doi:10.11659/jjssx.09E025090

·影像诊断与手术导航·

MRI征象定量评估前交叉韧带不同区域血管分布

张茂森[1],田金帅[1],吴 伟[2] (1.东南大学医学院附属南京同仁医院医学影像科,江苏 南京 211102;2.苏州市职业大学数理部,江苏 苏州 215000)

[摘 要] **目的** 探讨采用对比增强定量磁共振成像(qMRI)技术评估人前交叉韧带(ACL)不同区域灌注特征的临床应用价值。**方法** 回顾性分析42例患者膝关节的对比增强qMRI检查资料,根据矢状斜面增强前图像,将ACL全长等分为近端、中部和远端三个区域(各占1/3长度),通过量化MRI信号增强程度,计算各区域灌注量占ACL总灌注量的相对百分比,并分析其在男女间的差异。**结果** ACL近端、中部和远端区域的相对灌注量比较,差异具有统计学意义(P<0.05);其中近端区域相对灌注量显著高于中部(P=0.007)和远端区域(P=0.001),中部与远端区域间相对灌注量比较差异无统计学意义(P=0.281)。亚组分析显示,男性ACL近端区域灌注量高于女性,差异具有统计学意义(P=0.036)。**结论** 本研究通过对比增强qMRI技术证实,ACL血管分布主要集中于近端1/3区域,占总灌注量的一半以上。明确ACL血管分布的区域差异,可为理解ACL损伤的发生机制、优化ACL损伤修复重建方案提供重要的影像学理论依据。

[关键词] 定量磁共振成像;前交叉韧带;膝关节;血管分布

[中图分类号] R686.5;R445.2 [文献标志码] A [收稿日期] 2025-09-23

MRI-based quantitative evaluation of vascular distribution in different regions of the anterior cruciate ligament

ZHANG Mao-sen[1], TIAN Jin-shuai[1], WU Wei[2] (1. Department of Medical Imaging, Nanjing Tongren Hospital Affiliated to Southeast University School of Medicine, Nanjing Jiangsu 211102, China; 2. Department of Mathematical and Physical Sciences, Suzhou Vocational University, Suzhou Jiangsu 215000, China)

Abstract: Objective To explore the clinical application value of contrast-enhanced quantitative magnetic resonance imaging (qMRI) in evaluating the perfusion characteristics in different regions of the human anterior cruciate ligament (ACL). **Methods** The contrast-enhanced qMRI data of the knee joints in 42 patients were retrospectively analyzed. According to the pre-contrast oblique sagittal images, the entire length of the ACL was equally divided into three regions: proximal, middle and distal regions (each accounting for 1/3 of the total length). The relative percentage of perfusion in each region to the total ACL perfusion was calculated by quantifying the degree of MRI signal enhancement. **Results** There were statistically significant differences in the relative perfusion among the proximal, middle and distal regions of the ACL (P<0.05). The relative perfusion of the proximal region was significantly higher than that of the middle (P=0.007) and distal regions (P=0.001), while there was no statistically significant difference in relative perfusion between the middle and distal regions (P=0.281). Subgroup analysis showed that the relative perfusion of the proximal region of the ACL in males was higher than that in females, with a statistically significant difference (P=0.036). **Conclusion** Based on contrast-enhanced qMRI, this study confirmed that the vascular distribution of the ACL is mainly located in the proximal 1/3 region, accounting for more than half of the total perfusion. Clarifying the regional differences of ACL vascular distribution may provide an important imaging theoretical basis for understanding the pathogenesis of ACL injury and optimizing surgical strategies for ACL repair and reconstruction.

Keywords: quantitative magnetic resonance imaging; anterior cruciate ligament; knee joint; vascular distribution

磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)具有无辐射、软组织分辨率高、多方位成像的优势,是目前膝关节韧带病变首选的无创影像学检查手段[1-2]。其中,对比增强定量MRI(quantitative MRI, qMRI)技术可通过量化组织的信号增强程度,精准反映组织的灌注水平与血管分布特征,已逐步应用于肌肉骨骼系统疾病的病理生理评估与临床疗效监测中[3]。前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)是维持膝关节稳定的核心结构,传统上普遍认为其内源性愈合能力较弱。研究发现,无论ACL何处撕裂,临床治疗效果均不理想[3]。而近期的组织学研究发现,ACL近端1/3区域的撕裂可能具有与内侧副韧带相似的内源性愈合能力[4]。随着医学科学的发展,深入探究ACL的生物学特性及损伤后的病理生理反应成为骨科与运动医学领域的重要研究方向[5]。

已有研究证实,ACL的血管分布存在明显的区域

[基金项目] 2023年江苏省产学研合作项目(BY20231406)

[通信作者] 田金帅,E-mail:15827723371@163.com

差异,其中近端的血管分布更丰富[4]。从组织愈合的角度来看,对基质细胞和生长因子进行生物增强,能够显著促进ACL移植物-隧道界面的愈合[4]。虽然血管分布被公认为决定ACL损伤后愈合能力的关键因素,但现有研究大多依赖于离体组织解剖或动物模型[5],针对成人活体ACL血管分布的无创定量研究仍较匮乏。利用无创的qMRI技术评估ACL的相对灌注量,可直接应用于ACL损伤评估、术后韧带/移植物灌注与愈合过程的动态监测。深入了解ACL血管分布的区域特征,不仅能丰富ACL的生物学基础研究,还可为ACL损伤手术指征的制定、修复重建方案的优化提供影像学参考[6-7]。因此,本研究旨在探讨对比增强qMRI技术在评估成人活体ACL不同区域血管分布特征中的临床应用价值,明确ACL各区域的灌注差异,为ACL损伤的临床诊疗提供理论依据。

1 资料与方法

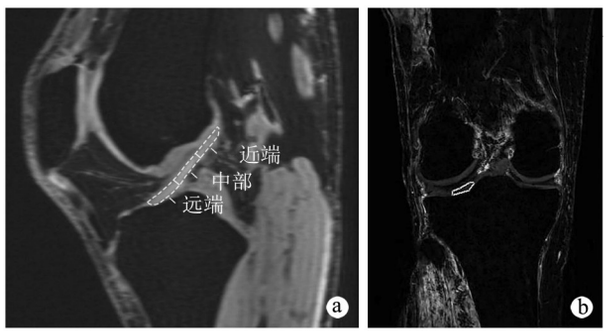
1.1 临床资料

本研究经东南大学医学院附属南京同仁医院医学伦理委员会审批通过(批准号:NTRH-2023-112)。回顾性分析2023年11月至2024年10月于我院行膝关节对比增强qMRI检查42例患者的临床资料。其中女24例,男18例;年龄25~61岁,平均(51.1±9.4)岁。

1.2 检查方法

所有检查均采用美国GE 3.0T Signa HDxt MRI扫描仪及专用四极膝关节线圈完成。对比剂注射前后均采用三维快速扰相梯度回波GELAVA序列进行成像。

MRI图像采集参数:TR 18.6 ms,TE 5.3 ms,翻转角35°,FOV 20 cm×20 cm,矩阵512×384,层厚2 mm,层间距0 mm,激励次数1次。图像重建后空间分辨率0.4 mm×0.4 mm×2.0 mm。通过静脉导管建立动脉通路,确保在同一位置采集增强前后图像,以便进行qMRI分析。每次检查均生成静态去脂和未去脂的增强后T1加权三维梯度回波图像,其中去脂图像用于qMRI分析,可清晰显示钆喷酸葡胺对比剂分布并消除正常骨髓信号干扰。采用定制化MRI灌注定量分析软件(V1.0)进行图像后处理与体积分析,将MRI图像重建为矢状斜面以完整显示ACL全长,便于精准分割和qMRI分析[8]。在矢状斜面图像中,ACL划分为近端、中部和远端三个感兴趣区域(region of interest,ROI),见图1a。在基线MRI图像上,量化分析增强前后各ROI在所有可完整显示ACL的切片中的信号强度变化(从股骨附着点到胫骨附着点)。信号强度以未增强的胫骨平台关节软骨为参照进行标准化,ROI选取胫骨平台软骨最宽处(图1b)



a:ACL矢状斜面重建图像;b:膝关节冠状面图像

图1 ACL区域划分及信号强度标准化参照图

1.3 统计学方法

采用SPSS 28.0统计学软件进行数据分析,计量资料经*Shapiro-Wilk*检验证实符合正态分布,以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,采用单因素重复测量方差分析比较ACL不同区域间的相对灌注量,进一步两两比较采用*Bonferroni*法;不同性别间同一区域的相对灌注量差异比较采用独立样本t检验。以$P<0.05$为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 成像质量分析

42例患者的膝关节MRI检查图像经矢状斜面重建后,均可完整、清晰地显示ACL从股骨附着点至胫骨附着点的全长,无图像运动伪影、对比剂充盈不佳、磁场均匀性异常等影响定量分析的情况,所有图像质量均满足ROI划分与信号强度定量测量要求。

2.2 相对灌注量分布及性别差异分析

qMRI结果显示,ACL近端、中部、远端的相对灌注量比较,差异均具有统计学意义($P<0.05$),其中近端相对灌注量高于中部($P=0.007$)和远端($P=0.001$),而中部与远端相对灌注量比较,差异无统计学意义($P=0.281$)。进一步行亚组分析显示,男性ACL近端相对灌注量显著高于女性($P=0.036$),女性中部相对灌注量显著高于男性($P=0.036$),远端区域相对灌注量在性别间无显著差异($P>0.05$),见表1。

表1 ACL不同区域相对灌注量分布及性别差异分析($\bar{x}\pm s$,%)

区域	总体(n=42)	男性(n=18)	女性(n=24)
近端	56.0±10.2	66.9±11.3	47.8±9.0#
中部	28.2±5.1*	19.0±3.1*	35.1±6.9*#
远端	15.8±3.1*	14.1±2.5*	17.1±3.4*
F	7.213	7.213	7.213
P	0.002	0.002	0.002

*:与近端比较,$P<0.05$;#:与男性比较,$P<0.05$

3 讨论

本研究通过对比增强qMRI技术,对42例成人活体ACL进行了无创的灌注量化分析。采用对比增强qMRI技术结合胫骨平台软骨信号标准化方法,可有效消除多种系统误差和个体差异的影响。增强前后经标准化后的各ROI信号强度变化值能够稳定、准确地反映ACL对应区域的对比剂摄取水平,进而量化评估组织相对灌注量与血管分布丰富程度,为本次研究的统计分析提供了可靠的量化数据基础。结果显示,成人ACL的相对灌注量存在显著的区域差异,其中近端1/3区域的相对灌注量最高[(56.0±17.4)%],约为中部区域的2倍、远端区域的3倍,这一结果直接证实了成人活体ACL的血管分布主要集中于近端区域,与既往离体组织学研究的结论相符[4]。既往关于ACL血管分布的研究多基于尸体解剖或动物模型[5],而本研究通过无创qMRI技术,在成人活体中实现了ACL灌注水平的原位量化,为ACL的生物学特征研究提供了更贴合临床实际的影像学数据。

本研究发现,ACL近端区域相对灌注量显著高于中部、远端区域,而中部与远端区域间相对灌注量无显著统计学差异,这一结果对理解ACL损伤的愈合机制具有重要意义[6]。组织愈合的核心基础是充足的血供,丰富的血管分布可为组织修复提供氧气、营养物质及修复相关的细胞与细胞因子,直接决定了组织的内源性愈合能力[7]。传统观点认为ACL内源性愈合能力差[7],而近年来的研究发现,ACL股骨侧(近端)的撕裂具有更好的愈合潜力,部分患者可通过保守治疗或原位修复获得良好的临床预后[9]。本研究发现的近端区域高灌注特征,恰好为此临床现象提供了直接的病理生理基础。针对临床中广泛应用的ACL重建残端保留技术[10],本研究结果也具有重要的临床指导价值。ACL原生附着部位的残端可通过保留原生胶原结构、基质成分和血管分布,增强生物愈合潜力。而本研究结果为这一理论提供了影像学依据:ACL近端(股骨侧)的灌注量远高于远端(胫骨侧),提示从血管分布与愈合潜力的角度来看,保留股骨侧残端可能比临床常规采用的胫骨侧残端保留具有更显著的生物学优势[11]。理论上,保留血供更丰富的股骨侧残端,可通过残端形成的新生血管侧支循环为重建移植物提供更早、更充足的血供,加速移植物的再血管化与成熟过程;而远端区域相对较低的灌注量提示,单纯保留胫骨侧残端可能无法为移植物愈合提供显著的血供相关生物学益处[12]。这一推测为ACL重建术中残端保留方案的优化提供了新的思路,也为后续相关临床研究提供了理论方向[13]。同时,本研究亚组分析发现,男性ACL近端区域的相对灌注量显著高于女性,这一结果具有潜在的临床意义。既往研究已证实,女性ACL损伤的发生率显著高于男性,且损伤后愈合效果更差[14],这一差异被认为与女性ACL解剖形态、激素水平、生物力学特征等因素相关。而本研究发现的性别间灌注差异,可能是导致男女ACL损伤风险与愈合结局差异的另一重要原因——女性ACL近端区域更低的灌注量,可能导致其损伤后内源性愈合能力更弱,进而影响临床预后。这一发现为ACL损伤的性别差异研究提供了新的视角,后续可扩大样本量进一步验证不同性别间血管分布差异与ACL损伤风险、愈合结局的相关性[15-16]。

本研究仍存在一定的局限性:第一,为单中心回顾性研究,样本量相对较小,性别亚组分析的统计效能有限,后续需开展多中心、大样本的研究进一步验证研究结果;第二,仅分析了ACL各区域的灌注差异,未进一步分析灌注水平与ACL损伤程度、术后愈合效果的相关性,后续可开展前瞻性随访研究,明确ACL灌注水平对损伤预后的预测价值[17];第三,未纳入ACL损伤患者,仅分析了正常ACL的灌注特征,后续可对比分析损伤ACL的灌注变化[18-19],进一步探究灌注水平与ACL损伤愈合的关系。

综上所述,本研究采用对比增强qMRI技术,在成人活体中证实了ACL不同解剖区域的灌注量存在显著差异,其中近端1/3区域灌注量最高,中部和远端区域灌注量较低。这一发现明确了成人活体ACL血管分布的区域特征,为理解ACL损伤的发生机制、优化ACL损伤的临床诊疗策略提供了重要的影像学依据。

[参考文献]

[1] 张海宇,闫宇涛,张 烁,等. 膝关节前交叉韧带扭伤及慢性损伤的MRI定量分析及与关节镜的对照研究[J]. 实用放射学杂志,2024,40(4):609-612. doi:10.3969/j.issn.1002-1671.2024.04.022.

[2] 梁振星,刘合鹏,连霄飞,等. 基于MRI测量的胫骨平台增宽距离和关节积液量评估胫骨平台骨折患者前交叉韧带损伤[J]. 影像科学与光化学,2025,43(4):27-33. doi:10.7517/issn.1674-0475.2025.04.04.

[3] 吕嘉玲,李顶夫. 前交叉韧带重建术后1年腱骨愈合的MRI纵向随访30例分析[J]. 深圳中西医结合杂志,2024,34(11):78-81. doi:10.16458/j.cnki.1007-0893.2024.11.023.

[4] 亚森·依米提,排尔哈提·亚生,阿布都热苏力·图尔孙,等. 应用MRI T2mapping成像量化急性前交叉韧带损伤患者患侧与对侧胫股关节软骨的分析[J]. 医学影像学杂志,2024,34(6):121-124. doi:10.3969/j.issn.1006-9011.2024.06.030.

[5] 黄 栋,戈 进,刘广銮,等. MRI分析前交叉韧带胫骨止点撕脱骨折的解剖学危险因素[J]. 中国组织工程研究,2024,28(24):3890-3896. doi:10.12307/2024.620.