

· 综 述 doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2021.08.032

网络首发 [https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.R.20210203.1728.013.html\(2021-02-04\)](https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.R.20210203.1728.013.html(2021-02-04))

轻度脑创伤的 MRI 新技术应用研究进展*

杨清宁^{1,2}, 郭 轶²综述, 戴 辉^{1△}审校

(1. 遵义医科大学附属医院医学影像科, 贵州遵义 563099; 2. 重庆大学附属中心医院放射科, 重庆 400000)

[摘要] 近年来轻度脑创伤(mTBI)发病率逐年增高, mTBI 患者临床症状轻、神经系统定位体征不明显, CT 检查几乎均表现为阴性, 常规磁共振成像(MRI)序列阳性率不高, 常被患者及临床医生忽略, 而 mTBI 的预后好坏各不相同。mTBI 已逐渐成为全球关注的健康问题。目前 mTBI 病理、生理改变尚不统一, 临床对 mTBI 的诊断也主要依赖患者主观症状, 缺乏客观依据。作者拟对 mTBI 病理、生理改变及 MRI 新技术在 mTBI 中的应用进行综述。

[关键词] 轻度脑创伤; 病理、生理改变; 磁共振成像

[中图分类号] R814

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2021)08-1409-05

Research progress of new MRI technology for mild brain trauma*

YANG Qingning^{1,2}, GUO Yi², DAI Hui^{1△}

(1. Department of Imaging, Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi, Guizhou 563099, China; 2. Department of Radiology, Affiliated Central Hospital of Chongqing University, Chongqing 400000, China)

[Abstract] In recent years, the incidence rate of mild traumatic brain injury (mTBI) has increased year by year. The clinical symptoms of mTBI patients are mild, and the signs of nervous system localization are not obvious. The computerized tomography (CT) examination almost is negative, and the sequence positive rate of the conventional magnetic resonance imaging (MRI) is not high, which are usually ignored by the patients and clinical doctors. But the prognosis of mTBI varies. mTBI has gradually become a health issue of global concern. At present, the pathophysiological changes of mTBI are not uniform, and the clinical diagnosis of mTBI mainly depends on the subjective symptoms of the patients, which lacks the objective evidence. The author intends to review the mTBI pathophysiological changes and the application of new MRI techniques in mTBI.

[Key words] mild traumatic brain injury; pathophysiological changes; magnetic resonance imaging

脑创伤(TBI)是指外力和(或)加速/减速机制导致的大脑结构和功能的损伤, 根据格拉斯哥昏迷指数(GCS)^[1], 将 TBI 分为重度(3~8 分)、中度(9~12 分)和轻度(13~15 分)。轻度脑创伤(mTBI)俗称脑震荡, 美国康复医学会(ACRM)定义 mTBI 为 TBI 后 GCS 评分为 13~15 分; 外伤后昏迷时间少于 30 min, 外伤后一过性记忆丧失, 持续时间少于 24 h 和(或)其他无需外科手术的颅内神经功能异常^[2]。

随着机动车辆的增多、城市化建设加快及运动性损伤增加等诸多因素, TBI 的发病率日渐增高, 全球 mTBI 占 TBI 的 60%~90%, 在中国的比例为 62%^[3]。但 mTBI 患者临床症状轻、神经系统定位体征不明显, CT 检查几乎均表现为阴性, 常规磁共振成像(MRI)序列阳性率不高, 常常被患者及临床医生忽略。而 mTBI 的预后各不相同, 临床约 30% 以上的

mTBI 患者存在不同程度的脑震荡后综合征(PCS)^[4-5], 部分患者在创伤后数月或数年仍存在持续的 PCS, 严重影响患者生活; 约 7% mTBI 患者为进展性出血性损伤, 需手术治疗^[6]; mTBI 还与阿尔茨海默病、帕金森病等神经变性疾病的发生存在密切相关性, 发病率超过健康人的 2.5 倍^[7]。mTBI 已逐渐成为全球关注的健康问题。本文将从 mTBI 的病理、生理改变及 MRI 新技术在 mTBI 中的应用方面进行综述。

1 mTBI 的病理、生理改变

目前关于 mTBI 的病理、生理学改变说法尚不统一, 先进的神经影像工具在 mTBI 研究中的应用以及对 mTBI 动物模型的完善使研究人员能够密切追踪 mTBI 后病理、生理变化, 既往国内外研究报道提出以下 5 种病理变化。

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0114404); 重庆市科卫联合项目(QNXM2018017)。作者简介: 杨清宁(1988-), 主治医师, 硕士, 主要从事放射科诊断工作。△ 通信作者, E-mail: zyd0521@163.com。

1.1 白质改变

白质改变的解释集中在髓磷脂的变化上,髓磷脂是一种富含脂质的物质,具有隔离轴突并负责协调神经沟通的作用。遭受脑震荡的运动员会经历皮质下白质的多焦点轴突静脉曲张,导致动作电位和信号延迟。白质变化包括额叶和枕叶皮质神经沟变宽、释放损害大脑的神经蛋白、弥漫性轴索损伤(DAI)等^[8]。

1.2 Tauopathy

Tau 蛋白是含量最高的微管相关蛋白,具有稳定轴突中的微管结构(神经元沟通所必需),发生 mTBI 后,异常磷酸化的 tau 蛋白异常蓄积,丧失了正常生物功能。JOSEPH 等^[9] 研究结果显示,接受高速头部撞击的运动员赛后 Tau 值较基线值增加了(492.6 ± 109.8)%,而未经受高速头部撞击的运动员的赛后 Tau 值增加了(164.0 ± 35.0)%,研究结果表明,与对照组运动员相比,轴突 Tau 蛋白增加与高速头部撞击有关。

1.3 神经连通性改变

功能磁共振成像(fMRI)显示区域或全局神经网络减少,导致大脑区域之间的沟通延迟,认知能力丧失和其他神经系统症状^[9]。

1.4 脑灌注减少

在大鼠流体撞击伤模型中,逐渐出现脑微血管损伤的同时伴随低氧反应蛋白表达的增加,提示脑灌注减少及其相应继发的缺血缺氧改变^[10]。谢秀海等^[11] 用 3D 动脉自选标记成像(ASL)证明 mTBI 患者存在全脑或局部脑血流灌注减低区。

1.5 灰质改变

创伤导致皮质和皮质下结构(如丘脑和海马)萎缩,这些结构对于记忆和认知至关重要。MEIER 等^[12] 研究结果显示,与健康对照组相比,大学生足球运动员左侧海马体积较小。SINGH 等^[13] 研究显示,与无脑震荡年轻运动员相比,有脑震荡史的年轻运动员海马体积较小;且有脑震荡史年轻运动员双侧海马体积的减少与踢足球的年数相关。

mTBI 的病理、生理学改变可能不只是上述某一种改变,而是结构和功能的混合性损伤,是一个复杂的多式级联的疾病过程,国外脑震荡研究人员认为,脑震荡后的功能障碍主要归因于两种截然不同但相互关联的神经病理机制:原发性脑损伤,即头颅收到外力冲击作用时发生的损伤,如大脑在加速或减速时发生的轴突损伤;神经代谢级联,通常称为继发性脑损伤,是细胞、分子及代谢级联相互作用的结果^[14]。

2 MRI 新技术

随着 MRI 技术的发展,一些 MRI 新技术不仅可以直接检测大脑微观结构的改变,还可发现大脑功能的变化。

2.1 磁敏感加权成像(SWI)

SWI 是一种梯度回波成像序列,具有三维采集、完全流动补偿、薄层重建、高分辨率等特点,是利用不

同组织间磁敏感差异而成像的磁共振技术。SWI 对脑出血和颅内矿物沉积特别敏感,在诊断脑创伤、血管畸形、脑卒中、脑肿瘤、多发性硬化、钙化等多种病变中均具有重要价值。

mTBI 的病理学改变包括微血管损伤,表现为微小出血灶。而 SWI 能够显示静脉血管的连续性,并发现微小出血灶。既往研究报道,SWI 对颅内小出血灶具有高敏感性,SWI 上甩鞭样或串珠状排列的特征性表现更能体现 DAI 特点,且较 MRI 常规序列能更好地对 DAI 进行分级诊断^[15]。有研究者运用 SWI 对 mTBI 出血灶与临床量表的相关性进行了分析。LI 等^[5] 研究结果显示,mTBI 后抑郁组患者 SWI 微出血病变发生率高于非抑郁组,且抑郁组微出血病变数量和体积大于非抑郁组,这些病变数量和体积的差异只存在于额叶、顶叶和颞叶。该研究结果提示,SWI 可用于诊断 mTBI 后的微出血病变,病灶的分布范围和位置与 mTBI 后抑郁相关。LIU 等^[16] 研究发现,PCS(+)组患者出血灶(ICBs)阳性的比例高于 PCS(-)组,PCS(+)组的 ICBs 数量显著高于 PCS(-)组,PCS 与 ICB 数量显著相关性,提示 ICB 数量是预测 PCS 发生的独立变量。还有学者运用 SWI 对 mTBI 慢性期进行了研究。TRIFAN 等^[17] 运用磁共振成像液体衰减反转恢复序列(FLAIR)和 SWI 对 mTBI 的研究结果显示,患有慢性持续症状的 mTBI 患者 FLAIR 检测的病变数量明显多于对照组(无症状 mTBI 患者),而 SWI 检测的病变比对照组更多。

目前有关 SWI 用于 mTBI 的报道较多,但也存在一些局限。SWI 具有较高的空间分辨力,可能过高评估了颅内小出血灶;虽然 SWI 能灵敏地发现颅内出血灶,但难以鉴别出血原因(比如外伤、肿瘤、血管畸形、高血压等);SWI 容易受磁敏感伪影干扰,尤其是颅底,可能会漏诊颅底微小出血灶。

2.2 扩散张量成像(DTI)

DTI 是扩散加权成像(DWI)的发展和深化,DWI 可反映脑组织中水分子扩散的快慢,而 DTI 可在三维空间内多参数定量测量脑白质中水分子扩散的能力,间接反映白质纤维束的走行及其完整性。DTI 主要参数包括各向异性分数(FA)、表观扩散系数(ADC)、平均扩散率(MD)、径向扩散率(RD)、轴向扩散率(AD)。

候莉莉^[18] 通过观察 mTBI 患者急性期、亚急性期 DTI 参数的变化,发现有一部分脑白质纤维束区的 FA 值有所减低,在患者伤后 5 周至 3 个月的时间内还低于对照者,表明 DTI 对 mTBI 的敏感性较高,能够准确显示白质纤维束损伤。SUEHIRO 等^[6] 研究结果显示,mTBI 后急性期,恢复好(SR)和恢复差(PR)患者的 FA 值均高于对照组;亚急性期,PR 患者的 MD 值高于 SR 和对照组;慢性期,与 SR 组和对照组相比,PR 组的 FA 值较低,MD 值较高。根据亚急性期 MD 值变化,可以区分 PR 组和 SR 组,其灵敏度为

73.0%、特异度为 78.0%、准确度为 75.6%。研究结果提示,亚急性 MD 值升高可能有助于区分创伤后应激障碍(PTSD)高风险患者。ALHILALI 等^[19] 研究结果显示,与对照组相比,mTBI 后抑郁患者在上纵束、伏隔核周围白质、内囊前肢的 FA 值下降,焦虑患者小脑蚓部 FA 值下降;伏隔核区损伤程度与患者的抑郁恢复时间呈负相关,表明创伤后出现两大精神症状的患者表现出独特的白质损伤模式。WARE 等^[20] 研究发现,拳击手胼胝体亚部 FA 值与精神症状呈正相关,拳击手的神经心理学得分与 DTI 指标相关。CUBON 等^[21] 研究发现,mTBI 损伤后第 2 天双侧大脑半球白质区域的 RD 和 MD 显著增加,脑震荡后脑白质呈弥漫性损伤;损伤后 2 周,仅前额部分白质观察到 RD 和 MD 持续升高;相对于 mTBI 患者的基线,大多数受试者在受伤后 2 个月的扩散率仍然升高,在脑震荡后的 2 个月中,白质纤维束的恢复似乎遵循从前到后的趋势。

mTBI 的生物力学模型表明,大脑在旋转、加速和减速过程中,白质纤维可能特别容易受到损伤。过去的研究也表明,DTI 被认为是反映 mTBI 患者白质改变有用工具。但 DTI 是基于水分子的扩散遵循高斯分布而成立的,即在不同弥散敏感系数 b 值下水分子扩散衰减信号呈线性,但脑组织成分及结构复杂,水分子的扩散在活体脑组织中不是自由不受限制的。此外,脑部受伤后水的扩散模式将进一步改变。因此 DTI 对脑组织的评估尚有一定局限。

2.3 扩散峰度成像(DKI)

DKI 是在 DTI 的基础上联合四阶三维峰态张量,分析水分子扩散分布偏离高斯分布的程度,从而反映水分子扩散遇到的阻碍或限制的情形。DKI 可能对 mTBI 后的复杂组织变化敏感,而 DTI 无法显示这种变化。DKI 常用的参数包括平均峰度(MK)、轴向峰度(AK)、径向峰度(RK)。

樊秋菊等^[22] 研究发现,正常对照组各区域 DTI 参数的 FA 值、MD 值分别与 DKI 参数 FAK、MDk 值相关;mTBI 组仅伤侧白质区 FA 值和 MD 值降低,而 MK 值及 Ka 值在所有区域(包括灰质及白质)的伤侧及镜像区均升高;该研究结果表明,DTI 及 DKI 技术均可灵敏地检测到 mTBI 患者脑组织损伤后微观病理改变,而 DKI 能更好地反映更丰富的组织内水分子非正态分布特征,尤其是对灰质的测量比 DTI 能显示更多的组织信息及微观改变。STOKUM 等^[23] 研究结果显示,mTBI 后患者内囊前支及后支 MK 值降低,1~6 个月患者丘脑、内囊和胼胝体的 MK 值或 RK 值的变化与患者认知改善之间存在相关性。熊婧彤等^[24] 研究发现,mTBI 后兔的皮层下白质、中脑、桥脑及延髓 MK 值与 β -淀粉样前体蛋白(β -APP)阳性轴突数呈正相关,脑干区 AK 及 RK 值与 β -APP 阳性轴突数呈正相关。表明 DKI 可早期定量评估 mTBI 后脑组织微结构损伤。LANCASTER 等^[25-26] 运用

DTI 和 DKI 对脑震荡运动员急性期及亚急性期进行研究,结果显示,与无脑震荡运动员相比,高中和大学运动员脑震荡后 24 h 内 MD 值降低,AK 值增加;受伤后第 8 天,尽管患者症状和认知能力有所改善,但上述扩散指标的差异在受伤运动员中更为普遍。该研究结果表明,运动员受伤后 1 周可能未达到完全的生理恢复,运动员在大脑完全恢复之前重返比赛可能会带来负面影响。为此,作者进一步对脑震荡运动员慢性期进行纵向研究,结果显示,与无脑震荡的运动员相比,脑震荡运动员在受伤后 6 个月时 MD 值仍然显著较低,但峰度指标已经恢复正常。

DKI 具有分析水分子的非高斯分布特征的优势,不仅可以发现大脑白质结构的变化,亦可发现大脑灰质结构的损伤,较 DTI 发现更多的脑组织微观结构变化、提供更准确的 mTBI 动态发展信息,能更好地评估 mTBI。

2.4 fMRI

fMRI 的生理学基础是血氧水平依赖(BOLD)效应,fMRI 反映了任务诱导或自发调节神经代谢引起的脱氧血红蛋白水平变化,可以无创、非侵入性观察脑血流动力学和代谢水平的变化,从而对脑功能进行评价。fMRI 分为任务态和静息态,任务态 fMRI 是指完成特定任务时受试者相关脑区活动,通过分析任务诱发的活动与实验刺激参考波之间的相关性,可以检测到受试者的哪些大脑区域参与了实验任务。静息态 fMRI,即没有特定任务,受试者无需进行系统思考或不去思考就进行 MRI 检查,并在静息状态下收集 BOLD 信号。

占洁^[27] 基于静息态 fMRI 对 mTBI 的研究显示,与健康对照组相比,mTBI 患者多个脑区存在明显的局部一致性(ReHo)降低,包括左侧岛叶、左侧中央前回、左侧中央后回及左侧缘上回;mTBI 患者左侧岛叶的平均 ReHo 值与简易精神状态(MMSE)评分存在显著正相关。DRETSCH 等^[28] 研究结果显示,有或无 mTBI 的创伤后应激障碍(PTS)患者均具有明显症状,均显示出默认模式网络(DMN)的不稳定和破坏性神经信号,无 mTBI 的 PTS 组虽然症状评分较低,但异常连接的数量却比 mTBI+PTS 组多。表明在静息状态下,有或没有 mTBI 的 PTS 与 DMN 的不稳定和破坏性神经信号有关,但是连接障碍的数量似乎不能反映临床严重程度。VAN DER HORN 等^[29] 研究了 mTBI 损伤后亚急性期患者在工作记忆任务执行过程中的脑网络功能改变,结果表明,mTBI 患者在执行高难度工作记忆任务时,前额叶内侧皮层激活程度降低,前额叶内侧皮层是 DMN 的核心区域,是 DMN 与其他脑功能网络之间交互的重要中继站。SOURS 等^[30] 研究显示,与健康对照组相比,mTBI 患者显示出 DMN 与任务阳性网络之间的隔离度降低,即随着任务难度的增加,mTBI 患者表现出任务阳性区域与 DMN 区域之间的连通性显著增加。既往研究

表明,mTBI 患者脑功能存在异常,包括部分脑区 ReHo 减低,DMN 超连接或部分连接减弱,DMN 核心区域工作记忆任务降低等。部分研究结果尚存在差异^[31],有待进一步探索。

2.5 ASL

ASL 是一种以自由扩散的内在示踪剂测量脑组织灌注的磁共振技术,主要参数为脑血流量(CBF),其变化可以反映脑微循环的改变。黄丹丹^[32]利用脉冲式动脉自旋标记成像(PASL)技术对急性期 mTBI 患者进行研究,发现急性 mTBI 患者 CBF 减低,而且一些区域的 CBF 与 PCS 的严重程度存在相关性。LIN 等^[33]研究发现,与健康对照组相比,mTBI 患者双侧额叶和左枕皮质的 CBF 显著降低,且患者脑震荡症状与灌注不足区域的 CBF 之间存在相关性,较严重的症状与双侧额叶和左枕叶的 CBF 升高有关。YANG 等^[34]研究发现,在脑震荡运动员的多个大脑区域中检测到 CBF 明显减少,且急性脑震荡的 CBF 减少与临床评估(包括平衡误差系统评分和脑震荡后认知测试记忆和冲动控制综合评分)之间存在相关性。ASL 作为一种较新的无创磁共振灌注技术,能定量检测 mTBI 患者大脑灌注情况,评估伤后脑组织微循环的变化。

上述各种 MRI 新技术具有各自的优势,也存在一定局限,每种技术发现的异常是否具有一致性及相关性尚不完全清楚,为弥补单一技术不足,目前国内有报道采用两种或多种 MRI 技术联合的方法,能更好地评估 mTBI。LANCASTER 等^[26]联合 DTI 和 DKI 对运动相关性脑震荡急性期(伤后 24 h)、亚急性期(伤后 8 d)及慢性期(伤后 6 个月)的全脑白质变化进行纵向分析。吕晓琼^[3]运用 DTI 联合 SWI 检测 mTBI 的早期诊断价值。

3 总 结

随着 mTBI 发病率的不断升高,mTBI 已成为全球关注的健康问题。在 mTBI 的应用中,在揭示颅内微小出血灶、脑白质纤维损伤、脑神经网络改变、脑组织灌注变化及预后评估等方面,MRI 新技术(SWI、DTI、DKI、fMRI 及 ASL)具有各自独特的优势,这些优势是常规 MRI 序列不可比拟的。相信随着各种 MRI 新技术的不断发展及改进,使早期准确诊断 mTBI 成为可能,指导临床早期针对性治疗,对改善 mTBI 患者预后,提高患者生活质量具有重要意义。

参考文献

[1] GRAHAM T, JENNETT B. Assessment of coma and impaired consciousness. A Practical Scale[J]. *Lancet*, 1974, 2(7872): 81-84.
 [2] CASSIDY J D, CARROLL L, PELOSO P, et al. Incidence, risk factors and prevention of

mild traumatic brain injury: results of the who collaborating centre task force on mild traumatic brain injury[J]. *J Rehabil Med*, 2004, 36(1): 28-60.

- [3] 吕晓琼. 磁共振弥散张量成像联合磁敏感加权成像在轻度脑损伤早期诊断中的临床应用研究[D]. 沈阳: 中国医科大学, 2018.
 [4] WAMMES J D, GOOD T J, FERNANDES M A. Autobiographical and episodic memory deficits in mild traumatic brain injury[J]. *Brain Cogn*, 2017, 111(1): 112-126.
 [5] LI L, SUN G, LIU K, et al. White matter changes in posttraumatic stress disorder following mild traumatic brain injury: a prospective longitudinal diffusion tensor Imaging study[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2016, 129(9): 1091-1099.
 [6] SUEHIRO E, KOIZUMI H, FUJIYAMA Y, et al. Predictors of deterioration indicating a requirement for surgery in mild to moderate traumatic brain injury[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2014, 127(1): 97-100.
 [7] 张静爽, 王蓉. 阿尔茨海默病发生机制的研究进展[J]. *首都医科大学学报*, 2014, 35(6): 721-724.
 [8] SATARASINGHE P, HAMILTON DK, BUCHANAN RJ, et al. Unifying pathophysiological explanations for sports-related concussion and concussion protocol management: literature review[J]. *J Exp Neurosci*, 2019, 13: 1179069518824125.
 [9] JOSEPH J R, SWALLOW J S, KYLENE W, et al. Elevated markers of brain injury as a result of clinically asymptomatic high-acceleration head impacts in high-school football athletes[J]. *J Neurosurg*, 2018, 130(5): 1-7.
 [10] 刘媛. 轻度脑创伤的研究进展[J]. *中国临床神经科学*, 2019, 27(2): 182-185, 215.
 [11] 谢秀海, 汤光宇, 赵振国, 等. 3D ASL 成像对轻型颅脑损伤评估价值分析[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2018, 29(10): 11-13, 17.
 [12] MEIER T B, SAVITZ J, SINGH R, et al. Smaller dentate gyrus and CA2 and CA3 volumes are associated with kynurenine metabolites in collegiate football athletes[J]. *J Neurotrauma*, 2016, 33(14): 1349-1357.
 [13] SINGH R, MEIER T B, KUPLICKI R, et al. Relationship of collegiate football experience and concussion with hippocampal volume and cognitive outcomes[J]. *JAMA*, 2015, 311(18): 1883-1888.
 [14] HENRY L C, TREMBLAY S, BEAUMONT L

- D. Long-term effects of sports concussions: Bridging the neurocognitive repercussions of the Injury with the newest neuroimaging data [J]. *Neuroscientist*, 2017, 23(5):567-578.
- [15] 周福庆, 龚洪翰, 陈琪, 等. 磁敏感加权成像在弥漫性轴索损伤诊断和分级中的临床应用[J]. *临床放射学杂志*, 2012, 31(3):326-331.
- [16] LIU G, GHIMIRE P, PANG H, et al. Improved sensitivity of 3.0 Tesla susceptibility-weighted imaging in detecting traumatic bleeds and its use in predicting outcomes in patients with mild traumatic brain injury [J]. *Acta Radiol*, 2015, 56(10):1256-1263.
- [17] TRIFAN G, GATTU R, HAACKE E M, et al. MR imaging findings in mild traumatic brain injury with persistent neurological impairment [J]. *Magn Reson Imag*, 2017, 37(2):243-251.
- [18] 侯莉莉. 轻型创伤性脑损伤脑白质纤维束扩散张量成像研究[D]. 承德:承德医学院, 2016.
- [19] ALHILALI L M, DELIC J A, GUMUS S, et al. Evaluation of white matter injury patterns underlying neuropsychiatric symptoms after mild traumatic brain injury [J]. *Radiology*, 2015, 277(3):793-800.
- [20] WARE A L, WILDE E A, NEWSOME M R, et al. A preliminary investigation of corpus callosum subregion white matter vulnerability and relation to chronic outcome in boxers [J]. *Brain Imaging Behav*, 2020, 14(3):772-786.
- [21] CUBON V A, MURUGAVEL M, HOLMES K W, et al. Preliminary evidence from a prospective DTI study suggests a posterior-to-anterior pattern of recovery in college athletes with sports-related concussion [J]. *Brain Behav*, 2018, 8(12):e01165.
- [22] 樊秋菊, 杨春华, 哈若水, 等. DKI 与 DTI 技术对轻度脑外伤定量评估的研究 [J]. *临床放射学杂志*, 2014, 33(7):976-981.
- [23] STOKUM J A, SOURS C, ZHUO J, et al. A longitudinal evaluation of diffusion kurtosis imaging in patients with mild traumatic brain injury [J]. *Brain Injury*, 2015, 29(1):47-57.
- [24] 熊婧彤, 伍建林, 张清, 等. 扩散峰度成像动态定量检测兔轻度脑外伤模型早期变化及其与 β -淀粉样蛋白阳性表达的相关性 [J]. *中国医学影像技术*, 2018, 34(9):37-42.
- [25] LANCASTER M A, OLSON D V, MCCREA M A, et al. Acute white matter changes following sport-related concussion: a serial diffusion tensor and diffusion kurtosis tensor imaging study [J]. *Hum Brain Mapp*, 2016, 37(11):3821-3834.
- [26] LANCASTER M A, MEIER T B, OLSON D V, et al. Chronic differences in white matter integrity following sport-related concussion as measured by diffusion MRI: 6-Month follow-up [J]. *Hum Brain Mapp*, 2018, 39(11):4276-4289.
- [27] 占洁. 创伤性脑损伤患者脑功能与结构的磁共振研究[D]. 南昌:南昌大学, 2018.
- [28] DRETSCH M N, RANGAPRAKASH D, KATZ J S, et al. Strength and temporal variance of the default mode network to investigate chronic mild traumatic brain injury in service members with psychological trauma [J]. *J Exp Neurosci*, 2019, 13:1179069519833966.
- [29] VAN DER HORN H J, LIEMBURG E J, SCHEENEN M E, et al. Post-concussive complaints after mild traumatic brain injury associated with altered brain networks during working memory performance [J]. *Brain Imaging Behav*, 2016, 10(4):1243-1253.
- [30] SOURS C, KINNISON J, PADMALA S, et al. Altered segregation between task-positive and task-negative regions in mild traumatic brain injury [J]. *Brain Imaging Behav*, 2018, 12(3):697-709.
- [31] ROSENTHAL S, GRAY M, FATIMA H, et al. Functional MR Imaging: blood oxygen level-dependent and resting state techniques in mild traumatic brain injury [J]. *Neuroimaging Clin N Am*, 2018, 28(1):107-115.
- [32] 黄丹丹. 轻度创伤性脑损伤的扩散峰度成像及动脉自旋标记技术研究[D]. 天津:天津医科大学, 2017.
- [33] LIN C M, TSENG Y C, HSU H L, et al. Arterial spin labeling perfusion study in the patients with subacute mild traumatic brain injury [J]. *PLoS One*, 2016, 11(2):e0149109.
- [34] YANG W, NENCKA A S, MEIER T B, et al. Cerebral blood flow in acute concussion: preliminary ASL findings from the NCAA-DoD CARE consortium [J]. *Brain Imaging Behavior*, 2019, 13(5):1375-1385.