景的干预措施,其研究结果可为这一弱势群体

未来的治疗和康复策略制定提供指导;Wu等^[100]评估针灸治疗脑缺血对短暂大脑中动脉闭塞(Transient middle cerebral artery occlusion, tMCAO)大鼠的影响并讨论其机制,通过实验证明了其所采用穴位的有效性,以及改善神经元再生可能在针刺治疗大鼠中风后四肢瘫痪的机制中发挥作用,得出了dMRI(特别是DTI的FA值)是评估恢复状态的合适特征;Zhang等^[101]使用沿血管周围空间的弥散张量图像分析(Diffusion tensor image analysis along the perivascular space, DTI-ALPS)技术来检查失眠症患者的类淋巴系统的功能改变,证明了中医理疗可以改善失眠患者的类淋巴系统功能,而DTI-ALPS指数作为评估类淋巴系统功能的定量指标具有临床价值;Fan等^[29]验证了针刺肺经穴位治疗颈型颈椎病的疗效,并采用多模型神经影像技术来确定其影响的中枢机制要素,从而证实了肺经的特异性和颈型颈椎病的通路。

除了评估疗效外,dMRI技术还可以用于评估中医治疗的安全性。通过监测治疗过程中脑组织微观结构的变化情况,可以及时发现可能出现的不良反应或并发症,从而及时调整治疗方案,确保患者的安全。此外,dMRI技术提供的数据还可以为进一步优化中医治疗方案提供依据。例如,根据dMRI特征的变化情况,可以调整治疗药物的剂量、疗程或针灸、推拿等物理治疗的频次和力度,以更好地适应患者的个体差异和病情变化。总之,dMRI技术在中医诊疗研究中的应用,不仅有助于更深入地了解中医治疗的机制和效果,还为研究者们提供了更加科学、客观的评估手段。

3 dMRI在中医诊疗中的挑战

随着现代医学技术的快速发展,dMRI技术作为一种非侵入性、高分辨率的医学影像技术,已经在西医领域得到了广泛应用。然而,在中医诊疗领域,尽管dMRI技术展现出其独特的潜力和价值,但在实际应用中仍面临一系列挑战。首先,中医与西医在诊疗理念和思维方式上存在本质差异。中医倡导整体观念和辨证论治,强调“望、闻、问、切”四诊合参,而dMRI技术则侧重于通过图像数据来反映人体内部的微观结构和功能变化。如何将dMRI技术与中医的诊疗理念相结合,实现技术与理论的融合,是在中医诊疗中应用dMRI技术的首要挑战。其次,dMRI技术操作复杂,数据解读需要专业的医学知识和计算机技术,中医医生可能缺乏相关的技术背景和专业技能,从而在dMRI图像数据的获取、处理和分析过程中遇到困难。因此,加强中医医生在dMRI技术方面的培训和学习,提高其技术水平和数据解读能力,是克服这一挑战的关键。此外,dMRI技术在中医诊疗中的应用还需要考虑其成本效益和临床实用性。dMRI设备的购置和维护成本较高,且检查过程相对耗时,这在一定程度上限制了其在中医诊疗中的广泛应用。因此,如何在保证诊断准确性的前提下,降低dMRI技术的成本和提高其临床实用性,是中医诊疗中应用dMRI技术的另一挑战。最后,dMRI技术在中医临床实践中的应用还需要进一步验证和完善。虽然已有一些研究探讨了dMRI技术在中医诊疗中的应用价值,但其在临床实际应用中的效果和可靠性仍需通过大规模的临床试验来进一步证实。综上所述,dMRI在中医诊疗应用中面临的挑战主要包括技术与理论的融合、技术操作和数据解读的复杂性、成本效益和临床实用性以及临床应用的验证和完善等方面。针对这些挑战,需要加强中医与西医在dMRI技术领域的交流与合作,推动dMRI技术在中医诊疗中的深入应用和发展。

在dMRI的分析方法上,仍然存在一系列挑战。微结构模型的特征估计需要对大脑中百万数量级的体素逐个进行涉及非线性拟合的逆问题求解。因此微结构特征估计的准确性不仅受到DWI数量的影响,同时还受到DWI图像质量的影响。增加采集时间来克服上述问题,但会增加图像的运动伪影,影响了微结构特征的发展和应用。对于皮质组织而言,微结构的特征估计更加困难,灰质组织内的水分子扩散会遇到不太连贯的组织微环境,例如存在具有不同结构方向的多个微观屏障(细胞体、轴突和树突状体),导致这些区域扩散的复杂性增加和各向同性更高。因此,皮质组织的dMRI信号中得到特异

性特征通常需要更复杂的非线性优化^[48]。更重要的是,该问题无法通过增加dMRI的角度分辨率和空间分辨率来缓解。一种方式是通过增加额外的信息来填补特异性不足,例如增加信号的测量维度^[48],或联合T1和T2等正交维度的信息。后者依赖于复杂的弥散编码梯度或多种回波时间联合采样,限制了其在临床研究中的应用。

白质神经纤维可以看作是一系列三维空间中的流线,而纤维跟踪算法是根据dMRI信号描绘出的一系列的曲线。在纤维跟踪过程中,从微观结构模型中估计的纤维方向分布为流线的行进道路提供了局部方向的指引。而根据解剖学先验知识的皮层连接结构,可以为纤维跟踪提供全局的方向信息。根据局部方向信息、非局部方向信息以及全局方向信息可以将目前的纤维跟踪算法分为确定性、概率性和全局性跟踪。首先,确定性跟踪遵循可预测的路径(例如遵循主要扩散方向)来跟踪流线,但由于纤维的传播方向是唯一确定的,因此难以绘制出复杂的纤维结构^[102]。而且纤维方向分布估计存在“不确定性”,这是由于受到了dMRI信号的噪声干扰和容积效应的影响,因此确定性跟踪算法每一步“确定”的传播方向在“不确定性”的影响下会造成跟踪错误的情况。概率性跟踪算法则是在确定性方法上的改进,通过建立跟踪过程中的不确定信息模型,根据下一步跟踪方向的概率随机选择前进方向^[102]以获得更为全面的纤维分布情况,但同时也产生了虚假的纤维,相比确定性算法的计算成本也要更高。确定性跟踪与概率性跟踪均是依据局部水分子扩散方向信息来描绘纤维的过程,由于目前方法估计的纤维方向和实际的纤维结构存在模糊对应关系,使得局部跟踪的方法会出现误差累积的情况,因此研究者们开始考虑从全局的角度来重建大脑纤维。全局方法尝试通过找到最能描述测量扩散信号的配置来同时重建所有纤维轨迹。全局跟踪保证在噪声和成像伪影方面具有更好的稳定性,并且与获取的实际扩散信号具有更好的一致性。然而该方式的主要问题是它们依赖于随机优化程序,因此不能保证收敛到全局最优解。另一个问题是定义先验知识的随意性,过于严苛的先验知识可能会导致与实际结果不一致,从而导致假阳性纤维轨迹,而且过于松弛的先验知识规范可能会导致纤维轨迹与扩散信号无法完全匹配,从而导致无法产生与解剖学一致性的纤维轨迹。

4 结束语

dMRI技术为中医“辨证施治”带来了革命性变化,提供了客观、量化的诊断依据,显著提升了疾病诊断的精准度和治疗效果的评估能力。该技术减少了传统中医诊断对医师经验的依赖,通过揭示病变组织的弥散特征,帮助明确疾病性质。在治疗过程中,dMRI提供的生理数据为中医提供了科学支持,助力揭示气血问题,监测组织修复,确保治疗方案的针对性和有效性。此外,dMRI还促进了中医理论的发展,为气血、脏腑等概念提供了科学验证,丰富了中医理论体系。展望未来,dMRI在中医诊疗中的应用前景广阔,可观察针灸等传统疗法的效果,探索中医证候的微观基础,并通过统计分析增强诊断的客观性。结合传统四诊,dMRI能动态监测脑组织变化,优化治疗方案,实现个性化治疗。然而,dMRI在中医诊疗中的应用也面临挑战,主要是不同类型应用场景间的差异大,需要针对性的分析方法。尽管当前dMRI在微观和宏观结构技术上已取得显著进展,但满足中医临床需求的特定分析方法仍在探索中。未来,随着技术的不断发展和跨学科合作的加强,dMRI有望在中医诊疗中发挥更大作用,推动中医现代化进程。

参考文献:

- [1] DEHAY C, KENNEDY H. Evolution of the human brain[J]. *Science*, 2020, 369(6503): 506-507.
- [2] NADIG A, SEIDLITZ J, MCDERMOTT C L, et al. Morphological integration of the human brain across adolescence and adulthood[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(14): e2023860118.
- [3] OUYANG M, JEON T, SOTIRAS A, et al. Differential cortical microstructural maturation in the preterm human brain with

- diffusion kurtosis and tensor imaging[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(10): 4681-4688.
- [4] CRADDOCK R C, JBABDI S, YAN C G, et al. Imaging human connectomes at the macroscale[J]. *Nature Methods*, 2013, 10(6): 524-539.
- [5] SYDNOR V J, LARSEN B, BASSETT D S, et al. Neurodevelopment of the association cortices: Patterns, mechanisms, and implications for psychopathology[J]. *Neuron*, 2021, 109(18): 2820-2846.
- [6] 张国华. 纹状体静止性梗死对帕金森病患者黑质及运动障碍的影响[D]. 广州:南方医科大学, 2016.
ZHANG Guohua. The effects of striatal silent infarction on the substantia nigra and motor impairments in patients with Parkinson's disease[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2016.
- [7] 杨雄里. 为中国脑计划呐喊[J]. *中国科学:生命科学*, 2016, 46(2): 201-202.
YANG Xiongli. Thinking over the China brain project[J]. *Science in China: Life Sciences*, 2016, 46(2): 201-202.
- [8] ASSAF Y, ALEXANDER D C, JONES D K, et al. The CONNECT project: Combining macro- and micro-structure[J]. *NeuroImage*, 2013, 80: 273-282.
- [9] O'DONNELL L J, DADUCCI A, WASSERMANN D, et al. Advances in computational and statistical diffusion MRI[J]. *NMR in Biomedicine*, 2019, 32(4): e3805.
- [10] MAIER-HEIN K H, NEHER P F, HOUDE J C, et al. The challenge of mapping the human connectome based on diffusion tractography[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1349.
- [11] SCHILLING K G, NATH V, HANSEN C, et al. Limits to anatomical accuracy of diffusion tractography using modern approaches[J]. *NeuroImage*, 2019, 185: 1-11.
- [12] RICHARDS B A, LILICRAP T P, BEAUDOIN P, et al. A deep learning framework for neuroscience[J]. *Nature Neuroscience*, 2019, 22(11): 1761-1770.
- [13] 刘明, 熊航, 陈云翔, 等. 肝气郁结证脑深部核团及扣带回的磁共振扩散张量成像[J]. *世界中医药*, 2018, 13(10): 2617-2620.
LIU Ming, XIONG Hang, CHEN Yunxiang, et al. Magnetic resonance diffusion tensor imaging of deep brain nucleus and the cingulate gyrus of the liver qi stagnation syndrome[J]. *World Chinese Medicine*, 2018, 13(10): 2617-2620.
- [14] 李丽娟, 尉丽君, 张惠子, 等. 乳腺癌磁共振成像及弥散加权成像影像学特点与中医证型的关系[J]. *中医药导报*, 2019(14): 26-29.
LI Lijuan, WEI Lijun, ZHANG Huizi, et al. Study on the correlation between magnetic resonance imaging (MRI) and diffusion-weighted imaging (DWI) features and TCM syndrome differentiation of breast cancer[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2019(14): 26-29.
- [15] 刘海峰, 赵小菊, 张跃, 等. 磁共振形态学成像、DWI、DKI在乙肝后肝硬化中医证候分型中的价值[J]. *中国中医基础医学杂志*, 2019, 25(5): 617-620.
LIU Haifeng, ZHAO Xiaojun, ZHANG Yue, et al. Value of MR morphological imaging, DWI and DKI in TCM syndrome classification of posthepatitis B cirrhosis[J]. *Journal of Basic Chinese Medicine*, 2019, 25(5): 617-620.
- [16] ZHAI Y, YU W, SHEN W, et al. Diffusion tensor imaging evaluates effects of acupoint injection at zusanli (ST36) for Type 2 diabetic peripheral neuropathy[J]. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, 2022, 28: e935979.
- [17] 刘晓辉, 卿时汉, 王磊琼. 糖尿病足 DWI 功能成像与中医证型的相关性研究[J]. *影像研究与医学应用*, 2020, 4(17): 39-40.
LIU Xiaohui, QING Shihan, WANG Leiqiong. Correlation study between DWI functional imaging of diabetic foot and traditional Chinese medicine syndromes[J]. *Imaging Research and Medical Applications*, 2020, 4(17): 39-40.
- [18] 杨烁慧, 陆方, 潘卫东, 等. 针刺改善急性脑缺血后脑白质损伤的 DTI 研究[J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2013, 11(5): 463-465.
YANG Shuohui, LU Fang, PAN Weidong, et al. A DTI study of acupuncture improving the ischemic white matter injury in the stroke patients[J]. *Chinese Journal of Integrative Medicine Imaging*, 2013, 11(5): 463-465.
- [19] 杨洋, 陈甦, 许成, 等. 化痰通络汤治疗痰瘀阻络型卒中后认知功能障碍的临床效果[J]. *中外医学研究*, 2023, 21(34): 5-10.
YANG Yang, CHEN Su, XU Cheng, et al. Clinical effect of huatan tongluo decoction in the treatment of patients with post-stroke cognitive impairment of phlegm stasis obstructs collaterals[J]. *Chinese and Foreign Medical Research*, 2023, 21(34): 5-10.

- [20] 杨福霞, 侯冬梅, 高进云, 等. 针灸治疗对脑梗死后运动功能和皮质脊髓束损伤效果的神经影像学观察[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(11): 1312-1317.
YANG Fuxia, HOU Dongmei, GAO Jinyun, et al. Effects of acupuncture on motor and corticospinal tract impairment after cerebral infarction: Using diffusion tensor imaging and tractography[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2021, 27(11): 1312-1317.
- [21] 杨福霞, 高进云, 刘刚, 等. 调任通督针法对脑梗死弥散张量成像各向异性分数和上肢运动功能的影响[J]. 针刺研究, 2021, 46(7): 610-615.
YANG Fuxia, GAO Jinyun, LIU Gang, et al. Effect of tiaoren tongdu acupuncture method on fractional anisotropy of diffusion tensor imaging and upper extremity motor function after cerebral infarction[J]. Acupuncture Research, 2021, 46(7): 610-615.
- [22] 赵钧, 刘川, 吴爽, 等. 基于无创性功能磁共振量化分析口轮匝肌四针八穴透刺法治疗面神经麻痹的临床研究[J]. 实用中医内科杂志, 2020, 34(1): 55-58.
ZHAO Jun, LIU Chuan, WU Shuang, et al. Clinical study of non-invasive functional magnetic resonance quantitative analysis of orbicularis oculi muscle for facial paralysis[J]. Journal of Practical Traditional Chinese Internal Medicine, 2020, 34(1): 55-58.
- [23] HAN X, BAI L, SUN C, et al. Acupuncture enhances communication between cortices with damaged white matters in poststroke motor impairment[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2019, 2019: e4245753.
- [24] SHEN Y, LI M, WEI R, et al. Effect of acupuncture therapy for postponing Wallerian degeneration of cerebral infarction as shown by diffusion tensor imaging[J]. The Journal of Alternative and Complementary Medicine, 2012, 18(12): 1154-1160.
- [25] ZHAO N, ZHANG J, QIU M, et al. Scalp acupuncture plus low-frequency rTMS promotes repair of brain white matter tracts in stroke patients: A DTI study[J]. Journal of Integrative Neuroscience, 2018, 17(1): 125-139.
- [26] 代海洋, 黄古叶, 许文聪, 等. 调肝化纤丸对乙型肝炎肝纤维化的防治临床疗效及对弥散加权成像的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(4): 159-165.
DAI Haiyang, HUANG Guye, XU Wencong, et al. Efficacy of tiaogan huaxian pills in prevention and treatment of hepatic fibrosis in hepatitis B and its effect on diffusion-weighted imaging[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2024, 30(4): 159-165.
- [27] WANG J M, MI S S, ZHENG L J, et al. Efficacy and safety of Tuina and intermediate frequency electrotherapy for frozen shoulder: MRI-based observation evidence[J]. American Journal of Translational Research, 2023, 15(3): 1766-1778.
- [28] ZHOU Z, FU S, LIU Y, et al. Study of efficacy and safety of Jiaotai pill in the treatment of depression[J]. Medicine, 2020, 99(18): e19999.
- [29] FAN L, LU G, YUAN H, et al. Effects of acupuncture at acupoints along lung meridian on cervical spondylosis of cervical type: A protocol for randomized controlled trial[J]. Medicine: Case Reports and Study Protocols, 2021, 2(7): e0125.
- [30] YIN T, HE Z, MA P, et al. Effect and cerebral mechanism of acupuncture treatment for functional constipation: Study protocol for a randomized controlled clinical trial[J]. Trials, 2019, 20(1): 283.
- [31] 孙阳. “基于治病求本”理念的针刺抗抑郁脑核磁影像学探索[D]. 北京:北京中医药大学, 2022.
SUN Yang. Exploration of acupuncture for depression based on the concept of ‘treating the root cause’ through brain MRI imaging[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2022.
- [32] 王焱. 结合DTI评价温肾健脑方治疗 α 突触核蛋白病合并白质高信号临床研究[D]. 北京:北京中医药大学, 2023.
WANG Yao. Clinical study on the treatment of α -synucleinopathy with white matter hyperintensities using the Wen Shen Jian Nao formula combined with DTI evaluation[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2023.
- [33] 张旭冉. 珍龙醒脑胶囊治疗缺血性中风恢复早期的临床评价及脑效应机制研究[D]. 北京:北京中医药大学, 2023.
ZHANG Xuran. Clinical evaluation and brain mechanism study of Zhenlong Xingnao capsules in the early recovery of ischemic stroke[D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2023.
- [34] 朱巍明, 李鑫, 姬琳, 等. 基于DTI评价急性缺血性脑卒中运动功能缺损程度与肾虚髓亏证的相关性研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2022, 24(5): 2137-2150.
ZHU Weiming, LI Xin, JI Lin, et al. Study on the correlation between the degree of motor dysfunction and the syndrome of kidney-marrow deficiency in acute ischemic stroke based on DTI[J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2022, 24(5): 2137-2150.

- [35] CAO J, HUANG Y, MESHBERG N, et al. Neuroimaging-based scalp acupuncture locations for dementia[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2020, 9(8): 2477.
- [36] 黄克诚. 缺血性中风中经络辨证与DTI定量评估皮质脑桥小脑束损伤的比较研究[D]. 上海:上海中医药大学, 2017.
HUANG Kecheng. Comparative study of meridian differentiation and DTI quantitative assessment of corticopontocerebellar tract injury in ischemic stroke[D]. Shanghai: Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, 2017.
- [37] 尹岭, 金香兰, 石现, 等. 针刺足三里穴PET和fMRI脑功能成像的初步探讨[J]. *中国康复理论与实践*, 2002, 8(9): 523-524.
YIN Ling, JIN Xianglan, SHI Xian, et al. Preliminary study on brain functional imaging of acupuncture at Zusanli point using PET and fMRI[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2002, 8(9): 523-524.
- [38] GUO G, KONG Y, ZHU Q, et al. Cerebral mechanism of Tuina analgesia in management of knee osteoarthritis using multimodal MRI: Study protocol for a randomised controlled trial[J]. *Trials*, 2022, 23(1): 1-13.
- [39] HONG J, SUN J, ZHANG L, et al. Neurological mechanism and treatment effects prediction of acupuncture on migraine without aura: Study protocol for a randomized controlled trial[J]. *Frontiers in Neurology*, 2022, 13: 981752.
- [40] 潘细根, 邵阳通, 潘玲玲, 等. 核磁共振弥散张量成像技术在中医康复治疗神经根型颈椎病疗效评价中的应用价值[J]. *中国现代医生*, 2021, 59(21): 96-99.
PAN Xigen, SHAO Yangtong, PAN Lingling, et al. Application value of MRI diffusion tensor imaging in evaluation of curative effect of traditional Chinese medicine rehabilitation for cervical spondylotic radiculopathy[J]. *China Modern Doctor*, 2021, 59(21): 96-99.
- [41] 张力平, 张立强, 周世英. 探析磁共振弥散张量成像技术评估中医康复治疗神经根型颈椎病疗效的应用效果[J]. *影像研究与医学应用*, 2022, 6(11): 176-178.
ZHANG Liping, ZHANG Liqiang, ZHOU Shiyong. Exploring the application of magnetic resonance diffusion tensor imaging technology in evaluating the efficacy of traditional Chinese medicine rehabilitation for cervical radiculopathy[J]. *Imaging Research and Medical Applications*, 2022, 6(11): 176-178.
- [42] 徐华丽. 中医辨证分型与磁共振技术在预测缺血性卒中后运动功能康复的价值及相关性研究[D]. 上海:上海中医药大学, 2023.
XU Huali. Syndrome differentiation and classification of traditional Chinese medicine and magnetic resonance technology study on the value and correlation of exercise rehabilitation in predicting ischemic stroke[D]. Shanghai: Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, 2023.
- [43] KANG J, WANG D, DUAN Y, et al. Evaluation of motor function rehabilitation for stroke patients based on magnetic resonance DTI technology[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 77850-77864.
- [44] BAI L, TAO Y, WANG D, et al. Acupuncture induces time-dependent remodelling brain network on the stable somatosensory first-ever stroke patients: Combining diffusion tensor and functional MR imaging[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014, 2014: 740480.
- [45] 刘钰, 陈红, 王昊, 等. 推拿对颈椎病疼痛患者脑白质微观结构影响[J]. *辽宁中医药大学学报*, 2021, 23(2): 167-171.
LIU Yu, CHEN Hong, WANG Hao, et al. Effect of massage on the microstructure of white matter in patients with pain of cervical spondylosis[J]. *Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine*, 2021, 23(2): 167-171.
- [46] NOVIKOV D S, FIEREMANS E, JESPERSEN S N, et al. Quantifying brain microstructure with diffusion MRI: Theory and parameter estimation[J]. *NMR in Biomedicine*, 2019, 32(4): e3998.
- [47] HAGMANN P, JONASSON L, MAEDER P, et al. Understanding diffusion MR imaging techniques: From scalar diffusion-weighted imaging to diffusion tensor imaging and beyond[J]. *RadioGraphics*, 2006, 26(S1): S205-S223.
- [48] 龚婷. 基于扩散磁共振成像的大脑微观结构快速及定量成像方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
GONG Ting. Fast and quantitative imaging methods of brain microstructure based on diffusion magnetic resonance imaging[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [49] JENSEN J H, HELPERN J A, RAMANI A, et al. Diffusional kurtosis imaging: The quantification of non-Gaussian water diffusion by means of magnetic resonance imaging[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2005, 53(6): 1432-1440.
- [50] WU E X, CHEUNG M M. MR diffusion kurtosis imaging for neural tissue characterization[J]. *NMR in Biomedicine*, 2010, 23(7): 836-848.
- [51] HUANG S, HUANG C, LI M, et al. White matter abnormalities and cognitive deficit after mild traumatic brain injury:

- Comparing DTI, DKI, and NODDI[J]. *Frontiers in Neurology*, 2022, 13: 803066.
- [52] SCHIAVI S, PETRACCA M, SUN P, et al. Non-invasive quantification of inflammation, axonal and myelin injury in multiple sclerosis[J]. *Brain: A Journal of Neurology*, 2021, 144(1): 213-223.
- [53] HUANG Q, GARRETT A, BOSE S, et al. The frontier of live tissue imaging across space and time[J]. *Cell Stem Cell*, 2021, 28(4): 603-622.
- [54] DEMANELIS K, JASMINE F, CHEN L S, et al. Determinants of telomere length across human tissues[J]. *Science*, 2020, 369(6509): eaaz6876.
- [55] ASSAF Y, BASSER P J. Composite hindered and restricted model of diffusion (CHARMED) MR imaging of the human brain [J]. *NeuroImage*, 2005, 27(1): 48-58.
- [56] ASSAF Y, BLUMENFELD-KATZIR T, YOVEL Y, et al. AxCaliber: A method for measuring axon diameter distribution from diffusion MRI[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2008, 59(6): 1347-1354.
- [57] ZHANG H, SCHNEIDER T, WHEELER-KINGSHOTT C A, et al. NODDI: Practical in vivo neurite orientation dispersion and density imaging of the human brain[J]. *NeuroImage*, 2012, 61(4): 1000-1016.
- [58] DADUCCI A, CANALES-RODRÍGUEZ E J, ZHANG H, et al. Accelerated microstructure imaging via convex optimization (AMICO) from diffusion MRI data[J]. *NeuroImage*, 2015, 105: 32-44.
- [59] ZHANG H, DYRBY T B, ALEXANDER D C. Axon diameter mapping in crossing fibers with diffusion MRI[C]// *Proceedings of Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2011*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 82-89.
- [60] FAROOQ H, XU J, NAM J W, et al. Microstructure imaging of crossing (MIX) white matter fibers from diffusion MRI[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 38927.
- [61] KADEN E, KRUGGEL F, ALEXANDER D C. Quantitative mapping of the per-axon diffusion coefficients in brain white matter[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2016, 75(4): 1752-1763.
- [62] LE BIHAN D, BRETON E, LALLEMAND D, et al. Separation of diffusion and perfusion in intravoxel incoherent motion MR imaging.[J]. *Radiology*, 1988, 168(2): 497-505.
- [63] 张颖. 出血中风中经络的磁共振弥散张量成像的初步探讨[D]. 福州:福建中医药大学, 2017.
ZHANG Ying. Preliminary study of diffusion tensor imaging about meridan of hemorrhagic apoplexy[D]. Fuzhou: Fujian University of Traditional Chinese Medicine, 2017.
- [64] 史海燕, 王兆蒙, 张超, 等. 活血通络开窍汤联合重复经颅磁刺激治疗脑卒中后认知功能障碍临床研究[J]. *新中医*, 2022, 54(23): 65-68.
SHI Haiyan, WANG Zhaomeng, ZHANG Chao, et al. Clinical study on Huoxue Tongluo Kaiqiao Tang combined with repetitive transcranial magnetic stimulation for post-stroke cognitive impairment[J]. *New Traditional Chinese Medicine*, 2022, 54(23): 65-68.
- [65] MA S M, WANG L, SU X T, et al. Acupuncture improves white matter perfusion and integrity in rat model of vascular dementia: An MRI-based imaging study[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2020, 12: 363.
- [66] FRISTON K J. Functional and effective connectivity in neuroimaging: A synthesis[J]. *Human Brain Mapping*, 1994, 2(1/2): 56-78.
- [67] BASSETT D S, BULLMORE E. Small-world brain networks[J]. *The Neuroscientist*, 2006, 12(6): 512-523.
- [68] BULLMORE E, SPORNS O. Complex brain networks: Graph theoretical analysis of structural and functional systems[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2009, 10(3): 186-198.
- [69] SPORNS O, HONEY C J, KÖTTER R. Identification and classification of hubs in brain networks[J]. *PLoS ONE*, 2007, 2(10): e1049.
- [70] FORNITO A, ZALESKY A, BREAKSPEAR M. The connectomics of brain disorders[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2015, 16(3): 159-172.
- [71] MIŠIĆ B, BETZEL R F, NEMATZADEH A, et al. Cooperative and competitive spreading dynamics on the human connectome[J]. *Neuron*, 2015, 86(6): 1518-1529.
- [72] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.

- [73] LATORA V, MARCHIORI M. Efficient behavior of small-world networks[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(19): 198701.
- [74] LIU L Y, XU X P, LUO L Y, et al. Brain connectomic associations with traditional Chinese medicine diagnostic classification of major depressive disorder: A diffusion tensor imaging study[J]. *Chinese Medicine*, 2019, 14(1): 1-10.
- [75] CATANI M, HOWARD R J, PAJEVIC S, et al. Virtual in vivo interactive dissection of white matter fasciculi in the human brain[J]. *NeuroImage*, 2002, 17(1): 77-94.
- [76] THIEBAUT DE SCHOTTEN M, FFYTCHÉ D H, BIZZI A, et al. Atlasing location, asymmetry and inter-subject variability of white matter tracts in the human brain with MR diffusion tractography[J]. *NeuroImage*, 2011, 54(1): 49-59.
- [77] RHEAULT F, DE BENEDICTIS A, DADUCCI A, et al. Tractostorm: The what, why, and how of tractography dissection reproducibility[J]. *Human Brain Mapping*, 2020, 41(7): 1859-1874.
- [78] FISCHL B. FreeSurfer[J]. *Neuroimage*, 2012, 62(2): 774-781.
- [79] DESIKAN R S, SÉGONNE F, FISCHL B, et al. An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest[J]. *NeuroImage*, 2006, 31(3): 968-980.
- [80] MAZZIOTTA J, TOGA A, EVANS A, et al. A probabilistic atlas and reference system for the human brain: International consortium for brain mapping (ICBM)[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 2001, 356(1412): 1293-1322.
- [81] MORI S, OISHI K, JIANG H, et al. Stereotaxic white matter atlas based on diffusion tensor imaging in an ICBM template[J]. *NeuroImage*, 2008, 40(2): 570-582.
- [82] KREILKAMP B A K, WEBER B, RICHARDSON M P, et al. Automated tractography in patients with temporal lobe epilepsy using TRActs constrained by underlying anatomy (TRACULA)[J]. *NeuroImage: Clinical*, 2017, 14: 67-76.
- [83] WASSERTHAL J, NEHER P F, HIRJAK D, et al. Combined tract segmentation and orientation mapping for bundle-specific tractography[J]. *Medical Image Analysis*, 2019, 58: 101559.
- [84] RHEAULT F, ST-ONGE E, SIDHU J, et al. Bundle-specific tractography with incorporated anatomical and orientational priors[J]. *NeuroImage*, 2019, 186: 382-398.
- [85] JOHANSEN-BERG H, BEHRENS T E J. Just pretty pictures? What diffusion tractography can add in clinical neuroscience [J]. *Current Opinion in Neurology*, 2006, 19(4): 379-385.
- [86] YEATMAN J D, DOUGHERTY R F, MYALL N J, et al. Tract profiles of white matter properties: Automating fiber-tract quantification[J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(11): e49790.
- [87] CHANDIO B Q, RISACHER S L, PESTILLI F, et al. Bundle analytics, a computational framework for investigating the shapes and profiles of brain pathways across populations[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 17149.
- [88] NEHER P. Radiomic tractometry reveals tract-specific imaging biomarkers in white matter[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 303.
- [89] GLOZMAN T, BRUCKERT L, PESTILLI F, et al. Framework for shape analysis of white matter fiber bundles[J]. *NeuroImage*, 2018, 167: 466-477.
- [90] WU Y, ZHANG F, MAKRIS N, et al. Investigation into local white matter abnormality in emotional processing and sensorimotor areas using an automatically annotated fiber clustering in major depressive disorder[J]. *NeuroImage*, 2018, 181: 16-29.
- [91] 李保朋, 杨军, 韩坤铤, 等. 缓解期风火候偏头痛患者脑白质 DTI 的 TBSS 分析[J]. *医学影像学杂志*, 2017, 27(10): 1845-1849.
LI Baopeng, YANG Jun, HAN Kunqi, et al. A study in migraine patients of feng huo syndrome based on the diffusion tensor imaging TBSS analysis[J]. *Journal of Medical Imaging*, 2017, 27(10): 1845-1849.
- [92] 周媛. 肝阳上亢证与气血亏虚证慢性偏头痛的弥散张量成像研究[D]. 成都:成都中医药大学, 2021.
ZHOU Yuan. Diffusion tensor imaging of chronic migraine with hyperactivity of liver Yang and deficiency of qi and blood[D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2021.
- [93] 孟祥东. 磁共振成像联合 TCD 检查对中枢性眩晕的诊断价值及与中医证型的关系[D]. 咸阳:陕西中医药大学, 2015.
MENG Xiangdong. The diagnos value of magnetic resonance imaging combined TCD examination in the central vertigo and its

- relationship with TCM syndrome type[D]. Xianyang: Shaanxi University of Traditional Chinese Medicine, 2015.
- [94] 尹燕. DTI检查结合经络辨证针刺治疗腰椎间盘突出症的临床研究[D]. 成都:成都中医药大学, 2022.
YIN Yan. Clinical study on treatment of lumbar disc herniation by acupuncture based on DTI and meridian syndrome differentiation[D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2022.
- [95] 李伟. 韦氏调衡手法对颈椎失稳患者治疗前后颈部肌群DTI影响的研究[D]. 南宁:广西中医药大学, 2019.
LI Wei. The research of DTI effect on cervical muscle group of cervical instability patients before and after treatment by Wei's balance technique[D]. Nanning: Guangxi University of Traditional Chinese Medicine, 2019.
- [96] 王佩蓉, 杨春玉, 连中, 等. 基于DTI技术对针刺联合盐酸文拉法辛治疗抑郁症的疗效研究[J]. 中国针灸, 2019(6): 571-575.
WANG Peirong, YANG Chunyu, LIAN Zhong, et al. Therapeutic effect of the combined treatment with acupuncture and venlafaxine hydrochloride on depression based on diffusion tensor imaging technology[J]. Chinese Acupuncture & Moxibustion, 2019(6): 571-575.
- [97] 蔡淑英, 刘振寰, 彭桂兰, 等. 通督醒神针刺法治疗早产儿脑白质损伤疗效观察[J]. 中国针灸, 2018(1): 51-54, 58.
CAI Shuying, LIU Zhenhuan, PENG Guilan, et al. Therapeutic effects on cerebral white matter injury of premature infants treated with acupuncture for promoting the governor vessel and tranquilizing the mind[J]. Chinese Acupuncture & Moxibustion, 2018(1): 51-54, 58.
- [98] LI Y, WANG J, YAN X, et al. Combined fractional anisotropy and subcortical volumetric deficits in patients with mild-to-moderate depression: Evidence from the treatment of antidepressant traditional Chinese medicine[J]. Frontiers in Neuroscience, 2022, 16: 959960.
- [99] ZENG Y, CHENG A S K, SONG T, et al. Effects of acupuncture on cancer-related cognitive impairment in Chinese gynecological cancer patients: A pilot cohort study[J]. Integrative Cancer Therapies, 2018, 17(3): 737-746.
- [100] WU Z, HU J, DU F, et al. Long-term changes of diffusion tensor imaging and behavioural status after acupuncture treatment in rats with transient focal cerebral ischaemia[J]. Acupuncture in Medicine, 2012, 30(4): 331-338.
- [101] ZHANG G, ZHENG H, ZHUANG J, et al. MRI study of traditional Chinese medicinal physiotherapy to promote glymphatic system function in patients with insomnia[J]. Journal of the Neurological Sciences, 2023, 455: 122008.
- [102] 李茂, 何建忠, 冯远静. 神经纤维跟踪算法研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2020, 25(8): 1513-1528.
LI Mao, HE Jianzhong, FENG Yuanjing. Research progress on neural fiber tracking algorithms[J]. Journal of Image and Graphics, 2020, 25(8): 1513-1528.

作者简介:



吴焯(1989-), 通信作者, 男, 教授, 研究方向: 医学图像分析、人工智能, E-mail: wuye@njust.edu.cn。



和岚翔(2003-), 女, 本科, 研究方向: 脑影像分析。



张鑫媛(1985-), 女, 副教授, 研究方向: 医学磁共振图像后处理分析。



伏云鹤(1991-), 女, 中医师, 研究方向: 针灸的临床应用。



刘小明(1988-), 男, 副主任技师, 研究方向: 磁共振成像新技术及临床应用。



何建忠(1993-), 通信作者, 男, 讲师, 研究方向: 智慧医疗, E-mail: hjzhong@zjut.edu.cn。

(编辑: 王静)