doi:10.11659/jjssx.07E025041

·综述·

卒中后认知障碍的磁共振扩散成像研究进展

王 川[1],金胜昔[2],郤国虎[2],丁 卫[2] (1.武汉科技大学第一临床学院,湖北 武汉 430064;2.武汉科技大学附属天佑医院神经外科,湖北 武汉 430064)

[摘 要] 卒中后认知障碍(PSCI)是脑卒中后常见且致残性极高的并发症,目前临床诊断主要依赖神经心理学量表评估,但结果易受患者年龄、受教育程度及情绪状态等因素干扰。磁共振扩散成像(dMRI)技术可以无创性评估脑组织微结构改变,为深入研究PSCI提供了重要工具。本文就扩散张量微成像、扩散峰度成像、自由水扩散张量成像及神经突方向离散度和密度成像等技术在PSCI中的研究进展进行综述。

[关键词] 卒中后认知障碍;磁共振扩散成像;扩散张量成像;扩散峰度成像;自由水扩散张量成像;神经突方向离散度和密度成像
[中图分类号] R445.2 [文献标志码] A [收稿日期] 2025-07-09

Progress in diffusion magnetic resonance imaging for post-stroke cognitive impairment

WANG Chuan[1], JIN Sheng-xi[2], KUAI Guo-hu[2], DING Wei[2] (1.First Clinical College, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430064, China; 2.Department of Neurosurgery, Tianyou Hospital Affiliated to Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430064, China)

Abstract: Post-stroke cognitive impairment (PSCI) is a common and highly disabling complication after stroke. Currently, clinical diagnosis primarily relies on neuropsychological scales for assessment, but the results are susceptible to confounding factors such as age, educational level, and emotional state. Diffusion magnetic resonance imaging (dMRI) techniques can non-invasively assess the microstructure changes of brain tissue, providing an important tool for in-depth research on PSCI. This article reviews the research progress of techniques such as diffusion tensor imaging, diffusion kurtosis imaging, free-water diffusion tensor imaging, and neurite orientation dispersion and density imaging in PSCI.

Keywords: post-stroke cognitive impairment; diffusion magnetic resonance imaging; diffusion tensor imaging; diffusion kurtosis imaging; free-water diffusion tensor imaging; neurite orientation dispersion and density imaging

[基金项目] 湖北省教育厅科学研究计划青年人才项目(Q20241111)
[通信作者] 丁 卫,E-mail:1092578713@qq.com

[13] 李 阳. 近红外光谱技术测定国人脑氧饱和度基线值及其影响因素的研究[D]. 重庆:中国人民解放军陆军军医大学,2023.
[14] Hirose T, Shiozaki T, Nomura J, et al. Pre-hospital portable monitoring of cerebral regional oxygen saturation (rSO_2) in seven patients with out-of-hospital cardiac arrest[J]. BMC Res Notes, 2016, 9(1): 428. doi:10.1186/s13104-016-2239-4.
[15] Hamanaka K, Shimoto M, Hitosugi M, et al. Cerebral oxygenation monitoring during resuscitation by emergency medical technicians: a prospective multicenter observational study[J]. Acute Med Surg, 2020, 7(1): e528. doi:10.1002/ams2.528.
[16] Jeong H, Jeong S, Lim HJ, et al. Cerebral oxygen saturation measured by near-infrared spectroscopy and jugular venous bulb oxygen saturation during arthroscopic shoulder surgery in beach chair position under sevoflurane-nitrous oxide or propofol-remifentanil anesthesia[J]. Anesthesiology, 2012, 116(5): 1047-1056. doi:10.1097/ALN.0b013e31825154d2.
[17] Papadopoulos G, Karanikolas M, Liarmakopoulou A, et al. Cerebral oximetry and cognitive dysfunction in elderly patients undergoing surgery for hip fractures: a prospective observational study[J]. Open Orthop J, 2012, 6: 400-405. doi:10.2174/1874325001206010400.
[18] Budohoski KP, Czosnyka M, Kirkpatrick PJ, et al. Clinical relevance of cerebral autoregulation following subarachnoid haemorrhage[J]. Nat Rev Neurol, 2013, 9(3): 152-163. doi:10.1038/nrneurol.2013.11.
[19] Ahn A, Yang J, Inigo-Santiago L, et al. A feasibility study of cerebral oximetry monitoring during the post-resuscitation period in comatose patients following cardiac arrest[J]. Resuscitation, 2014, 85(4): 522-526. doi:10.1016/j.resuscitation.2013.12.007.
[20] Shellen S, Parnia S, Huppert EL, et al. Integrating rSO_2 and EEG monitoring in cardiopulmonary resuscitation: a novel methodology[J]. Resusc Plus, 2024, 18: 100644. doi:10.1016/j.resplu.2024.100644.
[21] Tobias JD. Cerebral oxygenation monitoring: near-infrared spectroscopy[J]. Expert Rev Med Devices, 2006, 3(2): 235-243. doi:10.1586/17434440.3.2.235.

(编辑:杨 颖)

卒中后认知障碍(post-stroke cognitive impairment,PSCI)是脑卒中后常见且致残性极高的并发症,指卒中后出现并持续至发病6个月后仍符合认知障碍诊断标准的临床综合征[1]。其病理机制复杂,涉及神经炎症、氧化应激和动脉粥样硬化等多种因素的共同作用[2]。流行病学数据显示,PSCI的发生率在不同国家与人群中存在差异,总体在20%~75%[3]。值得注意的是,中国PSCI的发生率明显高于全球平均水平,疾病负担较重。一项2023年的多中心研究显示,中国首发缺血性卒中患者中,PSCI发生率高达78.7%,高龄、低教育水平及居住于西部地区是其独立风险因素[4]。美国卒中协会2023年的科学声明也指出,约50%的脑卒中患者在发病后1年内会出现不同程度认知功能障碍,其中约1/3可能在5年内进展为痴呆[5]。尽管卒中诊疗水平的提升显著提高了患者的生存率,但PSCI所导致的认知功能下降仍严重影响患者的生活质量和长期预后,成为制约患者康复效果和社会功能恢复的关键因素。因此,对PSCI进行早期识别及有效干预具有重要临床意义。

目前,神经心理学评估是临床诊断PSCI的主要工具,常用量表包括蒙特利尔认知评估(montreal cognitive assessment,MoCA)和简易智力状态检查(mini-mental state examination,MMSE)等[6]。然而,这些量表的评估结果易受到患者年龄、受教育程度及情绪状态等因素的干扰,若未经校正,特异性往往偏低[7-9]。影像学检查在PSCI的诊断和病理机制研究中具有重要价值,但也存在一定局限性,例如常规颅脑影像虽能清晰显示脑卒中引起的宏观结构性损伤,却难以充分解释认知功能障碍的严重程度和多样性[10]。同时,越来越多的临床研究也表明,PSCI的病理生理过程不仅限于宏观结构改变,更涉及脑白质纤维束、神经元网络连接等微结构的损害[11-13]。

在此背景下,磁共振扩散成像(diffusion magnetic resonance imaging,dMRI)技术凭借其无创性评估脑组织微结构变化的能力[14],成为了解析PSCI病理机制的有力工具。dMRI技术体系发展迅速,其演进逻辑在于不断突破前序模型的局限,以更精确地刻画脑微结构[15]。dMRI技术体系目前已从基础的扩散张量成像(diffusion tensor imaging,DTI),逐渐发展出扩散峰度成像(diffusion kurtosis imaging,DKI)、自由水扩散张量成像(free-water diffusion tensor imaging,FW-DTI)以及神经突方向离散度和密度成像(neurite orientation dispersion and density imaging,NODDI)等高级模型。这些技术从不同维度提供互补信息,共同推动PSCI研究的深入[16]。dMRI的不断进步不仅深化了对PSCI病理机制的理解,也为疾病的早期诊断和预后监测提供了客观的影像学依据。本文将对上述dMRI技术在PSCI研究中的最新进展进行综述。

1 DTI

DTI作为一种成熟的dMRI技术,为后续复杂模型提供了基础框架。该技术通过量化水分子扩散的各向异性特征,可构建大脑白质纤维束的三维结构[17]。其评估微结构完整性的核心参数包括:分数各向异性(fractional anisotropy,FA),反映水分子对扩散方向的依赖及白质纤维结构排列的完整一致性;平均扩散率(mean diffusivity,MD),代表水分子扩散的整体幅度;轴向扩散系数(axial diffusivity,AD)和径向扩散系数(radial diffusivity,RD),分别表示平行和垂直于主纤维轴方向的扩散能力,通常与轴突和髓鞘的完整性相关[17-19]。

DTI在识别PSCI白质损伤方面展现出巨大优势。He等[20]研究发现,PSCI患者在胼胝体膝部、双侧内囊前肢及左侧上放射冠等关键纤维束区域的FA值显著降低,并伴随MD值升高,提示这些区域的神经纤维微结构完整性受损。进一步分析发现,胼胝体膝部FA值降低与执行功能测试表现呈负相关,表明白质微结构损伤可能导致执行功能障碍。Moore等[21]的研究深入探讨了PSCI患者特定认知功能障碍与白质网络中断的关系,结果表明:语言障碍主要与左侧额颞叶白质连接中断相关,计算障碍与连接左苍白球和躯体运动网络的纤维束中断相关,而左侧空间忽视则与右侧半球广泛的白质网络失连接相关。这些研究揭示了DTI在白质网络损伤解析方面优于传统颅脑影像技术。

同时,DTI对阐明PSCI病理机制也发挥着重要作用。孙国臣等[22]研究显示,PSCI患者双侧海马、额叶及胼胝体白质区域的FA值明显低于对照组,且FA值与MoCA评分呈正相关;其中右侧海马FA值对PSCI具有突出的预测效能,受试者工作特征曲线下面积(*area under the curve*,*AUC*)达0.911,敏感度为93.5%。这证实了上述区域白质结构损伤是PSCI的重要病理基础,反映了白质网络连接异常导致的神经传导功能下降。Song等[23]研究发现,幕上深部脑出血患者同侧海马FA值呈进行性显著下降,FA值与MoCA和MMSE认知评分呈正相关,提示同侧海马白质纤维持续损伤及继发性远隔区域损伤参与PSCI的发生发展。Wang等[24-25]从网络整合的角度揭示了PSCI的病理本质,发现PSCI组在楔前叶、扣带回等关键区域的节点效率显著降低,主要表现为全局效率降低和聚类系数

升高,且全局效率的下降与MMSE评分显著相关。这表明PSCI导致的全脑结构网络破坏可阻碍认知信息传递,进而损害患者注意力、记忆力和执行功能等认知域,提示网络效率下降可能是PSCI的重要病理机制。

此外,DTI在PSCI的预后预测和治疗评估方面也具有重要价值。Moulton等[26]在对急性卒中溶栓患者的研究中发现,这些患者在皮质脊髓束和弓状束等深部白质交叉区域的AD值呈不对称性降低,提示存在急性轴突损伤;基于此构建的预后模型对患者3个月后认知功能的预测准确率达82.8%,优于传统病灶分割方法,这证明连续DTI参数能敏感反映缺血拓扑结构与长期预后的关系,对PSCI的早期预后评估及神经保护策略制定具有重要意义。Chen等[27]通过经皮耳迷走神经刺激(transcutaneous auricular vagus nerve stimulation,taVNS)治疗发现,PSCI患者治疗前双侧背外侧前额叶皮层等区域的FA值降低,表明白质微结构损伤;经8周干预后,上述区域FA值显著升高,并伴有纤维束数量增加,表明轴突完整性改善、纤维连接增强及半球间信息传递效率提升。这些白质重塑变化可能是认知功能改善的神经基础,也为taVNS治疗PSCI提供了影像学证据。

DTI已成为研究PSCI白质损伤模式、病理机制、预后及治疗评估的有力工具。然而,该技术对复杂脑区(如灰质、灰白质交界区)扩散变化的解析能力有限,且其参数缺乏指向特定病理改变的特异性。这些局限推动了更高级扩散成像技术的发展与应用。

2 DKI

为突破DTI的技术局限,DKI通过量化水分子扩散位移的非高斯特性,更精准地体现了水分子在复杂脑组织微环境的扩散行为。该技术不仅保留了DTI参数,还引入了平均峰度(mean kurtosis,MK)、峰度各向异性(kurtosis anisotropy,KA)、轴向峰度(axial kurtosis,AK)和径向峰度(radial kurtosis,RK)等独特指标,显著提升了对灰质微结构及复杂区域的解析能力[28]。

DKI对检测PSCI白质微结构损伤具有更高的敏感度。Wu等[29]研究发现,卒中后1年随访时,PSCI患者在胼胝体、扣带回及上纵束等白质区域的MK和KA值显著低于健康对照组,提示广泛白质结构损伤;同时,该研究进一步显示,即使卒中患者认知功能有所改善,其白质的MK和KA值仍持续低于对照组,且PSCI组患者的这些参数下降幅度更大、速度更快,这说明DKI参数能敏锐监测卒中后白质微结构的进行性退化,该过程独立于临床症状改善并持续进展。He等[20]研究发现,相较于DTI,DKI参数在PSCI组检测到的异常白质区域更多,并额外识别出左侧内囊后肢、右侧扣带束及上纵束等结构存在MK和RK值降低,提示这些区域存在更细微的微结构损伤;此外,该研究还发现,左侧内囊前肢的MK和RK值与执行功能测试呈强负相关,进一步证实了DKI参数与认知功能障碍的明确关联。上述两项研究共同表明DKI能更敏感地捕捉PSCI不同阶段的白质微结构损伤。

DKI在评估PSCI相关的灰质及灰白质交界区损伤方面也表现出色。Fan等[30]研究发现,PSCI组在胼胝体压部、丘脑等灰白质交界区及深部灰质区呈现出MD值升高与MK值降低,这些变化与MMSE评分显著相关,提示存在轴突脱髓鞘及组织复杂性下降等病理改变。研究证实DKI参数,尤其是胼胝体压部的MD值,对PSCI具有较高的诊断价值,其*AUC*高达0.964,敏感度和特异度分别为91.4%和100%,可为早期诊断提供敏感的影像学标志物。Zhu等[31]对急性缺血性卒中患者的研究发现,在基底节、丘脑等缺血灰质区域,平均峰度变化率(ΔMK)轻度升高,表明以神经元胞体为主的微结构损伤较轻;轴向峰度变化率(ΔAK)和径向峰度变化率(ΔRK)也轻度升高,但无方向性差异,提示弥漫性微环境紊乱。在灰白质交界区,ΔMK呈中度升高,其升高幅度显著低于白质区,提示混合性微结构破坏;同时,该区ΔAK明显高于ΔRK,提示存在定向纤维损伤。灰质及交界区相对较低的参数变化幅度提示其微结构保留较好,认知障碍风险也低于白质区。DKI通过量化不同脑区的微结构损伤程度,有助于指导PSCI的早期识别和干预。

显然,DKI技术较DTI能提供更广泛、精细的微结构变化信息,但其参数反映特定病理表现的特异性仍较低,一定程度上阻碍了PSCI研究的深入。

3 FW-DTI

FW-DTI是一种基于双室模型的dMRI技术,其核心原理是分离体素内的自由水与组织水信号,有效消除自由水信号对传统DTI参数的干扰(即部分容积效应)[32]。该技术提供的关键参数中,自由水分数(free water,FW)反映体素内自由水所占比例,其升高常提示血管源性水肿或脑萎缩;同时,该技术还提供了校正后的组织特异性扩散参数,包括组织分数各向异性(fractional anisotropy of tissue,FAt)、组织平均扩散率(mean diffusivity of tissue,MDt)、组织轴向扩散率(axial diffusivity of tissue,ADt)和组织径向扩散率(radial diffusivity of tissue,RDt),这些校正参数能够更

精准地表征脑组织微结构的完整性[33]。

FW-DTI在评估血管源性病理改变方面具有独特价值。Kern等[34]研究发现,急性缺血性卒中后24 h内,非梗死区全脑FW短暂升高4.2%,提示存在卒中相关的间质水肿和神经炎症反应;且急性期FW变化与患者卒中后30 d、90 d的MoCA评分显著相关,表明FW-DTI能早期识别与后续认知障碍风险相关的全脑病理改变。其后续研究进一步发现,对于既往存在缺血性脑卒中伴白质高信号(white matter hyperintensity,WMH)的患者,其WMH周边正常表现白质(normal appearing white matter,NAWM),尤其是WMH周围3 mm范围内被定义为"半暗带"的区域,是WMH进展的高风险区[35]。该区域基线FW值升高是预测NAWM进展为新WMH的敏感指标,提示血管源性间质液聚集是白质损伤的早期病理表现。FW-DTI通过量化急性病理反应和慢性白质变化,为PSCI的风险识别和干预靶点选择提供了新视角。

FW-DTI技术通过消除自由水信号干扰,显著提升了量化血管源性病变及早期微结构损伤的能力,然而,其双室模型将脑组织视为一个整体,无法进一步区分神经元胞体、树突等具体细胞结构,对PSCI复杂病理机制的分析能力有限。

4 NODDI

NODDI通过构建包含神经突内空间、神经突外空间和脑脊液/自由水室的三室模型,实现对神经突微结构的特异性评估,是dMRI领域向生物物理模型驱动发展的里程碑。其核心参数包括:神经突密度指数(neurite density index,NDI),直接反映轴突与树突密度;方向离散度指数(orientation dispersion index,ODI),表征神经突方向排列的复杂性及离散程度;各向同性体积分数(isotropic volume fraction,ISO),量化脑脊液或自由水的体积占比[36]。

NODDI通过其特有的生物物理模型,为阐明卒中后特定微结构损伤与认知障碍的关联提供了独特视角。Zhang等[37]研究发现,孤立性缺血性丘脑卒中患者的病灶同侧远隔灰质区域(如岛叶、颞叶亚区)的NDI显著降低,提示神经突密度下降。同时,相关丘脑-皮质通路的NDI、纤维密度(fiber density,FD)及FA值同步下降,表明白质轴突完整性受损。岛叶的NDI与患者执行功能呈负相关,而丘脑-岛叶通路的FD值与执行功能呈正相关,表明丘脑卒中可通过远端灰质神经突丢失和白质通路损伤双向影响认知功能。

NODDI在血管性微结构损伤研究中的进展为探索PSCI血管相关病理机制提供了重要应用价值。Dobrynina等[38]研究发现,脑小血管病痴呆患者胼胝体膝部的ISO显著高于对照组,且随认知障碍加重而升高,反映血管源性水肿;其NDI则低于对照组,并随认知障碍加重而下降,提示轴突损伤。Raghavan等[39]的队列研究进一步发现,胼胝体膝部ISO升高和NDI降低与脑血管风险因素显著相关,且这些参数变化可独立于阿尔兹海默病病理,解释8.3%的全局认知变异。上述研究证明,ISO和NDI等参数能敏感捕捉血管性微结构损伤,是研究PSCI血管机制的有效工具。

尽管目前直接针对PSCI的NODDI研究相对有限,但基于其在病理机制关联疾病(如脑小血管病)中的研究表现,该技术在解析PSCI的神经突水平变化和血管病理损伤方面展现出巨大潜力。

5 总结与展望

如前文所述,dMRI技术的发展遵循着从简单模型到复杂模型(图1)、从描述水分子扩散物理特性到推断特定生物基质结构的演进逻辑(表1)。每种新技术的出现旨在克服先前技术的特定局限,但这并不意味着新技术在所有应用场景下都具有绝对优势。多模型比较研究指出,不同扩散模型在组织的敏感性与特异性方面各有侧重,应依据具体科学问题或疾病特征灵活选择或整合多种模型,而非简单假定新技术必然优于先前技术[40-41]。在评估明确的白质纤维束损伤时,DTI因其技术成熟、分析流程标准化,仍具有重要价值;DKI对灰质及复杂白质区域的微结构变化更为敏感;FW-DTI在识别血管源性水肿及细胞外水分异常方面具有独特价值;而NODDI则在解析神经突密度与方向离散度方面提供了接近组织学水平的微结构见解。由此可见,在PSCI研究中应避免简单的技术优劣判断,而应根据具体研究目的选择适宜技术或开展多序列整合研究。

当前,多序列dMRI整合研究已成为前沿方向[42-44]。通过联合应用不同dMRI技术,可以实现交叉验证,更全面地揭示PSCI的微观病理改变。例如,FW-DTI与NODDI的结合有助于区分自由水相关扩散改变与真实的神经突损伤;DTI网络分析与NODDI参数的联合则能揭示白质连接效率下降的微结构基础。然而,此类整合研究仍面临数据采集时间长、模型参数间存在共线性、计算复杂度高以及需要大样本队列验证等诸多挑战。

未来,随着技术模型的持续优化、多模态影像工具的深度整合,以及人工智能在数据建模与解读中的

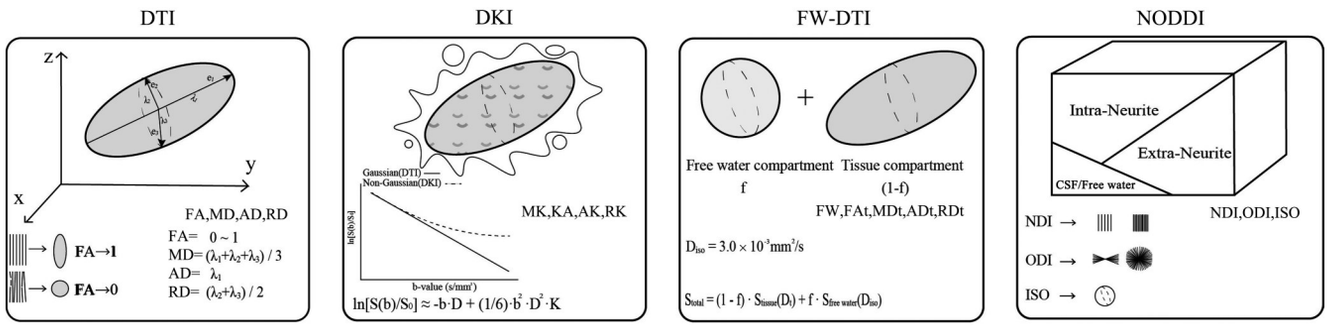


图 1 模型原理示意图

表 1 技术特征对比

技术	模型基础	主要参数	生物学解释	优势	局限性
DTI	单室高斯模型	FA、MD、AD、RD	间接反映白质完整性、髓鞘状态	技术成熟,扫描快,应用广泛,对大型白质束敏感	无法解决纤维交叉问题,对灰质不敏感,易受自由水污染影响
DKI	单室非高斯模型	MK、KA、AK、RK及DTI所有参数	衡量微结构复杂性、异质性和细胞密度	对灰质和复杂纤维结构更敏感,可提供更多微结构信息	无法区分非高斯性的具体生物学来源,扫描时间较长
FW-DTI	双室模型(组织水+自由水)	FW、FAt、MDt、ADt、RDt	分离并量化自由水污染,反映自由水与组织水的扩散特性	有效消除自由水干扰,参数特异性高,可更准确地反映组织特性	假设自由水为各向同性扩散,对部分水肿情况简化过度
NODDI	三室生物物理模型(神经突内+神经突外+脑脊液/自由水)	NDI、ODI、ISO	直接量化神经突密度、空间排布复杂性及自由水含量	生物学特异性高,能区分不同病理过程	模型假设复杂,对数据质量要求高,扫描和后处理耗时更长

辅助应用等多维度的协同推进,有望更全面地解析卒中后大脑结构与功能的复杂变化,为PSCI的精准诊断和个体化康复策略提供更为可靠的影像学依据。

[参考文献]

[1] 杨珊莉,蔡素芳,吴静怡,等. 中西医结合康复临床实践指南——认知障碍[J]. 康复学报,2020,30(5):343-348. doi:10.3724/SP.J.1329.2020.05003.

[2] Lu Q, Yu A, Pu J, et al. Post-stroke cognitive impairment: exploring molecular mechanisms and omics biomarkers for early identification and intervention[J]. Front Mol Neurosci, 2024, 17: 1375973. doi: 10.3389/fnmol.2024.1375973.

[3] Lee M, Yeo NY, Ahn HJ, et al. Prediction of post-stroke cognitive impairment after acute ischemic stroke using machine learning[J]. Alzheimers Res Ther, 2023, 15(1): 147. doi: 10.1186/s13195-023-01289-4.

[4] He A, Wang Z, Wu X, et al. Incidence of post-stroke cognitive impairment in patients with first-ever ischemic stroke: a multicenter cross-sectional study in China[J]. Lancet Reg Health West Pac, 2023, 33: 100687. doi: 10.1016/j.lanwpc.2023.100687.

[5] El Husseini N, Katzan IL, Rost NS, et al. Cognitive impairment after ischemic and hemorrhagic stroke: a scientific statement from the American Heart Association/American Stroke Association[J]. Stroke, 2023, 54(6): e272-e291. doi: 10.1161/STR.0000000000000430.

[6] Zhu Y, Zhao S, Fan Z, et al. Evaluation of the Mini-Mental State Examination and the Montreal Cognitive Assessment for predicting post-stroke cognitive impairment during the acute phase in Chinese minor stroke patients[J]. Front Aging Neurosci, 2020, 12: 236. doi: 10.3389/fnagi.2020.00236.

[7] Wang W, Dong FM, Shao K, et al. The Montreal Cognitive Assessment and Mini-Mental State Examination visuoexecutive subtests in acute ischemic stroke patients and their correlations with demographic and clinical factors[J]. Acta Neurol Belg, 2021, 121(6): 1707-1714. doi: 10.1007/s13760-020-01479-z.

[8] Salvadori E, Cova I, Mele F, et al. Prediction of post-stroke cognitive impairment by Montreal Cognitive Assessment (MoCA) performances in acute stroke: comparison of three normative datasets[J]. Aging Clin Exp Res, 2022, 34(8): 1855-1863. doi: 10.1007/s40520-022-02133-9.

[9] Williams OA, Demeyere N. Association of depression and anxiety with cognitive impairment 6 months after stroke[J]. Neurology, 2021, 96(15): e1966-e1974. doi: 10.1212/WNL.0000000000011748.

[10] Ball EL, Shah M, Ross E, et al. Predictors of post-stroke cognitive impairment using acute structural MRI neuroimaging: a systematic review and meta-analysis[J]. Int J Stroke, 2023, 18(5): 543-554. doi: 10.1177/17474930221120349.

[11] Egorova-Brumley N, Dhollander T, Khan W, et al. Changes in white matter microstructure over 3 years in people with and without stroke[J]. Neurology, 2023, 100(16): e1664-e1672. doi: 10.1212/WNL.0000000000207065.

[12] Lim JS, Lee JJ, Woo CW. Post-stroke cognitive impairment: pathophysiological insights into brain disconnectome from advanced neuroimaging analysis techniques[J]. J Stroke, 2021, 23(3): 297-311. doi: 10.5853/jos.2021.02376.

[13] Chi X, Fan X, Fu G, et al. Research trends and hotspots of post-stroke cognitive impairment: a bibliometric analysis[J]. Front Pharmacol, 2023, 14: 1184830. doi: 10.3389/fphar.2023.1184830.

[14] Novikov DS, Fieremans E, Jensen JH, et al. Quantifying brain microstructure with diffusion MRI: theory and parameter estimation[J]. NMR Biomed, 2019, 32(4): e3998. doi: 10.1002/nbm.3998.

[15] Novikov DS. The present and the future of microstructure MRI: from a paradigm shift to normal science[J]. J Neurosci Methods, 2021, 351: 108947. doi: 10.1016/j.jneumeth.2020.108947.

[16] Slator PJ, Palombo M, Miller KL, et al. Combined diffusion-relaxometry microstructure imaging: current status and future prospects[J]. Magn Reson Med, 2021, 86(6): 2987-3011. doi: 10.1002/mrm.28963.

[17] Shih YC, Tseng WYI, Montaser-Kouhsari L. Recent advances in using

diffusion tensor imaging to study white matter alterations in Parkinson's disease: a mini review[J]. Front Aging Neurosci, 2022, 14:1018017. doi:10.3389/fnagi.2022.1018017.

[18] Müller HP, Kassubek J. Toward diffusion tensor imaging as a biomarker in neurodegenerative diseases: technical considerations to optimize recordings and data processing[J]. Front Hum Neurosci, 2024,18:1378896. doi:10.3389/fnhum.2024.1378896.

[19] Safri AA, Nassir CMNM, Iman IN, et al. Diffusion tensor imaging pipeline measures of cerebral white matter integrity: an overview of recent advances and prospects[J]. World J Clin Cases, 2022, 10(24):8450-8462. doi:10.12998/wjcc.v10.i24.8450.

[20] He C, Gong M, Li G, et al. Evaluation of white matter microstructural alterations in patients with post-stroke cognitive impairment at the sub-acute stage[J]. Neuropsychiatr Dis Treat, 2022, 18: 563-573. doi:10.2147/NDT.S343906.

[21] Moore MJ, Mattingley JB, Demeyere N. Multivariate and network lesion mapping reveals distinct architectures of domain-specific post-stroke cognitive impairments[J]. Neuropsychologia, 2024, 204: 109007. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2024.109007.

[22] 孙国臣,张文召. DTI脑网络分析对早期卒中后认知障碍的预测价值[J]. 国际精神病学杂志,2020,47(5):972-975. doi:10.13479/j.cnki.jip.2020.05.033.

[23] Song K, Liu X, Zheng Q, et al. Secondary injury to distal regions after intracerebral hemorrhage influences neurological functional outcome[J]. Aging (Albany NY), 2020, 12(5):4283-4298. doi:10.18632/aging.102880.

[24] Wang D, Yao Q, Yu M, et al. Topological disruption of structural brain networks in patients with cognitive impairment following cerebellar infarction[J]. Front Neurol, 2019, 10: 759. doi: 10.3389/fneur.2019.00759.

[25] Wang D, Yao Q, Lin X, et al. Disrupted topological properties of the structural brain network in patients with cerebellar infarction on different sides are associated with cognitive impairment[J]. Front Neurol, 2022, 13:982630. doi:10.3389/fneur.2022.982630.

[26] Moulton E, Valabregue R, Lehéricy S, et al. Multivariate prediction of functional outcome using lesion topography characterized by acute diffusion tensor imaging[J]. Neuroimage Clin, 2019, 23:101821. doi:10.1016/j.nicl.2019.101821.

[27] Chen X, Zhou Z, Chong K, et al. Transcutaneous auricular vagus nerve stimulation for long-term post-stroke cognitive impairment: a DTI case report[J]. Front Hum Neurosci, 2024, 18: 1473535. doi:10.3389/fnhum.2024.1473535.

[28] Henriques RN, Correia MM, Marrale M, et al. Diffusional kurtosis imaging in the diffusion imaging in Python project[J]. Front Hum Neurosci, 2021, 15:675433. doi:10.3389/fnhum.2021.675433.

[29] Wu B, Guo S, Jia X, et al. White matter microstructural alterations over the year after acute ischemic stroke in patients with baseline impaired cognitive functions[J]. Neural Plast, 2023: 6762225. doi:10.1155/2023/6762225.

[30] Fan L, Ibrahim FEEM, Chu X, et al. Altered microstructural changes detected by diffusion kurtosis imaging in patients with cognitive impairment after acute cerebral infarction[J]. Front Neurol, 2022, 13: 802357. doi:10.3389/fneur.2022.802357.

[31] Zhu LH, Zhang ZP, Wang FN, et al. Diffusion kurtosis imaging of microstructural changes in brain tissue affected by acute ischemic stroke in different locations[J]. Neural Regen Res, 2019, 14(2):272-279. doi:10.4103/1673-5374.244791.

[32] Correia MM, Henriques RN, Golub M, et al. The trouble with free-water elimination using single-shell diffusion MRI data: a case study in ageing[J]. Imaging Neurosci, 2024, 2:1-21. doi:10.1162/imag_a_00252.

[33] Nakaya M, Sato N, Matsuda H, et al. Free water derived by multi-shell diffusion MRI reflects tau/neuroinflammatory pathology in Alzheimer's disease[J]. Alzheimers Dement (N Y), 2022, 8(1): e12356. doi:10.1002/trc2.12356.

[34] Kern KC, Wright CB, Leigh R. Global changes in diffusion tensor imaging during acute ischemic stroke and post-stroke cognitive performance[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2022, 42(10): 1854-1866. doi:10.1177/0271678X221101644.

[35] Kern KC, Zagzoug MS, Gottesman RF, et al. Diffusion tensor free water MRI predicts progression of FLAIR white matter hyperintensities after ischemic stroke[J]. Front Neurol, 2023, 14: 1172031. doi:10.3389/fneur.2023.1172031.

[36] Cao YB, Wu Y, Dong QY, et al. Neurite orientation dispersion and density imaging quantifies microstructural impairment in the thalamus and its connectivity in amyotrophic lateral sclerosis[J]. CNS Neurosci Ther, 2024, 30(2): e14616. doi:10.1111/cns.14616.

[37] Zhang J, Li L, Ji R, et al. NODDI identifies cognitive associations with in vivo microstructural changes in remote cortical regions and thalamocortical pathways in thalamic stroke[J]. Transl Stroke Res, 2025, 16(2):378-391. doi:10.1007/s12975-023-01221-w.

[38] Dobrynina LA, Kremneva EI, Shamtieva KV, et al. Cognitive impairment in cerebral small vessel disease is associated with corpus callosum microstructure changes based on diffusion MRI[J]. Diagnostics (Basel), 2024, 14(16): 1838. doi:10.3390/diagnostics14161838.

[39] Raghavan S, Prabhakar S, Ramlal R, et al. White matter damage due to vascular, tau, and TDP-43 pathologies and its relevance to cognition[J]. Acta Neuropathol Commun, 2022, 10(1): 19. doi: 10.1186/s40478-022-01319-6.

[40] Vanden Bulcke C, Stölting A, Maric D, et al. Comparative overview of multi-shell diffusion MRI models to characterize the microstructure of multiple sclerosis lesions and periplaques[J]. Neuroimage Clin, 2024, 42:103593. doi:10.1016/j.nicl.2024.103593.

[41] Bauer CE, Zachariou V, Maillard P, et al. Multi-compartment diffusion magnetic resonance imaging models link tract-related characteristics with working memory performance in healthy older adults[J]. Front Aging Neurosci, 2022, 14: 995425. doi: 10.3389/fnagi.2022.995425.

[42] DiBella EVR, Sharma A, Richards L, et al. Beyond diffusion tensor MRI methods for improved characterization of the brain after ischemic stroke: a review[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2022, 43(5):661-669. doi:10.3174/ajnr.A7414.

[43] Mitchell T, Archer DB, Chu WT, et al. Neurite orientation dispersion and density imaging (NODDI) and free-water imaging in parkinsonism[J]. Hum Brain Mapp, 2019, 40(17):5094-5107. doi:10.1002/hbm.24760.

[44] Palacios EM, Owen JP, Yuh EL, et al. The evolution of white matter microstructural changes after mild traumatic brain injury: a longitudinal DTI and NODDI study[J]. Sci Adv, 2020, 6(32): eaaz6892. doi:10.1126/sciadv.aaz6892.

(编辑:魏 源)